

تأثير عملية المراجعة في البنية المجهرية والخواص الميكانيكية لحديد الصب المطيل

د. م. مُهَلَّب الداود*

م. جلاء اليونس***

م. شيرين أبو سكة**

المُلخَص

تكمن الأهمية الصناعية لحديد الصب المطيل بوصفه مادة هندسية تجمع بين خواص حديد الصب الرمادي (نقطة الانصهار المنخفضة، وإمكانية السباكة الجيدة، وإمكانية التشغيل الجيدة، والتشحيم الذاتي، والمقدرة العالية على تخميد الاهتزازات، والمقاومة العالية للتآكل) وبعض خصائص الفولاذ (أي تمتعه بكل من المتانة مرتفعة القيم والمطيلية وإمكانية التشكيل على الساخن وقابلية التقسية).

يكمن الهدف من هذا البحث في تحديد درجة الحرارة الحرجة لكل نوع من أنواع حديد الصب المطيل GGG40، GGG50، GGG60 ودراسة تأثير عملية الإرجاع في الخواص الميكانيكية الناتجة لكل نوع من الأنواع الثلاثة وتحليل النتائج لتحديد بارامترات المعالجة الحرارية النموذجية، وبشكل رئيس درجة الحرارة والزمن اللذان يحققان الخواص الميكانيكية المثلى.

أُجريت في هذا البحث المعالجة الحرارية على ثلاثة أنواع من حديد الصب المطيل GGG40، GGG50، GGG60 وذلك وفقاً للمواصفات الألمانية DIN1693، إذ كانت البنية المجهرية لهذه الأنواع الثلاثة قبل المعالجة الحرارية تتألف من غرافيت مكور محاط بالفريت والبرليت، وكانت الخواص الميكانيكية الابتدائية لهذه الأنواع الثلاثة قبل المعالجة الحرارية هي على التوالي: القساوة مقيسة بالبرينل 150، 196، 255 والقيمة القصوى لإجهاد الشد 456، 545، 662 نيوتن/مم².

حُدِّثت درجة الحرارة الحرجة AC لكل نوع من الأنواع الثلاثة، وذلك عن طريق قياس قساوة العينات المبردة بشكل سريع في الماء، ثم فحص بنيتها المجهرية، وبعد ذلك أُجريت عملية سقاية للعينات عند درجات الحرارة المحددة في هذا البحث تتبعها عملية المراجعة عند درجات حرارة مختلفة تراوح بين 250 إلى 550 درجة مئوية.

نتيجة لهذه المعالجة الحرارية حُوِّلت البنية المجهرية إلى بنية مارتنسينية مراجعة، وبقي الغرافيت على شكله المكور، ومن ثمَّ ازداد إجهاد الشد الأعظم وقيم القساوة، وأصبحت القيمة القصوى لإجهاد الشد الأعظم للأنواع الثلاثة على التوالي 1260، 1195 نيوتن/مم². ترتبط التغيرات في البنية المجهرية والخواص الميكانيكية باختيار درجة حرارة المراجعة، إذ وجد أن أفضل درجات حرارة المراجعة التي تعطي القيمة القصوى لإجهاد الشد، هي تلك الواقعة بين 400-450 درجة مئوية.

الكلمات المفتاحية: حديد الصب المطيل، السقاية، المراجعة، البنية المجهرية، الخواص الميكانيكية.

* مدرس في قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

** معاون قائم بالأعمال في قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

*** معاون قائم بالأعمال في قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

1- المقدمة:

من أجل تحسين مقاومة الأكسدة. يتبع اختلاف البنية المجهرية للمادة الأساسية لظروف الإنتاج والتركيب الكيميائي ومعدل التبريد عند السباكة، ويمكن أن تتغير المادة الأساسية والقساوة بالمعالجة الحرارية. [6،5]

ونظراً إلى تمتع حديد الصب المطيل بمجموعة الميزات الاقتصادية والموثوقية العالية فهو يستخدم في العديد من أجزاء السيارات المعقدة، كما في أعمدة المرفق ودعائم محور الدوران للدولاب الأمامي وأقراص المكابح وقضبان التوصيل مع المحرك ومحاور العجلات وأجزاء نظام التعليق ومشابك نقل الطاقة وفي التطبيقات التي تتعرض لحرارة عالية. كما يستعمل حديد الصب المطيل كقطع استبدال للعديد من الأجزاء التالفة عالية الثمن وبعض هذه التطبيقات الشائعة هي أعمدة المرفق للسيارات وأعمدة الكامنة لمسننات القيادة والمكابح والأسطوانات الهيدروليكية وأنابيب الغاز وأنابيب المياه في المناطق المعرضة للزلازل وكرات الطواحين الفولاذية وكرات الطواحين الورقية وأجزاء الإنشاءات وآلات البناء. يضيف وجود الغرافيت في البنية خصائص تخميد جيدة من أجل تهدئة المسننات في أثناء عملها فضلاً عن انخفاض في معامل الاحتكاك الناتج عن علبة السرعة، ويقلل من فقدان مواد التشحيم. [8،7،3]

وجد كل من Elliott و Bahmani أن زيادة درجة الحرارة الانحلالية يؤثر في محتوى الكربون في طور الأوستنيت مما يؤدي إلى انزياح مخطط التحولات بثبات درجة الحرارة نحو اليمين. [9]

لاحظ Ibrahim أن زيادة درجة حرارة التسخين تؤدي إلى زيادة قساوة العينات المبردة تبريداً سريعاً بالماء لتصل إلى قيمة معينة، ثم تثبت بعدها قيم القساوة بزيادة درجة حرارة التسخين. [10]

بحث كل من Ali M Rashidi و M Moshrefi-Torbati في تأثير كل من درجة الحرارة وزمن عملية المراجعة في الخواص الميكانيكية لعينات من حديد الصب المطيل، ووجد أنه ضمن

إن المصطلح الدولي لحديد الصب المطيل هو حديد الصب الحاوي غرافيت كروي، ومع أن هذا الغرافيت يشكل قرابة 10% من حجم حديد الصب المطيل، إلا أن تراسه على شكل كريات يؤثر تأثيراً كبيراً في الخواص الميكانيكية. تتأثر الخواص الميكانيكية لغرافيت حديد الصب تأثيراً كبيراً بشكل هذا الغرافيت وحجمه وتوزعه، ويتكون شكل هذا الغرافيت عند تصلب المعدن، ولن يتغير بأي طريقة إلا بإعادة الصهر للمعدن. [1،2]

يجمع حديد الصب المطيل بين الميزات الرئيسة لحديد الصب الرمادي (نقطة انصهار منخفضة، وسيولة جيدة، وإمكانية السباكة الجيدة، وإمكانية التشغيل الجيدة، والتشحيم الذاتي، والقدرة العالية على تخميد الاهتزازات، والمقاومة العالية للتآكل) وبعض خصائص الفولاذ (المقاومة العالية للإجهادات وقوة الشد العالية والمطيلية وإمكانية التشكيل على الساخن وإمكانية التقسية). استخدم حديد الصب المطيل في العديد من الصناعات بسبب قلة تكاليف التصنيع، ومن ثم انخفاض التكلفة الإجمالية للجزء المصنع، وهو يقارب من حيث قابليته للتصنيع حديد الصب الرمادي ومماثل له في القساوة. [4،3]

يتمتع حديد الصب المطيل بإجهاد شد أعظم أكبر من حديد الصب الرمادي ومعدل متانة الصدم تقع بين حديد الصب الرمادي والفولاذ ومقاومته للصدمات مشابهة للفولاذ القابل للطرق، والميزة الأساسية لهذا النوع هو مقاومته للضغط وقابليته للحام. إن الخواص الميكانيكية لحديد الصب المطيل ليست ناتجة من مكون واحد، وإنما ناتجة من وجود مجموعة من المكونات التي تعطي مجالاً واسعاً من الخواص تجعلها قادرة على تلبية مجموعة كبيرة ومتنوعة من المتطلبات الهندسية، فهناك الفريت الطري الذي يعطي جساءة عالية ومطيلية، والبرليت القاسي الذي يعطي متانة شد عالية، ومن ثم مزيج (الفريت - البرليت) هذا يخدم عدداً وافراً من التطبيقات الهندسية، كما أن معدل السيليكون العالي يستخدم

من الغرافيت الثانوي. ووجدوا كذلك أن ذرات الغرافيت الثانوي تسيء إلى الخواص الميكانيكية بما فيها إجهاد الشد الأعظمي ومتانة الصدم وإن إجراء المراجعة عند درجات حرارة مرتفعة يؤدي إلى تقليل عدد حبيبات الغرافيت الثانوي. [17]

2- العمل التجريبي:

2-1- المواد المستخدمة:

استخدم في هذا البحث ثلاثة أنواع من حديد الصب المطيل GGG40، GGG50، GGG60 وذلك بحسب المواصفة الألمانية DIN1693.

يبين الجدول 1 التركيب الكيميائي لهذه الأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل، في حين يبين الجدول 2 الخواص الميكانيكية لهذه الأنواع الثلاثة قبل إجراء المعالجة الحرارية.

الجدول 1 التركيب الكيميائي للأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل.

Grade	C %	Si %	Mn %	Cu %	Mg %
GGG 40	3.5	1.2	0.18	-----	-----
GGG 50	3.5	2.1	0.2	-----	0.04
GGG 60	3.6	2.3	0.4	0.3	0.035

الجدول 2 الخواص الميكانيكية للأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل قبل المعالجة الحرارية.

النوع	قساوة برينل HB	إجهاد الشد الأعظم N/mm ²
GGG 40	150	465
GGG 50	196	545
GGG 60	255	662

2-2- دراسة البنية المجهرية:

درست وفحصت البنية المجهرية للعينات قبل المعالجة الحرارية وبعدها باستخدام المجهر الضوئي؛ وذلك بعد تخريش العينات بمحلول النيتال (2% من حمض الأزوت المركز + 98% كحول) عن طريق غمرها بالمحلول مدة 3 ثوانٍ.

2-3- المعالجة الحرارية:

استُخدم فرنان كهربائيان لإجراء المعالجة الحرارية المطلوبة، فرن للمعالجة الحرارية الانحلالية عند درجات

مجال درجة حرارة المراجعة 450 - 500 درجة مئوية تحدث زيادة كبيرة في متانة الصدم والمطيلية، في حين تتناقص كل من قوة الشد العظمى والقساوة مع زيادة درجة حرارة المراجعة، ووجدوا كذلك أنه بزيادة زمن المراجعة حتى 120 دقيقة تزداد متانة الصدم والمطيلية ويتناقص إجهاد الشد والخضوع. [11]

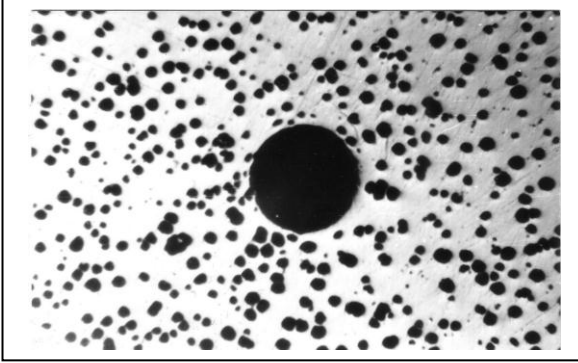
أثبت Okorofofor أن الخواص الميكانيكية لعينات حديد الصب المطيل تعتمد على عملية المراجعة، وأن المطيلية تزداد بازدياد درجة حرارة المراجعة على نقيض إجهاد الشد الأعظم الذي يتناقص مع ازدياد درجة حرارة المراجعة. [12]

درس Cox وآخرون تأثير درجة حرارة المراجعة في الخواص الميكانيكية لحديد الصب المطيل ووجدوا أنه بزيادة درجة حرارة المراجعة ينخفض إجهاد الشد الأعظم وحد الخضوع والقساوة في حين تزداد المطيلية. [13]

درس Yusuf Kayali وآخرون تأثير كل من عملية المعالجة السطحية بالبورون عند درجة حرارة 900 °C وأزمنة مختلفة، وأجريت تمت عملية المراجعة عند درجات حرارة مختلفة مدة ساعة واحدة، وذلك على البنية المجهرية والخواص الميكانيكية لحديد الصب المطيل، وخلصوا إلى أن لدرجة حرارة عملية المراجعة تأثيراً أكبر من زمن عملية المعالجة بالبورون، وذلك في الخواص الميكانيكية، وإن أفضل خصائص ميكانيكية يتم الحصول عليها عند إجراء المعالجة السطحية بالبورون مدة من 1-3 ساعات ومن ثم مراجعة ضمن المجال 250-350 درجة مئوية مدة ساعة واحدة. [14،15]

تبيّن لكل من Yusuf Sahin وآخرون أن ازدياد نسبة المارتنسيت في البنية المجهرية لحديد الصب المطيل تؤدي إلى ارتفاع قيم إجهاد الشد الأعظم وتتناقص الاستطالة النسبية، في حين بزيادة زمن المراجعة يتناقص إجهاد الشد الأعظم وإجهاد الخضوع وتزداد المطيلية [16].

لاحظ EI-Banna and EI-Bitar عدم وجود لذرات الغرافيت الثانوي في العينات المسبوكة، في حين بعد عملية المعالجة الحرارية ظهر في البنية النهائية مارتنسيت وكربيدات وذرات



الشكل 1 صورة مجهرية لحجم الانغراس الناتج عن اختبار القساوة بطريقة برينل. $50\times$

2-4- اختبار القساوة:

الحرارة العالية، وفرن للمراجعة عند درجات الحرارة المنخفضة.

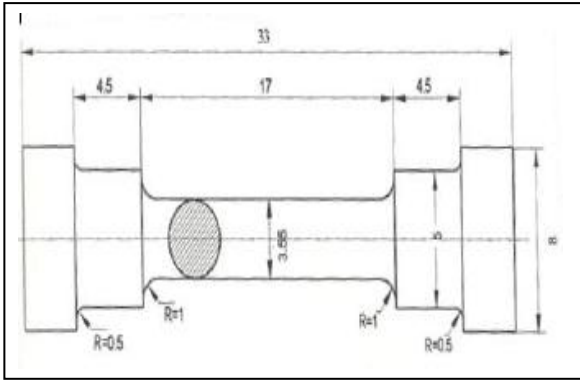
يجري إرجاع العينات للأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل مباشرة بعد إجراء عملية السقاية؛ وذلك بتسخينها في الفرن الثاني عند درجات حرارة إرجاع مختلفة من 250 إلى 550 درجة مئوية، وفي خطوات 50°C مدة ساعة، ثم تبرد العينات بالهواء حتى درجة حرارة الغرفة.

قيست قساوة العينات قبل المعالجة الحرارية باستخدام اختبار القساوة بطريقة برينل، بحيث كان رأس الانغماس عبارة عن كرة فولاذية ذات قطر 10 مم، وذلك لأن سطح الانغماس يكون كبيراً بشكل كافٍ، مما يقلل من الخطأ النسبي في القياس، ومن ثم الحصول على متوسط قيم القساوة لمختلف المكونات في البنية المجهرية، كما هو مبين في الشكل 1.

ومن جهة أخرى استُخدم اختبار القساوة بطريقة روكويل باستخدام مخروط من الألماس HRC ويحمولة 150kg لقياس قساوة عينات حديد الصب المطيل بعد إجراء عملية التقسية والإرجاع. ويمكن هذا التغير في طريقة القياس لأن عينات الاختبار تصبح قاسية بشكل كبير لدرجة أنه لا يمكن قياسها باستخدام كرة برينل الفولاذية المقساء، إذ يحدث تشوه في الكرة الفولاذية وتصبح قيم القساوة غير دقيقة.

أُجري الاختبار باستخدام جهاز AFFRI إيطالي المنشأ وأُخذت أربعة قياسات لكل عينة من العينات، وحُسب المتوسط الحسابي لهذه القراءات الأربع لتجنب تأثير الغرافيت في قيم القساوة الناتجة، فضلاً عن أن هذه القراءات تعطي دقة وموثوقية أكبر لقياس القساوة.

2-5- اختبار الشد:
أُجري اختبار الشد عند درجة حرارة الغرفة باستخدام آلة شد عمومية نوع Instron 1195 انكليزي الصنع مع استخدام سرعة رأس تحميل 5 mm/min؛ وذلك على ثلاث عينات قياسية من أجل كل درجة حرارة إرجاع، ومن ثم أُخذ المتوسط الحسابي لهذه القيم، يبين الشكل 2 شكل عينات الشد المستخدمة وأبعادها. ولوحظ من خلال الاختبار أن الكسر كان في منطقة الطول الفعال للعينة، وتم تجاهل أي عينة تتكسر (تتحطم) خارج تلك المنطقة.

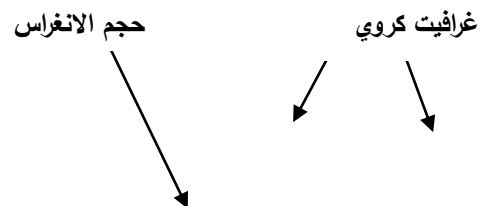


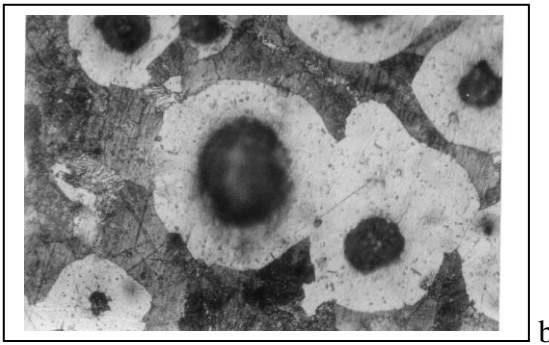
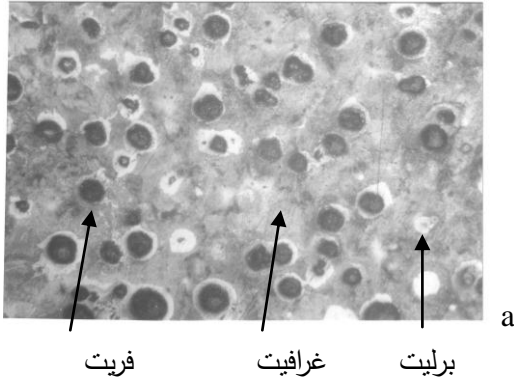
الشكل 2: شكل عينة الشد المستخدمة وأبعادها

3- النتائج والمناقشة:

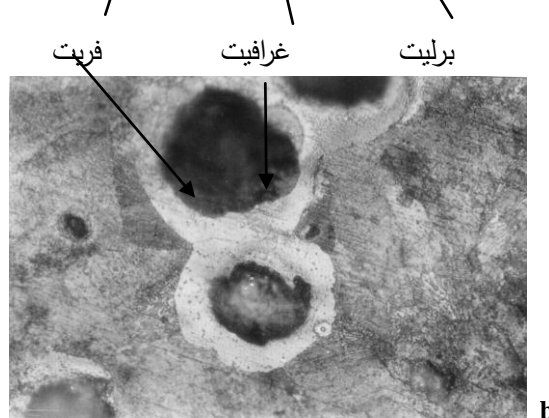
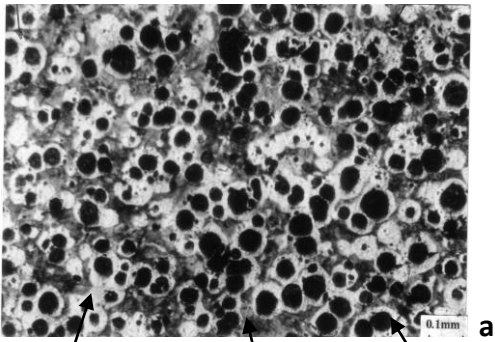
1-3- دراسة البنية المجهرية:

إن البنية المجهرية لكل نوع من أنواع حديد الصب المطيل قبل المعالجة الحرارية هي عبارة عن برليت وفريت بكميات





الشكل 4 البنية المجهرية لحديد الصب المطيل
نوع GGG50. (a)100X، (b)200X

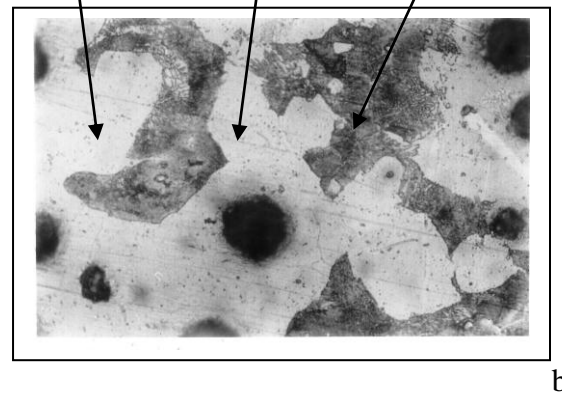
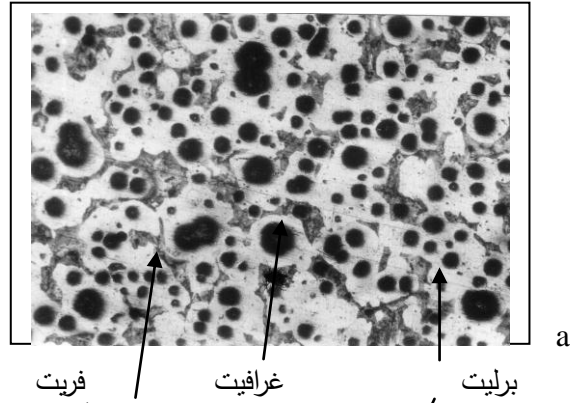


الشكل 5 البنية المجهرية لحديد الصب المطيل
نوع GGG60. (a)100X، (b)200X

مختلفة، فضلاً عن كرات من الغرافيت كما هو مبين في الأشكال 3-4-5.

وتختلف كل بنية عن البنى الأخرى من الأنواع الثلاثة بنسبة كل من الفريت والبرليت، وهذا ما يعكس التباين والاختلاف في الخواص الميكانيكية لكل نوع من حديد الصب المطيل المبينة في الجدول 2 السابق.

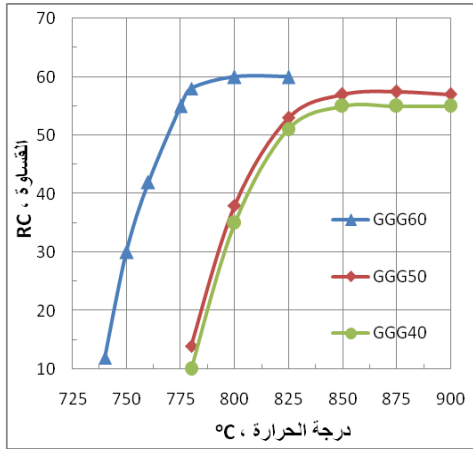
إن القيم المنخفضة لقوة الشد العظمى والقساوة للنوع GGG40 ناتجة عن وجود كمية كبيرة من الفريت وكمية قليلة من البرليت في البنية المجهرية، كما هو واضح في الشكل 3.



الشكل 3 البنية المجهرية لحديد الصب المطيل نوع GGG40.
(a)100X، (b)200X

يُظهر الشكل 6 أن قيم القساوة تزداد تدريجياً مع ارتفاع درجات حرارة التسخين للعينات المختبرة، وبعد ذلك يلاحظ ثبات في قيم القساوة على الرغم من استمرار الزيادة في درجات حرارة التسخين.

إن درجة الحرارة الحرجة هي أخفض درجة حرارة يختفي عندها طور الفريت بشكل كامل من البنية المجهرية، إذ تصل قيم قساوة العينات إلى القيم العظمى؛ وذلك عند السقاية إلى درجة حرارة أعلى من درجة الحرارة الحرجة.



الشكل 6 تأثير درجة حرارة التسخين في القساوة النهائية للعينات المسقاة.

إن قيم القساوة المنخفضة المبيّنة في بداية كل منحنى تدل على أن البنية المجهرية للعينات مؤلفة من طور الفريت والمارتنسيت والغرافيت الكروي، وهذا ما يظهر بشكل واضح في الشكل 7، مما يدل على أن درجات حرارة التسخين ليست مرتفعة بما فيه الكفاية للتخلص من كمية طور الفريت الطري نسبياً الموجودة في البنية. وعند درجات الحرارة الأعلى يختفي الطور الفريتي بشكل كامل، ويظهر في العينات المسقاة فقط الغرافيت الكروي فضلاً عن المارتنسيت كما هو مبين في الشكل 8، وهذا يدل على أن درجات حرارة السقاية عالية بشكل كافٍ للتخلص من البنية الفريتيّة. يشكل المارتنسيت الطور الوسيط بين الأوستنيت الذي يكون على شكل مكعب متمركز وجهياً FCC والفريت الذي يكون على شكل مكعب متمركز

بينما يلاحظ في الشكلين 4 و5 زيادة كمية البرليت ونقصان كمية الفريت ما أدى إلى زيادة قيم إجهاد الشد الأعظم والقساوة بشكل ملحوظ، وكانت أعلى قيم لإجهاد الشد الأعظم والقساوة هي للنوع GGG60 الذي يحوي في بنيته المجهرية على أعلى كمية من البرليت و أقل كمية من الفريت، كما هو واضح وبشكل جلي في الشكل 6.

3-2- تحديد درجة حرارة التقسية ومدتها:

تحوي خلائط حديد الصب المطيل في تركيبها الكيميائي الحديد والكربون، فضلاً عن مجموعة من العناصر الخلائطية، ولا يتوافر مخطط توازن لها، لذا سُنَّحَدُّ درجات الحرارة الحرجة لكل نوع من الأنواع الثلاثة بشكل تجريبي، ولا تعدُّ درجات الحرارة الحرجة موثوقاً بها إلا إذا حُدِّدَتْ باستخدام طريقتين مستقلتين على الأقل.

حُدِّدَتْ في هذا البحث درجة الحرارة الحرجة بالاعتماد على طريقة قياس القساوة، وهذه الطريقة سريعة وغير مكلفة، فضلاً عن الفحص المجهرية للعينات المسقاة وهذه الطريقة تستخدم لإثبات نتائج الطريقة الأولى.

سُنَّحُنَّ العينات إلى منطقة الطور الأوستنيتي فقط وعندها يبدأ تحول البرليت إلى أوستنيت فوق درجة الحرارة AC_1 ، ولكن من أجل اختفاء الطور الفريتي بالكامل من البنية والحصول على الأوستنيت الذي يحوي تركيزاً منتظماً للكربون في كل جزء من العينة فإن ذلك يتطلب التسخين إلى درجة حرارة أعلى.

لتحديد درجة حرارة التقسية المناسبة لكل نوع من الأنواع الثلاثة لحديد الصب المطيل، سُنَّحُنَّتِ العينات لمدة 15 دقيقة لدرجات حرارة مختلفة تراوح بين 700 إلى 900 درجة مئوية وبخطوات $(20-25)^\circ C$ ، ومن ثم بُرِّدَتْ بالماء، وبعد ذلك أُجْرِي عليها اختبار القساوة باستخدام طريقة روكويل، وعندها تكون درجة حرارة التقسية المناسبة هي درجة الحرارة التي تثبت عندها قيم القساوة لكل نوع من الأنواع الثلاثة.

اختلاف درجات حرارة السقاية بين الأنواع الثلاثة لحديد الصب المطيل مرده إلى تباين نسب طور الفريت الموجود في البنية المجهرية لكل نوع من الأنواع الثلاثة قبل عملية السقاية، وبناءً عليه فإن درجة حرارة السقاية لحديد الصب المطيل GGG40 هي أعلى من النوعين GGG50 وGGG60 وذلك لاحتوائه على أكبر كمية من طور الفريت في بنيته المجهرية، كما هو مبين في الشكل 3 السابق، وهذا ما يتطلب التسخين إلى درجة حرارة أعلى للتخلص من هذه الكمية الكبيرة مقارنة بالأنواع الأخرى من حديد الصب المطيل.

يبين الجدول 3 درجة الحرارة الحرجة العليا وقيمة القساوة التي تم الحصول عليها نتيجة تسخين العينات لكل نوع من أنواع حديد الصب المطيل.

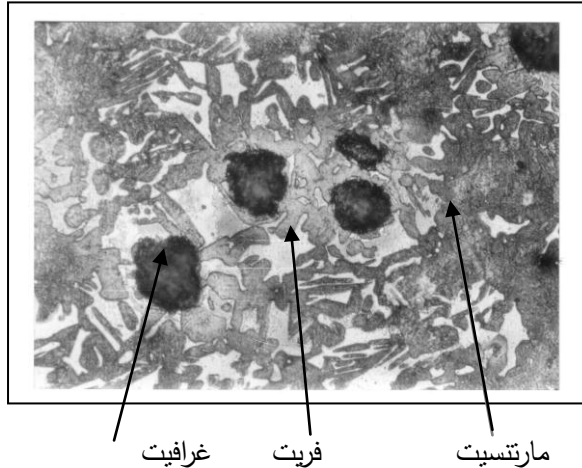
يبين الجدول 3 درجات الحرارة الحرجة للأنواع الثلاثة من

حديد الصب المطيل.

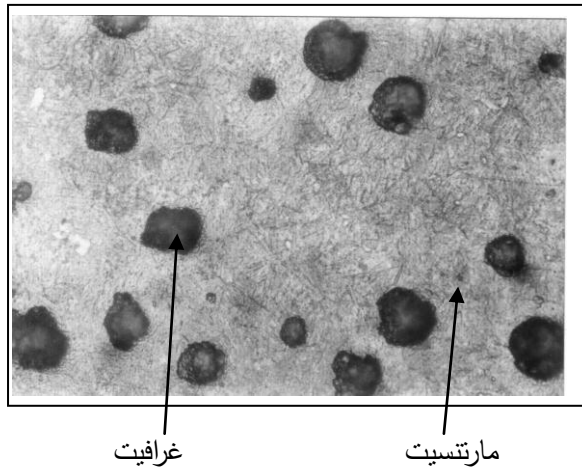
النوع	درجات الحرارة الحرجة °C	القساوة النهائية HRC
GGG 40	860	56
GGG 50	850	57
GGG 60	800	60

إن زمن إبقاء العينات في مجال التحول الأوستينيبي مهم أيضاً، ولمعرفة الزمن المناسب سُخِّنَتِ العينات ضمن مجال درجات الحرارة السابقة وأُقيمت عند هذا المجال الحراري مدة 5 دقائق، ثم بردت في الماء فوجد أن بنيتها المجهرية لا تزال تحوي على كمية من طور الفريت ولذلك فإن قساوتها منخفضة، وعندما أُقيمت العينات لمدة 15 دقيقة أو أكثر في المجال الحراري نفسه لم تحو بنيتها المجهرية أي كمية من طور الفريت، ومن ثمَّ تحسنت قيم القساوة، وبناءً عليه فإن الزمن اللازم لإبقاء العينات في مجال التحول الأوستينيبي هو 15 دقيقة.

حجماً BCC، ولكن تبقى ذرات الكربون مذابة بشكل قسري (محجوزة) في المحلول الصلب ولا يسمح بانتشارها خارج الخلية البلورية للأوستينيت؛ لأن التبريد يكون سريعاً وخلال زمن قليل، وهذه البنية المارتنسيبية هي الأقسى من نواتج التحول الأوستينيبي كلها.



الشكل 7 البنية المجهرية لعينة سُقيت عند درجة حرارة أقل من درجة الحرارة الحرجة. 200X



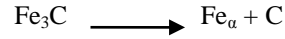
الشكل 8 البنية المجهرية لعينة سُقيت عند درجة حرارة أعلى من 200X .AC₃

كما هو واضح في الشكل 6 السابق، تكون درجات حرارة التسخين المطلوبة للأنواع الثلاثة التي تبدأ عندها قيم القساوة بالثبات هي أعلى من 860 °C للنوع GGG40 وأعلى من 850 °C للنوع GGG50 وأعلى من 800 °C للنوع GGG60 بمقدار (30-50) درجة مئوية. إن

4-3- تأثير درجة حرارة الإرجاع في القساوة:

إن الغاية الرئيسية لعملية الإرجاع هي تقليل الهشاشة الناتجة عند تقسية العينات، ويبيّن الشكل 9 تأثير درجة حرارة الإرجاع في القيم الوسطية لقساوة العينات للأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل. يبيّن هذا الشكل أن قساوة العينات المراجعة تنخفض تدريجياً مع ازدياد درجة حرارة الإرجاع، وهذا الانخفاض في القساوة قد يكون بسبب تفكك الكرييدات (وخاصة كربيد الحديد أو ما يدعى بالسمنتيت)

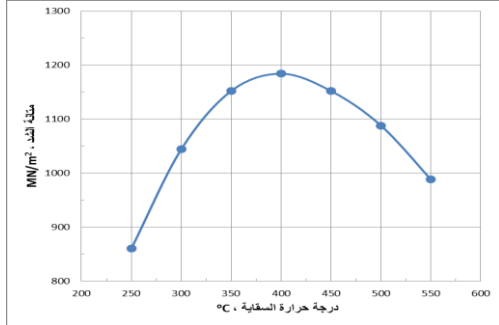
إلى فريت وجرافيت؛ وذلك وفقاً للمعادلة الآتية:



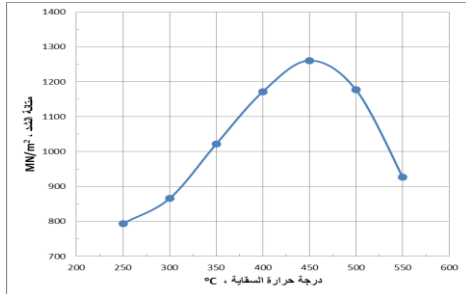
ونمو حبيبات الجرافيت الثانوية الصغيرة على حساب الكرييدات وذلك عند درجات حرارة الإرجاع العالية. على أية حال، يلاحظ أن القساوة النهائية للمارتنيسيت المراجع مائزلة أعلى من قساوة حديد الصب، ولذلك فإن حديد الصب المطيل المقسى والمراجع يتمتع بمقاومة عالية للاهتراء.

تبيّن هذه الأشكال أن ازدياد درجة حرارة الإرجاع تؤدي إلى ارتفاع قيم إجهاد الشد الأعظم للأنواع الثلاثة حتى تصل إلى قيمة أعظمية عند درجة حرارة إرجاع معينة، وعندها تنخفض قيم إجهاد الشد الأعظم مع ازدياد درجة حرارة الإرجاع.

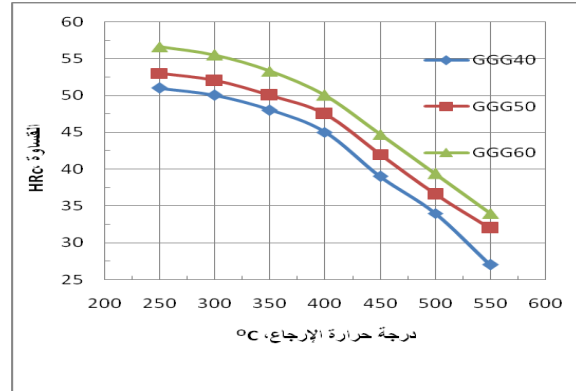
تعود الزيادة في قيم إجهاد الشد الأعظم عند درجات الإرجاع المنخفضة إلى تخفيف الإجهادات الداخلية التي تزداد خلال عملية السقاية والتي تؤدي إلى زيادة الهشاشة والتقليل من إجهاد الشد للعينات المقساء، ومع ازدياد درجة حرارة الإرجاع تتناقص الإجهادات الداخلية تدريجياً، وذلك بسبب تحول المارتنيسيت الهش إلى مارتنيسيت مراجع، وتشكل حبيبات الجرافيت الناتجة عند تفكك كربيد الحديد (السمنتيت) كما أشير إليه آنفاً، مما يؤدي إلى انخفاض قوة الشد تدريجياً؛ وذلك بعد درجة حرارة إرجاع معينة لكل نوع من أنواع حديد الصب المطيل.



الشكل 10 تغير إجهاد الشد الأعظم للنوع GGG40 مع تغير درجات حرارة الإرجاع.



الشكل 11 تغير إجهاد الشد الأعظم للنوع GGG50 مع تغير درجات حرارة الإرجاع.



الشكل 9 تغير قيم القساوة بتغير درجة حرارة الإرجاع للأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل.

4-4- تأثير درجة حرارة الإرجاع في إجهاد الشد الأعظم لحديد الصب المطيل:

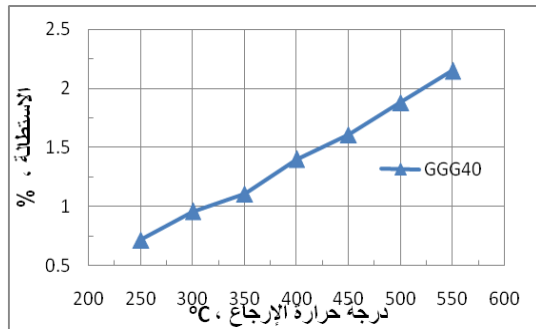
تبيّن الأشكال 10، 11، 12 تأثير تغير درجة حرارة الإرجاع في متانة الشد للأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل موضوع البحث .

قيم هذه الاستطالة لكل نوع من أنواع حديد الصب المطيل.

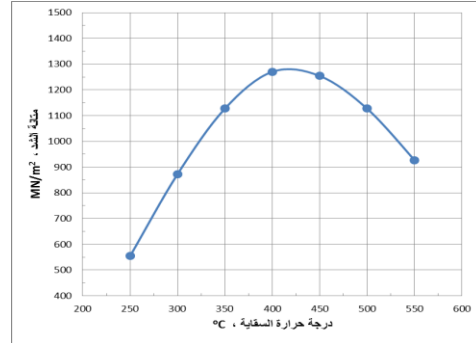
تعود الزيادة في الاستطالة إلى إعادة التجانس للبنية المترافق مع إعادة اندماج الكرييدات، وعند درجة حرارة مراجعة 400°C يبدأ حدوث تشوه لدن خفيف على طول حدود بلورات الفريت لأن الفريت أظرى من البنية الأساسية.

ويزيادة درجات حرارة الإرجاع تصبح الكرييدات المترسبة أكثر كروية، ومن ثمّ تحجز مساحة أقل على حدود الحبيبات؛ وهذا يقلل الميل نحو تشكل التشقق على حدود الحبيبات وهذا يؤدي إلى زيادة المطيلية بشكل ملحوظ.

تعدّ حبيبات الغرافيت الثانوية المتشكلة خلال مراجعة البنية المارتسيتية المبيّنة في الشكل 13 السابق مصدراً لإعادة توزع الكربون في البنية الأساسية وتنتشر خلال التسخين السريع، ووفقاً لذلك تكون البنية المقساء والمراجعة بالكامل بنية فريتية التي تتمتع بمطيلية أعظمية. إن الحصول على قيم عالية للاستطالة عند درجات حرارة الإرجاع العالية ناتجة عن زيادة كمية الفريت في المارتسيت المراجع، وإن هذه الكمية من الفريت تظهر خلال الإرجاع نتيجة تفكك المارتسيت إلى فريت، ويبدأ تشكل الغرافيت الثانوي حول حبيبات الغرافيت الأولى؛ وهذا يؤدي إلى تحسين المطيلية.

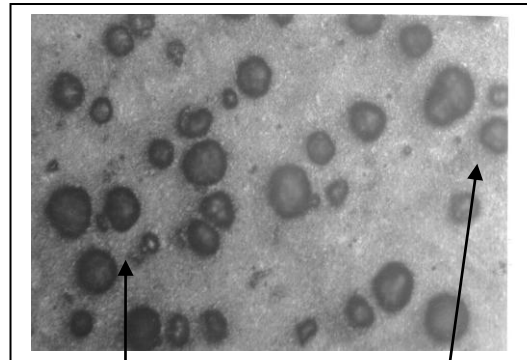


الشكل 14 تغير نسبة الاستطالة للنوع GGG 40 مع تغير درجة حرارة الإرجاع.



الشكل 12 تغير إجهاد الشد الأعظم للنوع GGG60 مع تغير درجات حرارة الإرجاع.

وتظهر البنية المجهرية المبيّنة بالشكل 13 ازدياد عدد حبيبات الغرافيت الثانوية المتشكلة في حديد الصب المطيل من النوع GGG50 عند درجة حرارة إرجاع مرتفعة وصلت إلى 550°C ، والناتجة عن تفكك كرييدات الحديد مما يسيء للخواص الميكانيكية لهذا النوع من حديد الصب المطيل ولاسيما إجهاد الشد الأعظم.



غرافيت أولي

غرافيت ثانوي

الشكل 13 صورة مجهرية لسطح عينة من حديد الصب المطيلة GGG50 إذ قُسمت وسقيت عند درجة حرارة 550°C X100

4-5 تأثير درجة حرارة الإرجاع في الاستطالة النسبية:

تبين الأشكال 14، 15، 16 تأثير تغيرات درجة حرارة الإرجاع في قيم الاستطالة النسبية للأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل، وكما هو واضح من هذه الأشكال فإن الزيادة في درجة حرارة الإرجاع تسبب زيادة تدريجية في

4-6- تعديل البنية المجهرية:

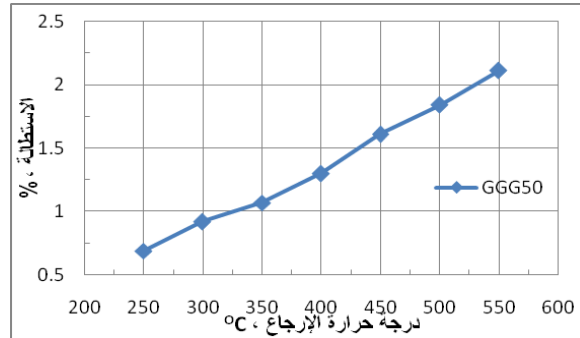
لتحسين الخواص الميكانيكية لهذه الأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل تجري سقايتها وإرجاعها؛ وذلك بغية تعديل بنيتها المجهرية واستبدال البنية الأساسية (الفريت / البرليت) بالمارتنسيت المراجع ذي الهيكل الشبكي الرباعي المتمركز حجمياً قليل التشوه. تحوي هذه البنية المارتنسيّة بلورات مارتنسيّة بشكل شرائح مرتبة بشكل متوازٍ في مجموعات تسمى الحزم أو (الرزم). ويتمتع المارتنسيّة المراجع بإجهاد شد أعظم وقساوة عاليتي القيم نسبياً فضلاً عن متانة صدم مناسبة، كما أن مقاومة الحت والاهترأء للعينات تزداد دون فقدان جودتها في انزلاق السطوح بسبب وجود الكربون على شكل غرافيت.

وفي أثناء المراجعة يُسمح لذرات الكربون بالانتشار إلى مسافات صغيرة وتتشكل جزئيات السمنتيت الصغيرة، وينتج انتشار ذرات الكربون خلال تشكل مركب السمنتيت، ومن ثمّ ينخفض تركيز ذرات الكربون في الطور الصلب وعندها يكتمل تحول الأوستنيت إلى فريت متوازن وسمنتيت Fe_3C . تؤدي عملية الإرجاع إلى تقليل الهشاشية وزيادة الجساءة (المتانة الصدمية) للطور المارتنسيّتي، وكذلك تقلل الإجهادات المتبقية في العينة المقساءة ويصبح حديد الصب المطيل ذا متانة صدم عالية، وهذا يتحقق على حساب تقليل بعض القساوة.

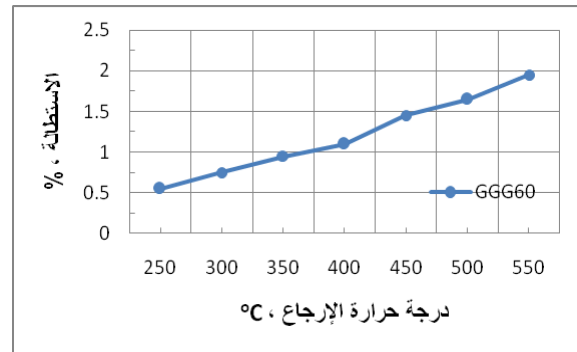
الاستنتاجات:

بالاعتماد على نتائج الدراسة الحالية تم التوصل إلى:

- 1- تحديد درجة الحرارة الحرجة للنقسية لكل نوع من أنواع حديد الصب المطيل المستخدم في هذا البحث.
- 2- إن درجة الحرارة الحرجة للنوع GGG60 هي أقل من درجات الحرارة الحرجة لكل من GGG50 و GGG40، وهذا يعود إلى اختلاف كمية الفريت الموجودة في بنية كل نوع من الأنواع الثلاثة.



الشكل 15 تغير نسبة الاستطالة للنوع GGG 50 مع تغير درجة حرارة الإرجاع.



الشكل 16 تغير نسبة الاستطالة للنوع GGG 60 مع تغير درجة حرارة الإرجاع.

يبين الجدول 4 نتائج الخواص الميكانيكية للعينات من الأنواع الثلاثة لحديد الصب المطيل عند درجة حرارة المراجعة المثالية لكل نوع.

الجدول 4 الخواص الميكانيكية للأنواع الثلاثة لحديد الصب المطيل عند درجات حرارة المراجعة المثالية .

Grade	درجة حرارة الإرجاع	قوة الشد MN/mm ²	القساوة HRC	الاستطالة %
GGG 40	400°C	1195	44.5	1.4
GGG 50	450°C	1260	42	1.7
GGG 60	425°C	1280	47	1.25

بمقارنة هذه النتائج بقيم إجهاد الشد الأعظم للأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل قبل المعالجة الحرارية، تلاحظ زيادة إجهاد الشد الأعظم للأنواع الثلاثة من حديد الصب المطيل (GGG60، GGG50، GGG40) بمعامل 257%، 231%، 193% على التوالي.

- 3- تنخفض قساوة عينات حديد الصب المطيل المقساة والمراجعة بازدياد درجة حرارة الإرجاع ، ودرجة حرارة الإرجاع الواقعة بين $(250 - 300)^{\circ}\text{C}$ ليس لها تأثير كبير في القساوة، ومع ازدياد درجة الحرارة فوق المجال السابق تنخفض القساوة تدريجياً.
- 4- مع الحصول على قيم قساوة أخفض عند درجة حرارة إرجاع 550°C إلا أن هذه القساوة هي أعلى مما هي في حديد الصب الرمادي، وهذا بسبب ظهور المارتنيسيت المراجع عوضاً عن البنية البرليتية-الفريتية.
- 5- مع ازدياد درجة حرارة الإرجاع تزداد قوة الشد الحدية لكل نوع من أنواع حديد الصب المطيل حتى تصل إلى قيمة أعظمية محددة، وبعدها تنخفض قيمة قوة الشد مع ازدياد درجة حرارة الإرجاع.
- 6- إن درجة حرارة الإرجاع المثلى لأنواع حديد الصب الثلاثة هي بين $(400 - 450)^{\circ}\text{C}$ ، وعندها تكون متانة الشد أعظمية .
- 7- وجد أنه من الممكن زيادة قوة الشد الحدية لأنواع حديد الصب GGG40 - GGG50 - GGG60 بمعامل 257%، 231%، 193% على الترتيب، وهذه النسب تتعلق بقوة الشد الحدية لكل نوع من أنواع حديد الصب المطيل.
- 8- إن انخفاض قيم القساوة ومتانة الشد الحدية لحديد الصب المطيل عند درجات الحرارة العالية قد يكون بسبب تشكل كريات الغرافيت الثانوي.
- 9- تزداد الاستطالة تدريجياً مع ازدياد درجة حرارة الإرجاع لكل نوع من أنواع حديد الصب موضوع البحث.

*المراجع

11. Ali M Rashidi M Moshrefi-Torbati ، "Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure"، Materials Letters، Volume 45، Issues 3-4، September 2000، Pages 203-207.
12. Okorofor، O. E.، "Effect of Heat Treatment on the Fracture Behaviour and Tensile Properties of Ductile Iron"، Scandinavian Journal of Metallurgy، Vol.16، 1987، pp.4-8.
13. Cox، G. J.، "Iron with Special Mechanical Properties "، Foundry Trade Journal، Vol. 134، 1974، pp.117-126.
14. Yusuf Kayali، Sukru Taktak، Sinan Ulu، Yilmaz Yalcin ، "Investigation of mechanical properties of boro-tempered ductile iron" ، Materials & Design، Volume 31، Issue 4، April 2010، Pages 1799-1803.
15. Yusuf Kayali،Yılmaz Yalçin، "The effects of boro-tempering heat treatment on microstructural properties of ductile iron"، Materials & Design، Volume 32، Issue 3، March 2011، Pages 1414-1419.
16. Yusuf Sahin Volkan Kilicli ،Melika Ozer،Mehmet Erdogan ، "Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures"، Journal of Wear، Volume 268، Issues 1-2، 4 January 2010، Pages 153-165.
17. EI-Bitar، T.، and EI-Banna، E.،"Contribution of Forming Parameters on the Properties of Hot Rolled Ductile Cast Iron Alloys"،Material letters، 1997،pp.145-150.
1. Walton، C .F.، and Opar،T .J. "Iron Casting Handbook" ،Iron Casting Society، Inc.،1981.
2. ASM؛ Metals Handbook، "Metallography and Microstructures"، American Society for Metals، Metals Park، Ohio Vol.9، 1985.
3. ASM؛ Metals Handbook، "Properties and Selection: Iron، Steel، and High performance Alloys"، Vol.1، 9th Edition، American Society for Metals، Metals Park، Ohio 1990.
4. Angus، H. T.، "Cast Iron: Physical and Engineering Properties"، 2th Edition، Butterworths Inc.، 1978.
5. ASM؛ Metals Handbook، "Heat Treating"، American Society for Metals،Vol.4،1991.
6. Rajan، T.V.، Sharma، C.P.، and Sharma، A.،" Heat Treatment-Principles and Techniques"، Prentice Hall of India، New Delhi،1988.
7. Jain، P. L.، "Principles of Foundry Technology"، 2th Edition، Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited، 1986.
8. Smith، W. F.، "Principles of Materials Science and Engineering"، 3th Edition، McGraw-Hill ،Inc. ،1996.
9. Bahmani، M.، and Elliott، R.، "Isothermal Transformation Diagrams For alloyed Ductile Cast Iron"، Materials Science and Technology، Vol. 10، Dec. 1994،pp. 1050-1056.
10. Ibrahim، R.N.، "Hardening and Tempering of Graphitic Cast Iron"، M.Sc. Thesis، Cairo University، 1984.