


# The Effect Of Heat Treatment On The Microstructure, Impact Toughness And Hardness Of Hadfield Steels With Molybdenum And Chromium Additions

تأثير المعالجة الحرارية في البنية المجهرية ومتانة الصدم والقساوة لفولاذ هادفيلد المضاف إليه الموليبدنيوم والكروم

نسليم الضاهر : قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهك - جامعة تشرين.

علي هترة: قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهك - جامعة تشرين.

أحمد سلامة: قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهك - جامعة تشرين.

عنوان التواصل: [nassimaldaher111@gmail.com](mailto:nassimaldaher111@gmail.com)

تاريخ التسليم: ١٣ نيسان ٢٠٢٤ - تاريخ القبول: ٨ حزيران ٢٠٢٤

## ABSTRACT

The crushing hammers and teeth of drill are very important industrial tools in industrial applications, and it is important that the material from which these hammers and teeth are made of is good to resist wear and shock. One of the most important materials is Hadfield high manganese steel, which contains a percentage of carbon that leads to the formation of carbides at the boundaries of the crystalline grains, and thus to rapid breakage as it is characterized by strain hardening. A solution must therefore be found, whether by heat treatment, or alloying elements. Chromium and molybdenum metals were added in two melts in different proportions and then the heat treatment was conducted for Hadfield class D steel with added molybdenum and chromium (a new class different from ASTM A128 classifications) according to two different heat treatment programs 1 and 2 (1 - heating to 1150°C with a holding time of 30 minutes, then rapid cooling in ice water (tempering). Then reheating to 600 degrees Celsius and keeping for 30 minutes, then cooling slowly in air (return), 2- Heating to 650 degrees Celsius and keeping for 90 minutes, then heating to 1150 degrees Celsius and keeping for 45 minutes and cooling with plain water, and comparing the mechanical properties, such as wear resistance, impact durability, and hardness after heat treatment 1, 2. The results showed images of the resulting microstructures and an increase in hardness and thus an increase in wear resistance. Impact toughness also increased as a result of the heat treatment after the addition of molybdenum and chromium, as the heat treatment led to a relative separation of carbides in the austenitic ground (incubator material). And the growth of granules due to the dissolution of chromium and molybdenum. After heat treatment, the roughness of the austenite grains increases with the decrease in the size of the carbides, and thus we obtain a reduction in the economic cost because the resulting steel becomes more resistant to difficult working conditions. Treatment 2 achieved the best values for hardness, wear resistance, and impact durability in the two melts. The gradual application of the Heat Treatment 2 program also led to a saving in the time and temperature of heating in the heat treatment (due to progressive heating and one-time cooling compared to treatment 1, which was as follows: heating, holding and cooling, and then reheating, holding and cooling) and thus a saving in the economic costs because we did not have to open the furnace door and take out the piece, in addition to the scientific aspect.

**Keywords:** Impact Toughness, Heat Treatment, Grinding, High Manganese Steel, Cracking.

## المخلص

تُعدُّ مطارق الكسارات وأسنان الحفارات أدوات صناعية مهمة جداً في التطبيقات الصناعية، ومن المهم أن تكون المعادن التي تُصنع منها هذه المطارق والأسنان مقاومة للاهتراء والصدم على نحو جيد، ومن أهم المعادن فولاذ هادفيلد العالي المنغنيز، الذي يحوي نسبة كربون تؤدي إلى تشكل كربيدات على حدود الحبيبات البلورية، ومن ثم الكسر السريع، كما أنه يتعرض للتصلد الانفعالي. لذلك لا بُدَّ من إيجاد حل سواء بالمعالجة الحرارية أم العناصر السبائكية. أُضيف معدنا الكروم والموليبدنيوم في صهرتين بنسب مختلفة، ثم أُجريت المعالجة الحرارية لفولاذ هادفيلد صنف D المضاف إليه موليبدنيوم وكروم (صنف جديد يختلف عن تصنيفات ASTM

(A128) وفق برنامجين مختلفين للمعالجة الحرارية ١، ٢ (١-التسخين للدرجة ١١٥٠ مئوية بفترة إبقاء ٣٠ دقيقة ثم التبريد السريع في الماء المثلج (تقسية) ثم إعادة التسخين للدرجة ٦٠٠ مئوية والإبقاء مدة ٣٠ دقيقة ثم التبريد ببطء في الهواء (إرجاع)، ٢-التسخين إلى الدرجة ٦٥٠ مئوية والإبقاء مدة ٩٠ دقيقة ثم التسخين إلى الدرجة ١١٥٠ مئوية والإبقاء مدة ٤٥ دقيقة والتبريد بالماء العادي) ومقارنة الخواص الميكانيكية كمقاومة الاهتراء وماتنة الصدم والقساوة بعد المعالجة الحرارية أو ٢. بيّنت النتائج صور البنى المجهرية الناتجة وزيادة في القساوة وبالتالي زيادة مقاومة الاهتراء، كما ازدادت ماتنة الصدم نتيجة للمعالجة الحرارية بعد إضافة الموليبيدينوم والكروم؛ إذ أدت المعالجة الحرارية إلى انفصال الكرييدات نسبياً في الأرضية (المادة الحاضنة) الأوستنيتية. وبعد المعالجة الحرارية تزداد خشونة حبيبات الأوستنيت مع تناقص حجم الكرييدات، ومن ثم نحصل على انخفاض في الكلفة الاقتصادية كون الفولاذ الناتج أصبح أكثر مقاومة لظروف العمل الصعبة. وقد حققت المعالجة ٢ أفضل قيم للقساوة ومقاومة الاهتراء وماتنة الصدم في الصهرتين، كما أدى تطبيق برنامج المعالجة الحرارية ٢ التدريجي إلى توفير في زمن ودرجة حرارة التسخين في المعالجة الحرارية (بسبب التسخين التدريجي والتبريد لمرّة واحدة مقارنة مع المعالجة ١ التي كانت على النحو الآتي: تسخين وإبقاء وتبريد، ثم إعادة تسخين وإبقاء وتبريد) ومن ثم توفير في التكلفة الاقتصادية كوننا لم نضطر إلى فتح باب الفرن وإخراج القطعة إضافة إلى الناحية العلمية.

**الكلمات المفتاحية:** ماتنة الصدم، معالجة حرارية، الطحن، فولاذ أوستنيتي، التفسير

## المقدمة

ازداد اهتمام الباحثين بالأدوات الصناعية المستخدمة في التطبيقات الشاقّة، إذ تتعرّض الأدوات في التطبيقات الشاقّة، ولا سيما الحفر والتكسير، لإجهادات عالية وصدم واهتراء، وهي ذات كلفة عالية؛ لذلك كان لا بدّ من زيادة زمن الخدمة بمختلف الطرق. تعد كلفة التوقف المتكرر عن العمل أو إجراء الصيانة لأدوات الحفر والتكسير باهظة، إضافة إلى الجهد وصعوبة توافر الوسائل اللازمة للتبديل والصيانة في مكان العمل. كما تعد الحفارات من أهم أنواع أدوات الحفر المستخدمة في الحفر والجرف ونقل الأنربة والصخور، وتستخدم للحفر في المناجم والمقالع، كما تستخدم مطارق الكسارات في إعادة تدوير هياكل السيارات وطحن الحجارة وتحويلها إلى حصى ورمال. وتأخذ أسنان الحفارات ومطارق الكسارات أشكالاً عدة حسب الوسط الذي تعملان فيه. من أهم السبائك المعدنية المستعملة في أسنان الحفارات ومطارق الكسارات فولاذ هادفيلد العالي المنغنيز، الذي يتميز بخواص مقاومة الصدم والقساوة الجيدة نسبياً مع بعض المساوئ. بالنسبة إلى (initial) فهو فولاذ هادفيلد الأولي قبل استخدامه في العمل وتعرضه لظروف الخدمة، أما (deformed) فهو فولاذ هادفيلد أثناء الخدمة فهو يتعرض إلى تشوهات وانخلاعات في بنيته تتسبب في زيادة القساوة؛ إذ ترتفع القساوة من (HV ٢١٠) HB ٢٠٠ إلى HB ٥٨٠ (٦١١ HV) ويسمى بفولاذ هادفيلد المشوه نتيجةً للتشوهات التي تحدث بسبب ظروف العمل، وطبعاً تؤدي زيادة القساوة إلى زيادة مقاومة الاهتراء بسبب العلاقة الطردية بين القساوة ومقاومة الاهتراء. يتميز الفولاذ الأوستنيتي عالي المنغنيز ASTM-A128 بعد التقسية ببنية أوستنيتية بسبب وجود الطور الأوستنيتي الثابت نظراً لنسبة المنغنيز العالية والكربون (١-٤،٤٪، ١٠-١٤٪ منغنيز) ما يبطئ التحول إلى (مارتسيت). يستعمل هذا النوع في ظروف الحمولات الديناميكية العالية، وفي مصانع الإسمنت لبطانة المطاحن وأدوات الدك وتكسير الفحم بسبب متانته ومرونته العاليتين، وتعرضه لمعدّل عالٍ في التصلد الانفعالي ما يسبب قساوة عالية. [١] إن الفولاذ حسب ASTM A128 D لا يحوي كروم ولا موليبيدينوم، إذ يسبب الكروم المضاف نقصان طاقة الصدم بسبب تشكل كرييدات بحجم كبير على حدود الحبيبات عند إضافته بنسب أكبر من ٩\*١٠-٢٪، وبالنسبة لمعدن الموليبيدينوم فهو يزيد المتانة ومقاومة التشققات ويشكل على حدود الحبيبات كربيد عقدي، ولذلك لا بد من إزالة تلك الكرييدات ومحاولة تشكيلها ضمن الأرضية الأوستنيتية وليس على حدود الحبيبات بالمعالجة الحرارية وفي طور الانتقال من الحالة السائلة إلى الصلبة عند التصلب. [٢][٣] تأتي أهمية البحث من أهمية هذا النوع من الفولاذ

في صناعة التعدين والبنية التحتية والمجالات المختلفة الصناعية والعسكرية، وضرورة تبديل أدوات الكسر والحفر بسبب قوة الصدم والاهتراء العالي خلال العمل، لذلك لا بدّ من زيادة العمر الفعلي للأدوات في التطبيقات الشاقّة بزيادة هذه الخواص الميكانيكية لفولاذ مطارق الكسارات وأسنان الحفر، ومن هنا تتضح أهمية البحث. إن هدف البحث هو تحديد المعالجة الحرارية الأفضل تحقيقاً للخواص من حيث قيم القساوة وماتنة الصدم لفولاذ هادفيلد المعدل والمضاف إليه الكروم والموليبيدينوم والمختلف عن تصنيفات ASTM A128، التي تُصنع منه مطارق الكسارات وأسنان الحفارات عن طريق المعالجة الحرارية وفق برنامجين مختلفين لهذه المعالجة. توجد دراسات كثيرة ذات صلة بموضوع البحث؛ إذ استنتج S. takaki، and Y. ono في ظروف العمل عند درجات حرارة منخفضة تعرّض فولاذ هادفيلد للتقصف مرتين، وذلك عند التبريد البطيء بعد المعالجة، وبسبب نقص الكربون تتشكل بنية اليونكتويد. [١] وأشارت نتيجة بحث S.A. Balogun إلى أن رفع درجة الحرارة فوق ١٥٠٠ مئوية تؤدي إلى تحسّن سيولة فولاذ هادفيلد، لكن مع مراعاة عدم التأثير في بطانة الفرن. ستفصل الكرييدات داخل البنية عند الصب في درجة حرارة بين ١٤٠٠ إلى ١٤٥٠ مئوية وتزداد مقاومة الاهتراء، لكن تتخفّض سيولة المعدن المصهور عند الصب في درجة حرارة منخفضة وتؤدي إلى تكاليف تشغيل عالية وعيوب في المسبوكات. [٢] بيّن A. Chojecki ارتباط تصلب فولاذ هادفيلد بحجم كبير بتشكّل الدندريت للأوستنيت. يسبب نمو الدندريت ضعفاً في تغذية المسبوكة، ويعرقل هذه التغذية، ويصعب من تدفق المصهور داخل الدندريت. حتى في حالة وجود الشروط المناسبة لتوجيه التبلور، يمكن أن تسبب المسامية والدندريت المتزايد كسر العينة. وفي نهاية التبلور تظهر الهشاشة. [٣] كما بيّن Young so عند سفع العينات بالكرات تحسّن مقاومة الاهتراء لفولاذ هادفيلد مع زيادة زمن السفع عن طريق التصلد الانفعالي والطبقة البلورية النانوية السطحية. [٤] وشرح Youn-Soo تحسّن مقاومة الاهتراء لفولاذ هادفيلد عند التسخين للدرجة ١٠٧٥ مئوية والإبقاء مدة ٢٢ ساعة ثم التبريد في الماء. وبيّن أن الكرييدات المترسبة تظهر على عمق ٤٧ mm من السطح، ويُعدّ معدل التبريد عند هذا العمق حرجاً لترسيب الكرييدات. [٥] بيّن S. Aribó أن تسخين فولاذ هادفيلد للدرجة ١٠٥٠ مئوية وإبقائها مدة ٧٥ دقيقة ثم التبريد بالماء وإبقائها في الدرجة ٧٢٠ مدة ١٥٠ دقيقة أدى إلى انفصال الكرييدات بشكل ناعم ورفيع ما أدى إلى زيادة القساوة. [٦] وقام S. Hosseini في محلول التقسية لفولاذ هادفيلد بزيادة محتوى الملح ما زاد معدل التبريد،

**المجهر الضوئي:**

١. إجراء عملية التنعيم (Grinding) باستخدام ورق تنعيم من كربيد السيليكون بدرجات نعومة مختلفة (١٠٠٠، ٣٢٠، ١٢٠) حبيبة /سم<sup>٢</sup>.
٢. إجراء عملية الصقل (Polishing) باستخدام محلول الألومينا وبحجم (٠,٣).
٣. إجراء عملية الاظهار (Etching) باستخدام محلول النيتال وبتركيز (٢٪).
٤. استخدام المجهر الضوئي نوع (WIDMPS ٥١) لمعرفة التركيب المجهرى للعينات.

**الاختبارات الميكانيكية:****إختبار القساوة:**

أجري اختبار القساوة حسب فيكرز؛ بوضع العينة على سندان، ورفعها تدريجياً حتى تصبح على تماس مباشر مع نقطة أداة التثليم، واستعمال هرم مربع ماسي وتطبيق حمل قدره ٣٠ kg على أداة التثليم تدريجياً ثم إزالته. يبين الجدولان (٣) و(٤) نتائج اختبار القساوة مع المعالجات الحرارية،

الجدول (٣) قيم اختبار القساوة لفولاذ هادفيلد مع كروم ١,٥٪ وموليبيديوم ٠,٩٪		
الحالة	القيم	المتوسط الحسابي
معالجة ١	652-648-650 HV	650 HV
معالجة ٢	656-660-657 HV	HV٦٥٨

الجدول (٤) قيم اختبار القساوة لفولاذ هادفيلد مع مولبيديوم ٢,١٪ وكروم ٢,٥٪		
الحالة	القيم	المتوسط الحسابي
معالجة ١	671-670-669 HV	670 HV
معالجة ٢	693-692-694 HV	693 HV

**اختبار الاهتراء**

هو اختبار القرص المطاطي-الرمل، عن طريق وضع عينة ذات أبعاد (25 x 76 mm<sup>2</sup>) وذات سماكة ٣,٢-١٢,٧ mm أمام تيار من الرمل بحيث تضغط العينة بقوة ١٣٠N على القرص المطاطي الذي يدور بسرعة ٢٠٠٠ rpm ومن فرق وزني العينة قبل وبعد الاختبار يُحدّد معدل الاهتراء. إذ إنّ طريقة الاختبار هذه تقوم بتحديد المقاومة المعدنية للاهتراء عن طريق الحك الناتج عن احتكاك حبيبات الرمل مع سطح المادة، ومن ثم فإن الهدف من طريقة الاختبار هو وضع البيانات التي سترتب على أساسها المواد حسب مقاومتها للاهتراء ضمن ظروف محددة. تعتمد تقارير نتائج اختبار الاهتراء على الخسارة في الحجم من أجل اختبار معين، والمواد ذات مقاومة الاهتراء المرتفعة تكون خسارتها في الحجم أقل. من أجل توحيد نتائج الاختبارات، فإن طريقة الاختبار هذه تتطلب أن يتم تحديد مقدار الخسارة في الحجم الناتجة عن الاهتراء وفق نظام القياس المتري (mm<sup>٣</sup>).

**إختبار الصدم**

أجري بثلّم له شكل حرف V تشكيل عينات الصدم حسب اختبار شاربي.

ويبين الشكل مقارنة القيم بحيث:

- ١- العينات وفق المعالجة ١ بنسبة كروم ١,٥٪ وموليبيديوم ٠,٩٪.
- ٢- العينات وفق المعالجة ٢ بنسبة كروم ١,٥٪ وموليبيديوم ٠,٩٪.
- ٣- العينات وفق المعالجة ١ بنسبة كروم ٢,٥٪ وموليبيديوم ٢,١٪.
- ٤- العينات وفق المعالجة ٢ بنسبة كروم ٢,٥٪ وموليبيديوم ٢,١٪.
- ٥- عينات الدراسة [١١].

وقد تشكل الكرييدات في حدود الحبيبات، وأخيراً زيادة طاقة الصدم والمتانة. [٧] كما استعمل Yuzi Zhang الضغط كبارامتر أساسي للتحكم بعملية التبلور (التصلب) لفولاذ هادفيلد، وحصل على بنية مجهرية عند الصب تحت ضغط 6 Gpa ببيبات أنعم بنحو ٢١ مرة. [٨] وقام Li Shifeng بمقارنة نتائج الفحص المجهرى وخواص هادفيلد عند صب المصهور في قوالب معدنية وبطريقة النموذج المتبخر، وتبين له أن مقاومة الاهتراء تحسنت بنحو ١,٦ مرة من طريقة الصب في القوالب الرملية؛ إذ نقصت المتضمنات والكرييدات، مع تحسين شكلها والحصول على أرضية معززة وبحجم حبيبات ناعم، وتحسنت القساوة الأولية. [٩] بين Olawale أنّ فشل فولاذ هادفيلد يحدث كنتيجة للتقسية الجزئية خلال التصنيع، التي تؤدي إلى تشكل الكرييدات المترسبة، ما يسبب الهشاشة في أسنان الكسارات، وتقليل قابلية امتصاص وتحمل الصدمات، ونشوء تدفق لدن غير ثابت أثناء التصلد الانفعالي. [١٠] واستنتج Hatra, Salamah, Aldaher أن القيام بالتبريد السريع لفولاذ هادفيلد، صنف D ASTM A128 يحوي نسبة من النيكل بالماء بعد الصب والقيام بالمعالجة الحرارية واستخدام الماء كوسط تبريد، قد حسن مقاومة الاهتراء ومتانة الصدم أكثر من حالة التبريد في الهواء والرمل. [١١]

**المواد والطرائق**

باستعمال جهاز التحليل الطيفي Foundry-Master ٠١M٠٠٢٦ وOptik ٠١M٠٠٢٦ وآلة اختبار الاهتراء لاختبار العينات وفق المواصفة ASTM G٦٥-٩٤ (سيتم شرحه في فقرة اختبار الاهتراء). إضافة إلى جهاز اختبار الصدم (شاربي) وفق المواصفة ASTM E٢٣ (عينة ذات أبعاد محددة بثلّم له شكل حرف V) وآلة اختبار القساوة (فيكرز) Gnehm HartepUfer لاختبار العينات. كما أجريت المعالجة في فرن المعالجة الحرارية Linn Electro Therm، وجرى استعمال المجهر الضوئي لفحص البنية المجهرية في مخبر علم المواد في جامعة البعث. جُبلت عينات فولاذ هادفيلد صنف D أبعادها ٣٠٠\*٨٢\*٤٤ mm مع إضافة مولبيديوم وكروم، وجرى تشكيل صنف جديد. ويبين الجدول (١) نتائج التحليل الطيفي بواسطة جهاز التحليل الطيفي، من الملاحظ في الصهرة الأولى أن نسبة الكروم ١,٥٪ والموليبيديوم ٠,٩٪، وفي الصهرة الثانية الكروم ٢,٥٪ والموليبيديوم ٢,١٪. إجراء المعالجة الحرارية: نأخذ ٦ عينات بعد الصب والتبريد السريع في الماء (٢ عينة للصدم و٢ عينة للاهتراء والقساوة و٢ عينة بنية مجهرية) ونجري عليها المعالجة الحرارية ١. ونأخذ ٦ عينات أخرى بعد الصب والتبريد السريع في الماء (٢ عينة للصدم و٢ عينة للاهتراء والقساوة و٢ عينة بنية مجهرية) ونجري عليها المعالجة الحرارية ٢. إن الهدف من اتباع التقسية بالإرجاع في المعالجة ١ هو رفع مقاومة المادة للصدم، والتخلص من معظم الإجهادات الداخلية الناتجة من التحولات الطورية والإجهادات الحرارية الداخلية الناتجة من تأثير اختلاف سرعة التبريد على السطح عن سرعته في قلب العينة والإجهادات الداخلية الناتجة عن بقاء كمية من الأوستنيت المتخلف الغير مستقر. الجدول (١) التحليل الطيفي للعينات المصنعة من فولاذ هادفيلد صنف D المضاف لها معدني الكروم ١,٥٪ والموليبيوم ٠,٩٪.

ASTM A128	(wt.%)						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P
A	1.05-1.35	Min 11	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
B-1	0.9-1.05	11.5-14.0	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
B-2	1.05-1.2	11.5-14.0	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
B-3	1.12-1.28	11.5-14.0	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
B-4	1.2-1.35	11.5-14.0	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
C	1.05-1.35	11.5-14.0	1.5-2.5	-	-	Max 1.0	Max 0.07
D	0.7-1.3	11.5-14.0	-	-	3.0-4.0	Max 1.0	Max 0.07
E-1	0.7-1.3	11.5-14.0	-	0.9-1.2	-	Max 1.0	Max 0.07
E-2	1.05-1.45	11.5-14.0	-	1.8-2.1	-	Max 1.0	Max 0.07
FQ91340)	1.05-1.35	6.0-8.0	-	0.9-1.2	-	Max 1.0	Max 0.07

داخل الحبيبات وتزداد القساوة. كما حققت المعالجة ٢ أفضل قيم للقساوة ومقاومة الاهتراء ومتانة الصدم إضافة إلى البنية المجهرية في الصهرتين وكانت نتائج الصهرة الثانية هي الأفضل. وقد زادت نقاوة البنية المجهرية بإضافة الكروم والموليبدينوم بالنسب ١,٥، ٢,٥% للكروم و ٠,٩، ٢,١% للموليبدينوم كما يبين الشكلان (٧) و(١٠)، أما عند إجراء المعالجات الحرارية ١ و ٢، فقد قلت الكريبيدات على حدود الحبيبات كما تبين الأشكال (٨)، (٩)، (١١)، (١٢). إضافة إلى أن تطبيق برنامج المعالجة الحرارية ٢ التدريجي أدى إلى توفير في زمن ودرجة حرارة التسخين في المعالجة الحرارية، ومن ثم توفير في التكلفة الاقتصادية كوننا لم نضطر إلى فتح باب الفرن وإخراج القطعة.

تبيّن الأشكال التالية البنية المجهرية للعينات قبل وبعد المعالجة الحرارية بنسبة تكبير ٤٠٠ ثم شرح هذه البنى:

#### النتائج

من الملاحظ ازدياد المقاومة الصدمية والقساوة (مقاومة الاهتراء) عند إضافة الكروم ١,٥% والموليبدينوم ٠,٩% كما يبين الجدولان (٣) و(٤)، وإضافة الكروم والموليبدينوم والتبريد السريع بالماء بعد الصب من دون القيام بالمعالجة الحرارية كما يبين الشكلان (٧) و(١٠) قد قلل من حجم ونسبة الكريبيدات على حدود الحبيبات وضمن الأرضية الأوستنيتية إذا ما قارنا مع الصور المجهرية في الدراسة المرجعية [١١]. وتزيد نسبة إضافة الكروم والموليبدينوم من تشكل الكريبيدات



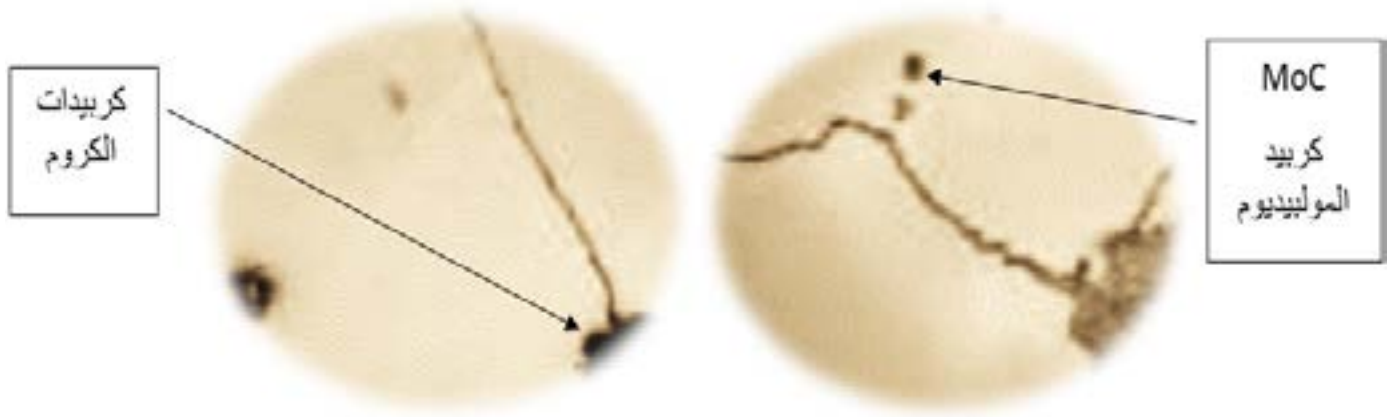
الشكل (٧) البنية المجهرية الناتجة لعينة فولاذ هادفيلد صنف D مع 1.5% Cr-0.9% Mo والتبريد السريع في الماء بعد الصب بنسبة تكبير ٤٠٠ بعد معالجة حرارية حيث نلاحظ تركّز الكريبيدات على حدود الحبيبات مما يؤثر سلباً على الخواص الميكانيكية وهي صفائح مستمرة متتالية بالنسبة لكربيدات الكروم وتكتلات مفردة بالنسبة لكريد الموليبدينوم



الشكل (٨) البنية المجهرية الناتجة لعينة فولاذ هادفيلد صنف D مع 1.5% Cr-0.9% Mo والتبريد السريع بالماء بعد الصب بنسبة تكبير ٤٠٠ بعد المعالجة الحرارية ١ حيث نلاحظ قلة عدد الكريبيدات ونسبتها على حدود الحبيبات وتوزع أغلبها ضمن الأرضية وهي صفائح مستمرة متتالية بالنسبة لكربيدات الكروم وتكتلات مفردة بالنسبة لكريد الموليبدينوم



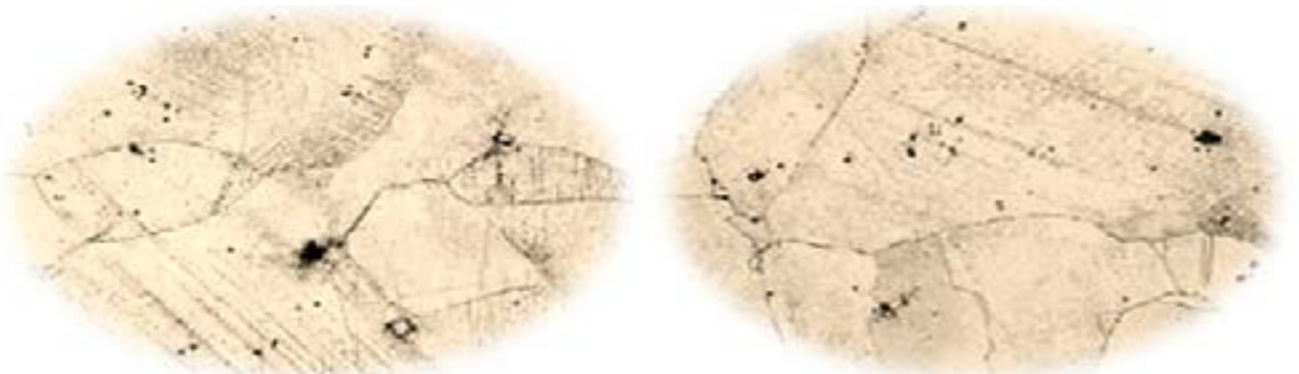
الشكل (٩) البنية المجهرية الناتجة لعينة فولاذ هادفيلد صنف D مع 1.5% Cr-0.9% Mo والتبريد السريع بالماء بعد الصب بنسبة تكبير ٤٠٠ بعد المعالجة الحرارية ٢ حيث نلاحظ أن كمية وحجم الكريبيدات قد قلّ بشكل ملحوظ خاصة عند حدود الحبيبات وهي صفائح مستمرة متتالية بالنسبة لكربيدات الكروم وتكتلات مفردة بالنسبة لكريد الموليبدينوم



الشكل (١٠) البنية المجهرية الناتجة لعينة فولاذ هادفيلد صنف D مع 2.1% Cr-2.1% Mo والتبريد بالماء العادي بعد الصب بنسبة تكبير ٤٠٠ دون معالجة حرارية حيث نلاحظ تركيز الكربيدات على حدود الحبيبات مما يؤثر سلباً على الخواص الميكانيكية وهي صفائح مستمرة متتالية بالنسبة لكربيدات الكروم وتكتلات مفردة بالنسبة لكربيد الموليبيدوم



الشكل (١١) البنية المجهرية الناتجة لعينة فولاذ هادفيلد صنف D مع 2.5% Cr-2.1% Mo والتبريد بالماء العادي بعد الصب بنسبة تكبير ٤٠٠ بعد المعالجة الحرارية ١ وهي صفائح مستمرة متتالية بالنسبة لكربيدات الكروم وتكتلات مفردة بالنسبة لكربيد الموليبيدوم حيث نلاحظ قلة عدد الكربيدات ونسبتها على حدود الحبيبات وتوزع أغلبها ضمن الأرضية



الشكل (١٢) البنية المجهرية الناتجة لعينة فولاذ هادفيلد صنف D مع 2.5% Cr-2.1% Mo والتبريد بالماء العادي بعد الصب بنسبة تكبير ٤٠٠ بعد المعالجة الحرارية ٢ حيث نلاحظ أن كمية وحجم الكربيدات قد قُن بشكل ملحوظ خاصة عند حدود الحبيبات

ويرفع درجة الحرارة فوق ١٥٠٠ مئوية إذ تحسنت سيولة فولاذ هادفيلد لكن مع مراعاة عدم التأثير في بطانة الفرن، بسبب التصلد الانفعالي زيادة القساوة لكن يؤثر في متانة الصدم ولذلك أضفنا Mo، Cr وطبقنا المعالجات الحرارية؛ إذ إن الإضافات السبائكية قد أثرت في عملية التبلور، وقللت البنية الغصنية الدندريته، وحسنت المعالجات

المناقشة مقارنة بالدراسات المرجعية قد حصلنا على بنية الاوستنيت مع كربيدات، وتعرض فولاذ هادفيلد للنقص مرتين، وذلك عند التبريد البطيء بعد المعالجة ونقص كمية الكربون، وقد قمنا بالتبريد السريع بعد الصب لتجنب النقص، وتشكلت الكربيدات القاسية بعد الصب

## الاستنتاجات

من الملاحظ أن إجراء المعالجة الحرارية زاد من المتانة الصدمية والقساوة (مقاومة الاهتراء) ولا سيما عند إضافة الكروم ١,٥٪ والمولبيدينيوم ٠,٩٪، فإجراء المعالجة الحرارية يؤدي إلى تحلل الكربون وتوزع الكرييدات بشكل منسق ومنظم ضمن المادة الحاضنة الأوستينية ويمنع تشكلها على حدود الحبيبات، كما يزيد من سرعة التجمد. وإجراء المعالجة ٢ قل حجم الكرييدات وتحسنت البنية المجهرية (قل حجم الكرييدات على حدود الحبيبات وتوزعت ضمن الأرضية الأوستينية) بإضافة الكروم والمولبيدينيوم بالنسب ١,٥، ٢,٥٪ للكروم و٠,٩، ٢,١٪ للمولبيدينيوم. كما أن وجود الكرييدات على حدود الحبيبات، والناجمة عن صب الفولاذ المشكل، يؤدي إلى زيادة الهشاشة وقابلية الكسر نظراً لترسب الكربون بسبب سرعة التبريد المرتفعة ولذلك تهدف المعالجة الحرارية لإذابة هذه الكرييدات وتعيم البنية المجهرية وبالتالي صلاحية فولاذ هادفيلد للعمل.

## التوصيات

نصح بإجراء المعالجات الحرارية بعد إضافة الكروم والمولبيدينيوم لتحسين الخواص الميكانيكية، وهي متانة الصدم ومقاومة الاهتراء، إذ ازادت المتانة الصدمية وانخفض معدل الاهتراء. كما نوصي بتغيير بارامترات ومتغيرات المعالجة الحرارية ومقارنة النتائج، إضافة إلى اختيار معادن أخرى نضيفها إن أمكن ودراسة الخواص الميكانيكية والبنى المجهرية الناتجة. ومن أهم التوصيات تغيير شكل مطرقة الكسر أو سن الحفر بما يحقق خواصاً وعمراً أفضل، إضافة إلى استخدام برامج المحاكاة لمعرفة أماكن تركيز الإجهادات.

## المراجع

1. S. takaki, and Y. ono. Mechanism of Embrittlement in hadfield steel, 115 (4) 2000: 1-3.
2. S.A. Balogun, D.E. Esezobor, J.O. Agunsoye. Effect of Melting Temperature on the Wear Characteristics of Austenitic Manganese Steel. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 07(03) 2008: 277-289.
3. A. Chojecki I. Telejko. Cracks in High-manganese cast steel. ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING Volume 9, Issue 4/2009: 17-22.
4. Young so. Effect of surface work hardening on wear behavior of hatfield steel. Materials Science and Engineering 2007:A 460:542-549.
5. Youn-Soo Ham,†Jeong-Tae KimSi-Young KwakJeong-Kil. Critical cooling rate on carbide precipitation during quenching of austenitic manganese steel. China Foundry 7 (2) 2010: 178-182.
6. S. Aribó, K.K. Alaneme, D.O. Folorunso and F.O. Aramide. Effect of Precipitation Hardening on Hardness and Microstructure of Austenitic Manganese Steel. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 9 (2) 2010: 157-164.
7. S. Hosseini and M. Bagher Limooei. Optimization of Heat Treatment to Obtain Desired Mechanical Properties of High Carbon Hadfield Steels. World Applied Sciences Journal 15(10) 2011: 1-2.
8. Yuzi Zhang, Yanguo Li,Bo, Han, Lihe Qian. Microstructural characteristics of Hadfield steel solidified under high pressure. High Pressure Research 31(4) 2011:634-639.
9. Li Shifeng: A new method for wear resistance ring hammers. China Foundry Volume 8, 2011: 407-412.
10. Olawale J. O.\*, Ibitoye S. A., Shittu M. D. Workhardening Behaviour of and Microstructural

الحرارية من الخواص الميكانيكية المطلوبة لأدوات الحفر والتكسير. إن قيم القساوة الناتجة أفضل من الدراسات السابقة التي وصلت بإجراء المعالجة الحرارية لفولاذ D ASTM A128 إلى قيمة ٦١٠ HV عند التبريد بالماء العادي بعد الصب (بالتسخين إلى ١١٥٠ مئوية بزمن إبقاء ٣٠ دقيقة ثم التبريد السريع بالماء العادي) كما يبين الجدولان (٣) و(٤). كما أنه من الملاحظ أن مقاومة الاهتراء نتيجة للمعالجة ١ أقل من مقاومته نتيجة للمعالجة ٢، ومن ثم فإن المعالجة ٢ هي الأفضل، وأفضل من قيم الدراسات وهي ٠,٠٠٩٥، بعد المعالجة الحرارية. قيم متانة الصدم في المعالجتين أفضل من الدراسات، التي وصلت بإجراء المعالجة الحرارية إلى متانة صدم ١٤٦ ل عند التبريد بالماء العادي بعد الصب (بالتسخين إلى ١١٥٠ مئوية بزمن إبقاء ٣٠ دقيقة ثم التبريد السريع بالماء العادي). من حيث البنى المجهرية، فإن إضافة الكروم والمولبيدينيوم والتبريد السريع بالماء بعد الصب من دون القيام بالمعالجة الحرارية كما يبين الشكلان (٧) و(١٠) قد قلل من حجم ونسبة الكرييدات على حدود الحبيبات وضمن الأرضية الأوستينية؛ إذ يتميز الكروم بشراسته للكربون، ما يسمح بتشكيل الكرييدات التي ستفصل بشكل كرييدات في المصهور وتشكل بنية حبيبية ناعمة مع تموضع للكرييدات داخل الحبيبات. ووجود هذه الجزيئات الصلبة يجعل الفولاذ أكثر قابلية للتقسية. كما أن المولبيدينيوم من العناصر المشكلة للكرييدات ومن السهل وضع MOC في المصهور، وخلال عملية التصلب (التبلور) تقوم جزيئات MOC ذات أعلى نقطة انصهار بدور تبلور متباينة تنقي البنية من الشوائب. تبيّن البنى المجهرية ترسب الكرييدات الصفائحية على حدود الحبيبات، وتزيد نسبة إضافة الكروم والمولبيدينيوم من تشكل هذه الكرييدات داخل الحبيبات وتزداد القساوة. وتتميز الكرييدات المشكلة بالقساوة العالية وتتوضع على حدود الحبيبة. يؤدي وجود البنية الخشنة ووجود الكرييدات على حدود الحبيبات إلى إضعاف الخواص الميكانيكية للفولاذ، وتعمل الجزيئات الناعمة المنفصلة كنوى تبلور للتحويل لتشوه البنية الأوستينية. ويعود سبب هذا التشوه إلى زيادة محتوى الكروم والمولبيدينيوم أو التشغيل على البارد. كما تبين الأشكال (٨)، (٩)، (١١)، (١٢). أدت المعالجة الحرارية إلى انفصال الكرييدات نسبياً في الأرضية (المادة الحاضنة) الأوستينية. ونمو الحبيبات بسبب انحلال معدن الكروم والمولبيدينيوم. وبعد المعالجة الحرارية تزداد خشونة حبيبات الأوستينيت مع تناقص حجم الكرييدات كما نلاحظ من المعالجة ١ و٢ وبالمقارنة بين حالتي المعالجة الحرارية نجد أن البنى المجهرية في الشكل (١٢) للمعالجة ٢ بنسبة كروم ٢,٥٪ ومولبيدينيوم ٢,١٪ هي الأفضل من حيث النقاوة وقلة حجم الكرييدات (كرييدات الكروم والمولبيدينيوم) ونسبتها بصورة واضحة مقارنة مع البنى في الأشكال الأخرى. وقد ازادت نقاوة البنية المجهرية بإضافة الكروم والمولبيدينيوم بالنسب ١,٥، ٢,٥٪ للكروم و٠,٩، ٢,١٪ للمولبيدينيوم كما يبين الشكلان (٧) و(١٠) حيث توزعت الكرييدات على حدود الحبيبات ما يؤثر سلباً في الخواص الميكانيكية، وهي صفائح مستمرة لكربيد الكروم وتكتلات كربيد المولبيدينيوم، أما بإجراء المعالجات الحرارية ١ و٢ توزعت أغلب الكرييدات ضمن الأرضية (المادة الحاضنة) وقلّت على حدود الحبيبات، وهي صفائح مستمرة متتالية بالنسبة لكربيدات الكروم وتكتلات مفردة بالنسبة لكربيد المولبيدينيوم كما تبين الأشكال (٨)، (٩)، (١١)، (١٢). وبالتالي يمكن تطبيق المعالجة ٢ على الفولاذ الناتج بعد إضافة الكروم والمولبيدينيوم لتحقيق أفضل عمر استثماري للسبيكة كون الخواص الميكانيكية كانت الأفضل، ويمكن الانطلاق من هذا التطبيق إلى أفق عمل واسع في إضافة العناصر السبائكية والتبريد السريع بعد الصب وتطبيق المعالجات الحرارية ما يتيح العمل لدراسات مستقبلية مهمة.

Analysis Failed Austenitic Manganese Steel Crusher Jaws. Materials Research 16 (6) 2013: 1274-1281.

11. Hatra A, Salamah A, Aldaher N. Improving mechanical properties (impact strength and wear resistance) of drilling teeth steel and breakers hammers. Tishreen University, vol. 43 No. 2 2021: 1-10.
12. Chache M, Harfoush. Study The Effect of Dilution on Hardness of Hardfacing Welding on The Hummers of Clinker Hammer Crucher in Tartous Cement Plant. Tishreen University, vol. 38 No. 3 2016: 1-10.

التمويل: لا يوجد

مساهمات المؤلفين: الاطار المفاهيمي : م. نسيم الزاهر - د. علي

هتره- د. احمد سلامة

المنهجية: نسيم الزاهر - د. علي هتره- د. احمد سلامة -

التحقيقات: نسيم الزاهر - د. علي هتره- د. احمد سلامة -

إدارة المشروع: د. علي هتره- د. احمد سلامة - الإشراف: د.

علي هتره- د. احمد سلامة - كتابة المسودة الاصلية: نسيم

الزاهر - كتابة مراجعة وتحرير: د. علي هتره - د. احمد سلامة.

تضارب المصالح: يعلن المؤلفون أنه ليس لديهم أي مصالح

متضاربة.

توافر البيانات والمواد: جميع البيانات متوفرة في النص الرئيسي.