دراسة تأثير المعالجة الحرارية ذات الارجاع المتكرر على خواص متانة التحطم للكرات الطاحنة المصنوعة من حديد الصب عالي الكروم

*م. محمد رامي الجندي د. عبّاد كاسوحة**

ملخص البحث

أجريت مجموعة من الاختبارات بهدف دراسة تأثير تكرار عملية الارجاع بعد التقسية على خواص متانة التحطم للكرات الطاحنة المصنوعة من حديد الصب عالي الكروم وفق محتوى % 15.23 كروم والتي كانت تعاني من سرعة التحطم والفشل في مطاحن الاسمنت الأسطوانية ذات الكرات ، تم تطبيق مجموعة من المعالجات الحرارية من اجل تحسين البنية المجهرية للكرات الطاحنة المدروسة بالاعتماد على التسخين الى درجة حرارة الطور الأوستنيتي C□ 1000 متبوعا بالسقاية بالزيت ثم القيام بعمليتي معالجة حرارية بإرجاعين متتاليتين عند درجات حرارة مختلفة C□ 500و C□ 550 و C° 600 بغرض تأكيد إزالة الاجهادات الناتجة عن السقاية وضمان ترسيب الكربيدات الثانوية في البنية الناتجة حيث وصل عدد الصدمات التي تتلقاها الكرة في اختبار السقوط الحر قبل الانهيار الى 12818 صدمة قبل الانهيار بعد أن كان بحدود 2100 صدمة من خلال المعالجة الحرارية 1000) C□ /2 H + 2 X 500 C□ / 1.5 H) والتي أنتجت انخفاضاً في القساوة الى 47.2 HRC وتحسناً في الطاقة الممتصة قبل الانهيار في اختبار صدم تشاربي من 1.844 Joules الى 7.26 Joules ، أظهرت تحليلات البنية المجهرية أن البنية الناتجة هي بنية مارتينسيتية مع نسبة من كربيدات الحديد والكروم بلغت % 11.9 بالإضافة الى نسبة من الاوستنيت المتبقي.

تعتبر عملية المعالجة الحرارية التي تتبع السقاية المتبوعة بتكرار عملية الارجاع والتي تؤدي الى تخفيض نسبة الكربيدات في البنية من اهم عوامل تحسين متانة تحطم الكرات الطاحنة المصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم مع أهمية تأمين القساوة اللازمة للحفاظ

على مقاومة الاهتراء، حيث يعد تأمين التوافق بين متانة التحطم ومقاومة الاهتراء هو التحدي الأبرز عند اجراء تعديلات في البنية المجهرية للكرات.

كلمات مفتاحية

الحديد الصب، التقسية، الارجاع، المارتينسيت، الكربيدات.

***طالب دكتوراه – هندسة التصميم والإنتاج – قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية -جامعة حمص – حمص – سوريا** rami.al.jundi92@gmail.com

**** أستاذ مساعد - قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية -جامعة حمص – حمص – سوريا.**

Experimental Study on the Effect of Repearting Tempering Heat Treatment process on The Fracture Toughness Properties of High Chromium Cast Iron Grinding Balls

Engineer: Mohamad Rami Al Jundi Dr. Abbad Kassouha*

ABSTRACT

Experimental tests were carried out to study the effect of repeating the tempering process after hardening heat treatment on the High Chromium Cast Iron Grinding Balls, with 15.23 % Cr content, that suffered from the rapid fracture and failure in the cement grinding balls mills, many heat treatment processes were applied for improving the microstructure of the studied balls by heating to the Austenite phase about 1000 C□ and oil quenching followed by double tempering process with a varied temperatures 500 C□ , 550 C□ and 600 C□, aimed to insure reliving the residual stresses after hardening and precipitation of carbides, the number of impacts in the drop balls test was improved from 2100 impacts to 12818 impacts, by the applied heat treatment of (1000 C□ /2 H + 2 X 500 C□ / 1.5 H) that also resulted decrease of the hardness till 47.2 HRC, and the absorbed energy of Charpy impact test was improved till 7.26 Joules, the analyzed microstructure was shown a martensitic microstructure with 11.9 % carbides and retained austinite.

The heat treatment process of hardening with double tempering processes was considered as a practical solution for improving the fracture toughness of the high chromium cast iron grinding balls with the full care of matching between the required wear resistance other properties especially when the microstructure is modified.

Key Words

Cast iron, hardening, tempering, martensite, carbides.

***PhD Student-Design and Production Engineering- Design and Production Engineering Department-Homs University-Homs-Syria.**

****Assistant professor- Design and Production Engineering Department-Homs University-Homs-Syria.**

1- المقدمة

تُستخدم سبائك الحديد الصب عالي الكروم على نطاق واسع في التطبيقات التي تتطلب مقاومة جيدة للاهتراء الناتج عن التآكل ومتانة صدمية مرتفعة، مثل معالجة المعادن، وتصنيع الأسمنت، يُعزى هذا السلوك المقاوم للتآكل بوضوح إلى البنية المجهرية الدقيقة والأطوار المشاركة فيها، سواءً في ظروف الصب As Cast أو بعد المعالجة الحرارية. تُعدّ البنية المجهرية الناتجة، والأطوار الثانوية، والأطوار الكربيدية الأولية مسؤولة عن مقاومة الاهتراء والتحطم الناتج عن التآكل والصدم المتكرر لهذه السبائك ويعتقد أن للأطوار المارتنسيتية تأثيرًا إيجابيًا على مقاومة التآكل، بينما تزيد البنى البيرليتية والفريتية عمومًا من فقدان الأجزاء من السبائك العاملة من خلال الاهتراء أو التشظي بينما تعطي البنى الأوستنيتية نتائج متناقضة بسبب تأثير التقسية المتزايد، والذي يؤثر بدوره على

سلوك مقاومة الاهتراء. يجب دراسة تأثير وجود الكربيد الثانوي إلى جانب عوامل أخرى، مثل ظروف التآكل، والبيئة، والوسائط المسببة للتآكل.

يتكون التركيب الأولي للسبائك المصبوبة أساسًا من بنية شجيرية أوستنيتية وخليط يوتكتيكي من الأوستينيت وكربيداتM7C3 . يمكن العمل على تحويل هذا الشكل الأولي بشكل كبير من خلال معالجات حرارية حرجة ودون حرجة مختلفة. يتمثل مجال المعالجات الحرارية عمومًا في ترسيب جسيمات الكربيد الثانوية مصحوبًا بنزع استقرار الأوستينيت المتزامنة مع تحوله إلى أطوار أخرى، والأهم أن يتحول الى طور المارتينسيت.

تُجرى المعالجات الحرارية الحرجة (نزع الاستقرار) عند درجة حرارة C 1060-920، لمدة H 6-1. عادةً ما تتبع المعالجات دون الحرجة معالجات نزع الاستقرار، حيث تُجرى عند درجة حرارة 200-600 درجة مئوية لمدة 2-6 ساعات. وقد بحثت العديد من الجهود البحثية في تأثير هذه المعالجات على سلوك الحديد الصب الأبيض عالي الكروم. (Karantzalis، 2008)

درس الباحثون ترسيب وتحويل الكربيدات الثانوية في الحديد الصب Cr-16% بعد التعرض لمعالجة حرارية لنزع الاستقرار. وخلصوا إلى ترسيب نوعين من جسيمات الكربيد الثانوية (Fe,Cr)23C6: أحدهما ذو شكل مكعب ذي اتجاه محدد بالنسبة للبنية، والآخر ذو شكل حبيبي بدون اتجاه محدد. ويرجح أن الأخير قد تشكل خلال مرحلة التبريد في عملية نزع الاستقرار. كما لوحظ أنه بعد فترات إبقاء طويلة، تحولت جسيمات (Fe,Cr)23C6 إلى كربيدات شجيرية من M7C3.

ركزت جهود بحثية متنوعة على تكوين ومورفولوجيا وخصائص الكربيدات الثانوية المتكونة أثناء المعالجات الحرارية. يعتمد تكوين الكربيدات الثانوية على عدد من العوامل، بما في ذلك التركيب الكيميائي، ودرجة حرارة ومدة المعالجة الحرارية، ومعدل التبريد بعد المعالجة الحرارية. كما يمكن أن يختلف مورفولوجيا وخصائص الكربيدات تبعًا لهذه العوامل، يمكن أن تختلف هياكل وأحجام وتوزيعات بلورية هذه الكربيدات

داخل البنية، ويمكن أن تؤثر على خصائص مثل الصلابة، ومقاومة التآكل، والمتانة. (Abdel-Aziz، 2017)

2- الهدف من البحث:

تحسين متانة التحطم والخواص المتعلقة بها من أجل زيادة العمر الفني للكرات الطاحنة من خلال دراسة تأثير المعالجات الحرارية على البنية المجهرية وخواص متانة التحطم للكرات الطاحنة المصنوعة محلياً من حديد الصب عالي الكروم عبر تطبيق المعالجة حرارية بالتقسية ثم تكرار عملية الارجاع عند درجات حرارة مختلفة.

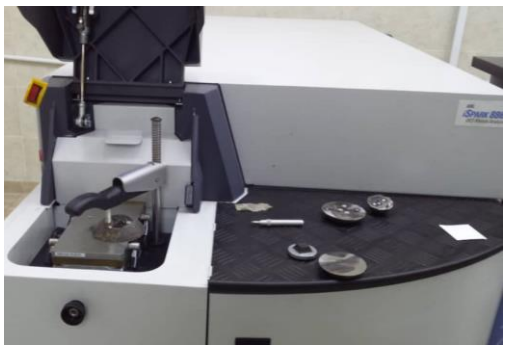
3- المواد والأدوات ومنهجية البحث:

3-1- المواد والأدوات:

1. كرات طاحنة محلية الصنع مصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم بمحتوى كروم 15.23 %.
2. جهاز اختبار السقوط الحر.
3. جهاز اختبار صدم تشاربي.
4. فرن معالجة حرارية.
5. حوض تبريد بالزيت.
6. جهاز تحضير العينات مع أوراق شحذ.
7. مواد التنميش (محلول النيتال 5%) والتلميع (مسحوق الألومينا).
8. جهاز التحليل الطيفي لتحديد التركيب الكيميائي.
9. جهاز اختبار قساوة روكويل.
10. مجهر ضوئي.
11. برنامج تحليل صوري.

الشكل 1 جهاز قساوة روكويل وجهاز اختبار السقوط الحر

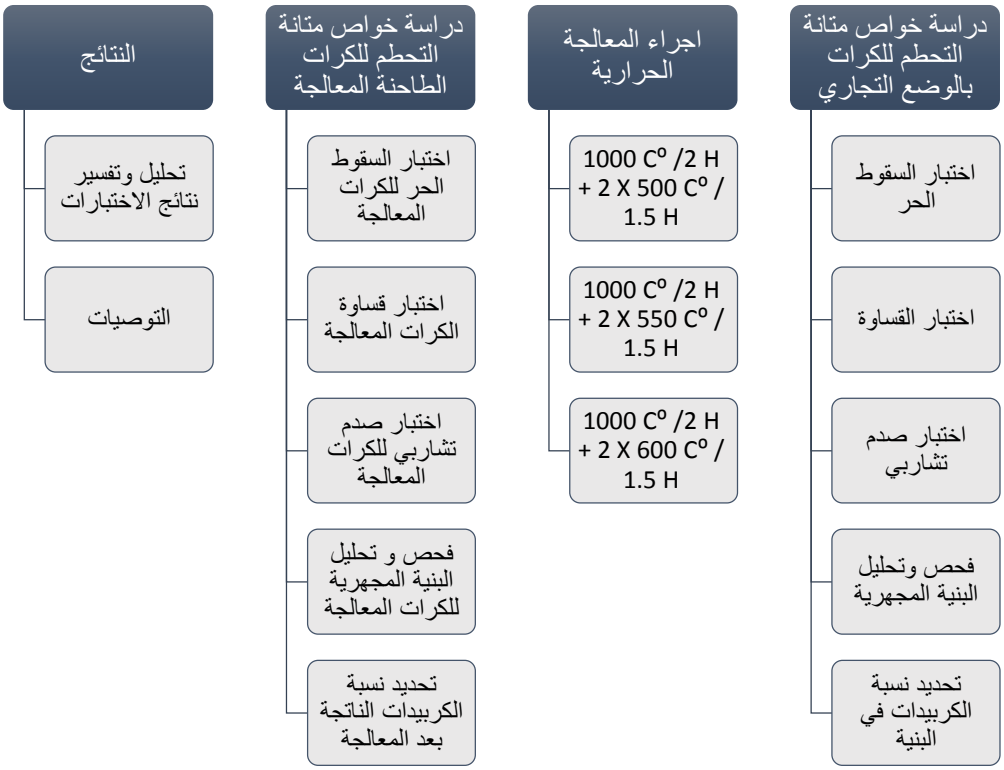
الشكل 2 - جهاز قص العينات بالسلك وجهاز صدم تشاربي وآلة شحذ وتحضير العينات



الشكل 3- فرن المعالجة الحرارية وجهاز التحليل الطيفي

2-3- منهجية البحث:

سيتم دراسة خواص الكرات الطاحنة محلية الصنع بوضعها التجاري ثم العمل على تحسين متانة التحطم لها من خلال اجراء المعالجات الحرارية بالسقاية بالزيت ثم تطبيق عمليتي ارجاع وبثلاث درجات حرارة ارجاع مختلفة وفق ما يلي في مخطط منهجية البحث:



المخطط 1- منهجية البحث وخطواته

4- النتائج ومناقشتها:

تم اجراء الاختبارات المذكورة في خطة البحث حيث أجري تحليل للتركيب الكيميائي للكرات الطاحنة المختبرة تلاه تحديد قيمة القساوة ثم أجري اختبار السقوط الحر من أجل تحديد عدد الصدمات التي تتلقاها الكرة قبل التحطم وبالتالي عمرها الفني بما يحاكي الصدمات التي تتعرض لها في مطاحن الاسمنت، كما أجري اختبار صدم تشاربي من أجل التأكد من نتائج المعالجة الحرارية وتأثيرها على خواص متانة التحطم للكرات الطاحنة المدروسة.

يبين الجدول التالي نتائج الاختبارات المطبقة قبل وبعد اجراء المعالجة الحرارية:

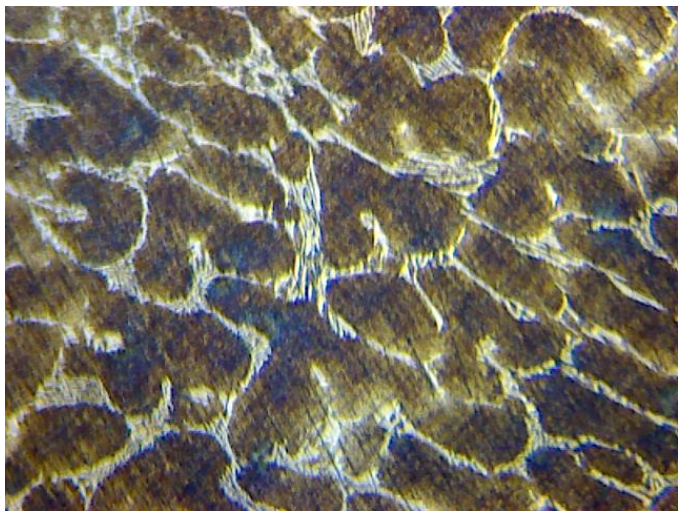
الاختبار	الوضع التجاري	1000 C□/2 H + 2 X 500C□ / 1.5 H	1000 C□/2 H + 2 X 550C□ / 1.5 H	1000 C□/2 H + 2 X 600C□ / 1.5 H
السقوط الحر (1)	1855	11900	4464	3400
السقوط الحر (2)	2100	13100	4700	2960
السقوط الحر (3)	1940	13454	4120	3110
المتوسط (صدمة)	1965	12818	4228	3157
القساوةHRC	54.4	47.2	45.8	44.3
صدم تشاربيJoule	1.844	7.26	4.8	4.06
نسبة الكربيدات%	18.8	11.9	10.8	8.9

الجدول 1- نتائج الاختبارات

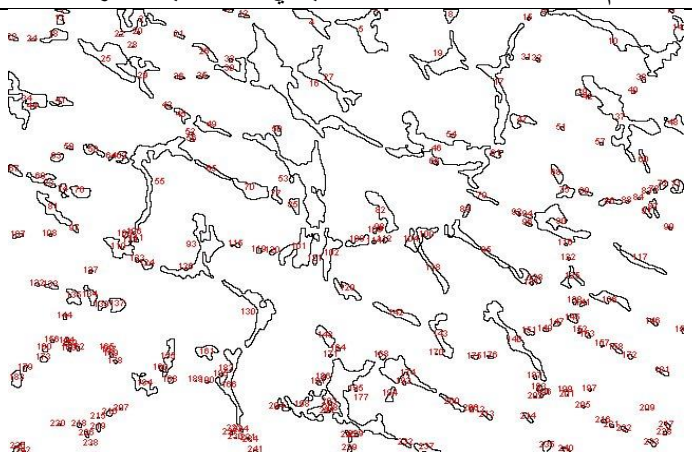
ملاحظة: تم اجراء كافة الاختبارات بثلاث كرات وأخذ المتوسط الحسابي كنتيجة للاختبار.

- **الكشف عن البنى المجهرية للكرات الطاحنة المختبرة:**

أجري تحليل لصورة البنية المجهرية الناتجة بعد تطبيق المعالجة الحرارية 1000 C□ / 1.5 H /2 H + 2 X 500 C□ حيث أظهرت الصورة المأخوذة بالمجهر الضوئي بنية مارتينسيتية مع شجيرات كربيدية بنسبة 11.9%وبوجود الأوستينيت المتبقي، كما تبين الصور المدرجة أدناه للبنية الناتجة وصورة تحليل البنية باستخدام برنامج التحليل الصوري Image J.

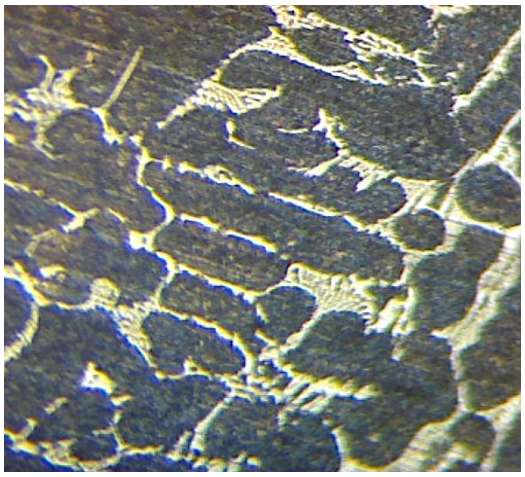


الشكل 4 صورة البنية المجهرية للعينة المعالجة وفق (1000 C□ /2 H + 2 X 500 C□ / 1.5 H) x800

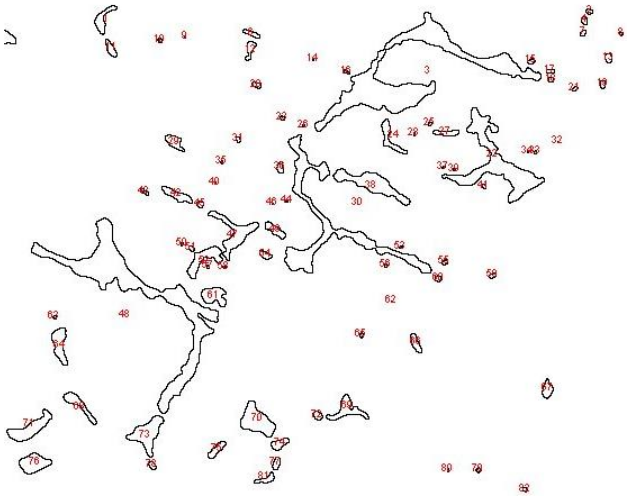


الشكل 5 صورة تحليل البنية المجهرية للعينة المعالجة وفق (2 X + 2 H / 1000 C□ 1.5 H / 500 C□) باستخدام برنامج Image J

بينما أظهرت البنية المجهرية الناتجة عن المعالجة الحرارية الثانية (2 X + 2 H / 1000 C□ 1.5 H / 550 C□) انخفاضا أكبر في نسبة الكربيدات وصل الى % 10.8 ضمن بنية مارتينسيتية وبوجود نسبة من الاوستنيت المتبقي كما تبين صورة المجهر الضوئي للبنية المجهرية المعالجة وتحليلها بواسطة برنامج Image J.

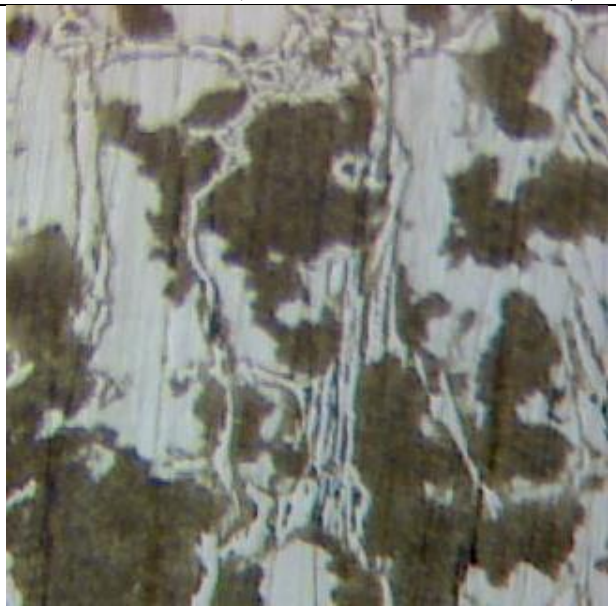


الشكل 6 صورة البنية المجهرية للعينة المعالجة وفق (2 X + 2 H / 1000 C□ 1.5 H / 550 C□ x800)

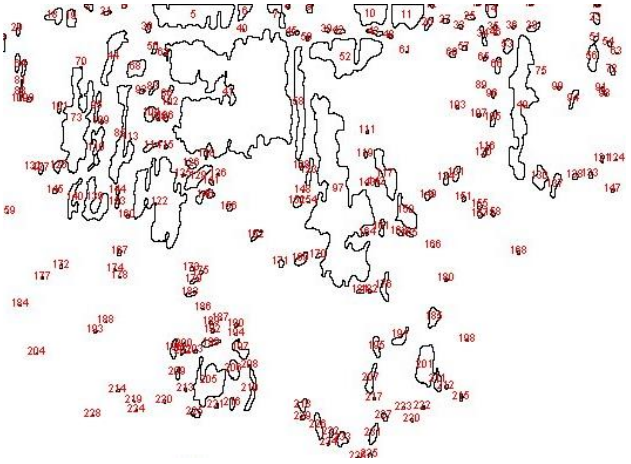


الشكل 7 صورة تحليل البنية المجهرية للعينة المعالجة وفق (1000 C□ /2 H + 2 X 550 C□ / 1.5 H) باستخدام برنامج Image J

كما لوحظ انخفاضا أخراً في نسبة الكربيدات في البنية المارتنسيتية الناتجة الى 8.9% مع وجود بعض الاوستنيت المتبقي من خلال تحليل صورة البنية المجهرية المأخوذة بالمجهر الضوئي للعينة المعالجة وفق **1000 Cº- 2 H– oil / 600Cº -1.5 H X2**، كما يظهر الشكلان أدناه:



الشكل 8 صورة البنية المجهرية للعينة المعالجة وفق (1000 C□ /2 H + 2 X 600 C□ / 1.5 H)



الشكل 9 صورة تحليل البنية المجهرية للعينة المعالجة وفق (1000 C□ /2 H + 2 X 600 C□ / 1.5 H) باستخدام برنامج Image J

5- الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرت الكرات الطاحنة المصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم تحسناً كبيراً في عدد الصدمات التي تتلقاها الكرة في اختبار السقوط الحر حيث ازداد عدد الصدمات حوالي ست أضعاف من 2100 صدمة الى 12818 صدمة بالتزامن مع ازدياد كمية الطقة الممتصة من العينات قبل الانهيار في صدم تشاربي من 1.844 Joule الى 7.26 Joule مع المحافظة على قيمة قساوة جيدة بحدود 47.2 HRC وبوجود نسبة كربيدات في البنية المارتنسيتية 11.9 % والتي تشير الى توزيع متجانس للكربيدات في البنية بالكامل ناتج عن تكرار عملية الارجاع بعد التقسية والسقاية بالزيت من الدرجة C 1000 متبوعة بإرجاعين عند الدرجة C 500.

بينما لم تظهر الكرات المعالجة عند عملية الارجاع بعد التقسية والسقاية بالزيت من الدرجة C 1000 متبوعة بإرجاعين عند الدرجة C 550 نفس التحسن الظاهر في العملية السابقة حيث بلغ عدد الصدمات التي تلقتها الكرة قبل الانهيار 4428 صدمة بالتزامن مع قيمة قساوة 45.2 HRC والتي أبدت انخفاضاً في قيمة لقساوة ما يؤدي الى انخفاض في القساوة مع تحسن بسيط في متانة التحطم حيث بلغت قيمة الطاقة الممتصة ن العينة قبل الانهيار في اختبار صدم تشاربي 4.8 Joule ووجد ان نسبة الكربيدات في البنية المارتنسيتية الناتجة كانت 10.8 %.

ثم تبين من خلال تحليل نتائج اختبارات الكرات المعالجة وفق عملية الارجاع بعد التقسية والسقاية بالزيت من الدرجة C 1000 متبوعة بإرجاعين عند الدرجة C 600 انخفاضا أكبر في عدد الصدمات التي الكرات قبل الانهيار الى 3157 صدمة ووصلت قيمة القساوة المقاسة بعد المعالجات الحرارية الى 44.3 HRC كما ترافقت هذه القيم مع انخفاض في قيمة الطاقة الممتصة في اختبار تشاربي الى 4.06 Joule بما لا يبدي تحسنا في أداء الكرة التي تهدف معالجاتها الى تأمين متانة التحطم والمقاومة الاهتراء المثلى.

وبالتالي يمكن الوصول الى الاستنتاجات التالية:

1- يؤدي تكرار عملية الارجاع بعد التقسية الى تحسين متانة التحطم للكرات الطاحنة المصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم من خلال تأمين إزالة الاجهادات الناتجة عن عملية التقسية وضمان توزيع متجانس للكربيدات المترسبة في البنية خلال عمليات المعالجة الحرارية.

2- يؤدي تخفيض نسبة الكربيدات في البنية المارتنسيتية الناتجة الى حدود 12 % الى تأمين متانة التحطم اللازمة دون المساس بمقاومة الاهتراء للكرات الطاحنة المصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم.

3- يمكن الاعتماد على نتائج اختبار صدم تشاربي كوسيلة مساعدة للحكم على نتائج المعالجات الحرارية المتبعة والحكم على نتائج اختبار السقوط الحر المطبق.

- **التوصيات:**

1- اجراء دراسة تأثير عمليات الارجاع عند مجالات حرارية أخرى لما لها من تأثير على البنى المجهرية الناتجة.

2- اجراء تجارب عملية على تطبيق معالجات حرارية متبوعة بعدد مرات متغير من الارجاع على سبائك الحديد الصب عالي الكروم.

3- اجراء دراسات تجريبية عن تأثير نسبة الاوستنيت المتبقي في البنية على متانة التحطم للكرات الطاحنة المصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم.

References

1. **Abdel-Aziz, Kh., El-Shennawy, M., & Omar, A.A**. 2017. *Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Heat Treated High-Cr White Cast Iron Alloys*, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 12, No. 14, pp.
2. **Karantzalis, A.E., Lekatou, A., & Mavros, H.** 2009. *Microstructural Modifications of As-Cast High-Chromium White Iron by Heat Treatment*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 18, No. 2, pp. 174–181
3. **MDPI.** 2023. *Development of High Chromium White Cast Irons (HCWCIs) for Wear–Corrosive Environments: A Critical Review*, Metals, Vol. 13, Issue 11, Article 1831.
4. **Springer.** 2020. *Wear Mechanism of High Chromium White Cast Iron and Its Microstructural Evolutions During the Comminution Process*, Tribology Letters, Vol. 68, Article 17.
5. **Ningguo Hexin.** 2023. *Heat Treatment Process for High Chromium Grinding Ball*.
6. **Blickensderfer, R., Tylczak, J. H., & Laird, G.** 1989. *Spalling of High-Chromium White Cast Iron Balls Subjected to Repetitive Impact*.
7. **Younes, R., Sadeddine, A., Bradai, M. A., Aissat, S., & Benabbas, A.** 2021. Investigation on the Influence of Tempering on Microstructure and Wear Properties of High Alloy Chromium Cast Iron, *Advances in Materials Science*, Vol. 21, 66-73.

8. **Moema, J. S., Papo, M. J., Slabbert, G. A., & Zimba, J.** 2009. Grinding Media Quality Assurance for the Comminution of Gold Ores, *World Gold Conference*, 27-31.
9. **Wiengmoon, A.** 2010. Carbides in High Chromium Cast Irons, Department *of Physics, Faculty of Science, Naresuan University*.
10. **Kootsookos, A., Gates, J. D., & Eaton, R. A.** 1995. "Development of a White Cast Iron of Fracture Toughness 40MPa·m^0.5." *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 7, 239-246.
11. **Blickensderfer, R., & Tylczak, J. H.** 1989. "Evaluation of Commercial US Grinding Balls by Laboratory Impact and Abrasion Tests." *Minerals & Metallurgical Processing*, Vol. 6, 60-65.
12. **Filipovic, M., Kamberovic, Z., Korac, M., & Gavrilovski, M.** 2013. Correlation of Microstructure with the Wear Resistance and Fracture Toughness of White Cast Iron Alloys. *Metals and Materials International*, Vol. 19, 473-481.
13. **Gates, J. D., Bennet, P. J., McInnes, L. J., & Tunstall, B. R.** 2015. The Challenge of Accurate Prediction of Industrial Wear Performance from Laboratory Tests. *UQ Materials Performance*, The University of Queensland