دراسة مقارنة خواص متانة التحطم لكرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من حديد صب عالي الكروم

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

ملخص البحث:

اجريت دراسة مخبرية على كرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم بمحتوى كروم حوالي % 16 وذلك بهدف مقارنة الخواص المتعلقة بمتانة التحطم من خلال اجراء عدد من الاختبارات على الكرات المحلية والمستوردة، وجد من خلال تحليل ومقارنة النتائج تفوق الكرات المستوردةش على الكرات المحلية خصوصا في العمر الفني للكرات التي عملت لحوالي 14000 صدمة في اختبار السقوط الحر مقابل حوالي 2100 صدمة ما يفسر متانة التحطم المرتفعة المقترنة مع مقاومة الاهتراء الناتجة عن القساوة الناتجة المرتفعة HRC 62.7 مقابل HRC 54.4 للكرات المحلية كما عززت نتائج اختبار الصدم تفسير متانة التحطم المرتفعة للكرات الطاحنة المستوردة التي نتجت Joule 4 مقابل Joule 2 للكرات المحلية، كما وجد من خلال تحليل صور البنية المجهرية للكرات أن نسبة الكربيدات المرتفعة في بنية الكرات الطاحنة المحلية % 18.23تسبب زيادة في هشاشة الكرة وانخفاض في متانة التحطم إضافة الى دور عيوب السكب في تركيز الاجهادات الناتجة عن الصدمات المتكررة وعدم تجانس انتشار الشقوق التعبية بينما وجد أن نسبة الكربيدات في بنية الكرات المستوردة 14.9% حققت التوازن المطلوب بين متانة التحطم ومقاومة الاهتراء.

تعتبر المعالجة الحرارية وتحسين تقنيات عملية السكب المؤدي الى تقليل عيوب السكب من اهم العوامل اللازمة لتحسين متانة الحطم للكرات الطاحنة المحلية المصنوعة من حديد الصب عالي الكروم.

كلمات مفتاحية:

كرات طاحنة، متانة، تحطم، قساوة، بنية مجهرية.

***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.**

Comparison Study for the Fracture Toughness Characteristics of Local and Imported High Chromium Cast Iron Grinding Balls]

Engineer: Mohamad Rami Al Jundi Dr. Abbad Kassouha*

Abstract:

An experimental study was made to study the fracture toughness characteristics of local and imported high chromium white cast iron grinding balls with 16% Cr content, the analysis of the results were shown that the imported balls have better results as they work for 14000 impacts in the free fall test where the local ones worked for 2100 impacts, this was indicated a good fracture toughness and was matched with a good wear resistance was insured by hardness test results that

came 62.7 HRC for the imported and 54.4 HRC for the local, the Charpy impact test was resulted as 4 joules for the imported and corresponded 2 joules for the local the high percentage of the carbides content in the local balls 18.23% was caused a higher brittleness and reduced the fracture toughness , in addition to the rule of the casting defects that concentrate the repeated impact stresses, where the 14.9% carbides percentage in the imported balls was a reason for the balance between the fracture toughness and the wear resistance.

Heat treatment processes and better casting techniques can lead for improving the high chromium grinding balls fracture toughness.

Key Words:

Fracture, Toughness, Grinding, Impact, Hardness.

***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- المقدمـة:

تشكل الكرات الطاحنة الجزء الأكبر من تكاليف عملية طحن الاسمنت التي تنقسم بشكل رئيسي الى تكاليف الطاقة الكهربائية وبطانة المطحنة والكرات الطاحنة التي تشغل ما يقارب 45 % من اجمالي التكاليف وتركز الدراسات والأبحاث بشكل كبير على تحسين خصائصها التكنولوجية والاستثمارية من أجل جعلها أكثر استدامة وربحية لكونها من أكثر المطالب

الاستثمارية في الأسواق والتطبيقات الفنية في صناعة الاسمنت حيث تلعب الكرات الطاحنة دورا رئيسيا في تحقيق الاستقرار الفني والربحي لعملية طحن الاسمنت من خلال توفيرها الجودة والوفر الزمني والمالي معاً. (Moema، 2009)

تعتبر مشكلة تحطم الكرات الطاحنة أبرز المشاكل التي تواجه مطاحن الاسمنت والتي تؤدي الى توقفها بشكل متكرر خارج فترات الصيانة والاستبدال الدورية، تستعمل العديد من أنواع الكرات الطاحنة والتي تختلف من حيث التركيب الكيميائي الى كرات فولاذية وكرات حديدية من الحديد الصب وبسبائك مختلفة.

يتم اختيار الكرات الطاحنة وفق المواد المراد طحنها بحيث تحقق شروط مقاومة الاهتراء والتآكل مع التأكيد على تأمين متانة التحطم المثلى لضمان العمر الاستثماري الأمثل للكرات.

تتعدد أنواع الكرات الفولاذية الى كرات من فولاذ مطروق أو فولاذ مصبوب مع عناصر سبائكية مثل الكروم أو المنغنيز أو الكرات الطاحنة المصنوعة من حديد الصب عالي الكربون أو الحديد الصب مع العناصر السبائكية مثل الكروم والنيكل والمولبيديوم، تتغير الخصائص التكنولوجية للكرات الطاحنة بتغير نسب العناصر السبائكية.

يتم اختبار الكرات الطاحنة وفق عدة اختبارات لقياس القساوة مثل اختبار Rockwell و Brinell ومقاومة الاهتراء والتآكل مثل اختبار Pin On Drum ومتانة الصدم والتحطم مثل Ball On Ball Test و Ball on Block Test لتحديد مدى وملائمتها للتطبيقات الهندسية المطلوبة وتبعا للموا المراد طحنها.

تعتبر الكرات الطاحنة المصنوعة من حديد الصب عالي الكروم أكثر الكرات الطاحنة شيوعا لما تتمتع به من مقاومة للاهتراء ومتانة التحطم المرتفعة، تعتبر دراسة نسبة الكربيدات في البنية والقساوة نسبة الاوستنيت المتبقي في البنية الناتجة من أهم العوامل الواجب ضبطها والتحكم بها من أجل الحصول على أفضل استثمار للكرات الطاحنة المصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم.

بالرغم من الوصول الى الخصائص التكنولوجية الجيدة للكرات الطاحنة الى أنها لا تضمن الاستثمار مدى الحياة بسبب ظروف العمل التي تسبب التصادمات المتكررة للكرات بين بعضها البعض وبينها وبين بطانة المطحنة مرتفعة القساوة و بسبب التصادمات مع المواد المراد طحنها والتي تشكل ظروف تآكل و اهتراء احتكاكية مباشرة للكرات الطاحنة ، تسبب هذه التصادمات في النهاية انهيار وفشل الكرات الطاحنة وفق عدة اشكال تتراوح بين التشظي من الكرة بأجزاء صغيرة Mini spalling أو التشظي بأجزاء كبيرا Spalling أو التحطم الى نصفين أو أكثر Breakage ،يمكن أن تتشوه الكرة تشوها لدنا Plastic Deformation نتيجة الصدمات التي تتلقاها ضمن المطحنة ما يسبب انخفاضا في فعاليتها وقدرتها على الطحن. (Blickensderfer، 1989)

الشكل 1- أشكال انهيار الكرات الطاحنة (على اليمين) Breakage و (على اليسار) Spalling

يتم تحديد الخصائص التكنولوجية للكرات الطاحنة مثل قساوتها ومتانتها على التحطم بالإضافة الى دراسة مقاومتها على الاهتراء والتآكل كما تلعب دراسة البنية المجهرية دورا هاما في تحديد سلوك الكرة لمقاومة التحطم الناتج عن الاجهادات الديناميكية التي تتعرض لها الكرة.

2- الهدف من البحث:

دراسة وتحليل الخصائص التكنولوجية لكرات طاحنة مصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم واجراء مقارنة بين كرات طاحنة من مصدر محلي وكرات طاحنة مستوردة بالوضع التجاري لهما نفس محتوى الكروم للوصول الى الخصائص الأمثل التي تخدم الصناعة المحلية.

3- المواد والأدوات ومنهجية البحث:

3-1- المواد والأدوات:

أ- كرات طاحنة محلية الصنع عدد 5

ب- كرات طاحنة مستوردة عدد 5

ت- جهاز قص العينات بالسلك

ث- جهاز شحذ العينات مع أوراق شحذ متعددة الدرجات ومعدات التنميش والصقل

ج- جهاز التحليل الطيفي

ح- جهاز اختبار القساوة

خ- جهاز اختبار السقوط الحر

د- مجهر ضوئي موصول مع برنامج تحليل الصور ونسب الأطوار

3-2- منهجية البحث:

1) اجراء التحليل الكيميائي لعينات من الكرات للتأكد من محتوى الكروم.
2) تحضير العينات واجراء اختبارات القساوة لعينات الكرات.
3) اجراء اختبار السقوط الحر للكرات.
4) مراقبة سلوك الكرات الطاحنة على التحطم خلال اختبار السقوط الحر.
5) اجراء اختبار الصدم لعينات من الكرات وفق Charpy.
6) اجراء كشف البنية المجهرية للعينات من الكرات بعد شحذها وتلميعها.
7) تحليل صور البنية المجهرية وتحديد نسبة الأطوار فيها.
8) تحليل وتفسير النتائج ومناقشتها.

4- النتائج ومناقشتها:

أجري اختبار التحليل الكيميائي للعينات المأخوذة من الكرات الطاحنة المصنوعة من حديد الصب عالي الكروم المحلية والمستوردة بعد تحضير العينات وجاءت النتائج كما يلي:

الكرة	Fe %	C %	Cr %	Mn %	P %	S %	Ni %	Mo %
المحلية	80.8	2.3	15.23	0.404	0.026	0.056	0.17	0.7
المستوردة	77	2.2	15.68	0.538	0.033	0.92	0.2	0.115

الجدول 1- نتائج التحليل الكيميائي للكرات المختبرة

ثم أجريت عملية تحضير للعينات من اجل اختبار القساوة على جهاز اختبار Rockwell C وتم اعتماد متوسط حسابي للقراءات المأخوذة من العينات الخمسة للنوعين المدروسين، يبين الجدول 2 قيم القساوة المختبرة:

الكرة	1	2	3	4	5	المتوسط HRC
المحلية	54	55	56.2	53.5	53	54.4
المستوردة	63	62	63	62.5	63	62.7

الجدول 2- نتائج اختبار القساوة للعينات المختبرة

أجري اختبار السقوط الحر للكرات الطاحنة المختبرة من أجل تحديد مقاومتها للصدم والتحطم حيث تم تعريضها للسقوط الحر بشكل متكرر حتى الفشل أو التحطم من خلال اسقاطها على بلاطة صدم من الفولاذ المقسى حتى 63 HRC من ارتفاع 6m بحيث يحاكى السقوط ظروف التصادمات التي تتعرض لها الكرات في المطحنة، تم تحديد عدد الصدمات التي تتحملها الكرة قبل الفشل أو التحطم من خلال رمي الكرات الخمسة لكل نوع بشكل منفرد ثم حساب المتوسط الحسابي للصدمات كما يبين الجدول 3:

الكرة	1	2	3	4	5	المتوسط(صدمة)
المحلية	1855	2100	1940	2480	2125	2100
المستوردة	15800	13390	15100	13025	13300	14123

الجدول 3- نتائج اختبار السقوط الحر للعينات المختبرة

من خلال مراقبة سلوك الكرات على التحطم خلال اختبار السقوط الحر تبين تعرض الكرات لبعض أنواع التشوهات الناتجة عن التصادم مع بلاطة الصدم القاسية، حيث أبدت الكرة المحلية العديد من التشوهات على شكل تشظي أجزاء صغيرة من محيطها الخارجي بعد 800-1000 صدمة وخصوصا قرب قناة الصب الرئيسية للكرة ثم لوحظ الانفصال بالكرة الى جزأين وبشكل مفاجئ عند حوالي 2000 صدمة نتيجة التحطم الناتج عن انتشار الشق التعبي كما تبين الصور أدناه:

الشكل 2 – تشوهات الكرة المحلية قبل التحطم (على اليمين) ، تحطم الكرة الى جزأين (على اليسار)

بينما صدمت الكرات المستوردة حوالي 7500 صدمة قبل تسجيل أي تشوه على السطح الخارجي لها وبعد ذلك لوحظ نشوء شق تعبي رفيع جداً ثم تطور الشق مع تتالي الصدمات الى حتى الوصول الى التحطم بمعدل صدمات حوالي 14000 صدمة، تبين الصور في الشكل 3 مراقبة تطور نمو الشق التعبي في الكرة المستوردة حتى الانهيار والتحطم:

الشكل 3- نشوء الشق التعبي على سطح الكرة الخارجي مع تشظي قرب قناة الصب (الصورة 1) ، تطور الشق التعبي وانتشاره وزيادة عمقه (الصورة 2،3)، انفصال وتحطم الكرة الى جزأين (الصورة 4).

كما أجري اختبار الصدم لعينات قياسية من الكرات الطاحنة المحلية والمستوردة حيث تم أخذ ثلاث عينات من كل كرة من خلال القص بالسلك وفق عينة تشاربي – 10X10X55 mm 2mm notch/ 45^0 حيث أتت النتائج وفق ما يلي:

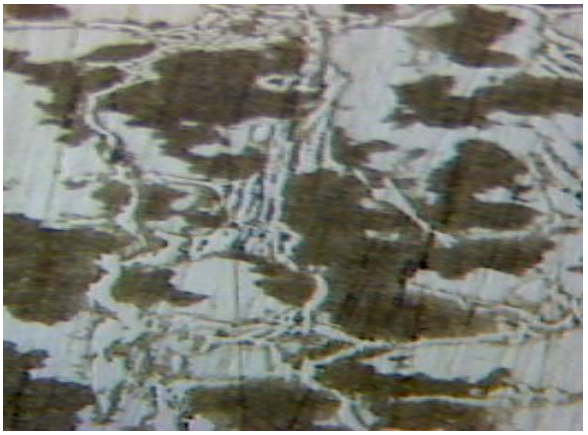
الشكل 4– عينة تشاربي على جهاز الصدم واجراء الاختبار

الكرة \ العينة	Joules – 1	Joules – 2	Joules – 3	المتوسط Joules
المحلية 1	2	1.8	2	1.93
المحلية 2	2	1.2	1.6	1.6
المحلية 3	1.5	2	2	1.83
المحلية 4	1.4	2	2	1.8
المحلية 5	2	2.2	2	2.06
المستوردة 1	4	4	4	4
المستوردة 2	4	3.8	4	3.93
المستوردة 3	4	4	4.2	4.06

المستوردة 4	4	4	4	4
المستوردة 5	4	4	3.8	3.93

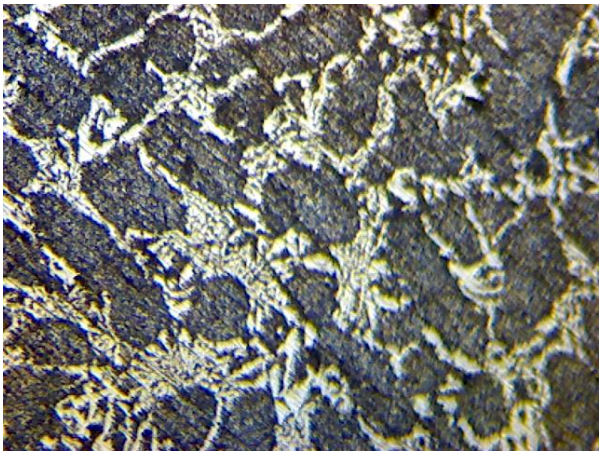
الجدول 4 – نتائج اختبار الصدم وفق عينات تشاربي للكرات المحلية والمستوردة

أجرى كشف للبنية المجهرية للعينات من الكرات الطاحنة باستخدام المجهر الضوئي بعد القيام بعمليات شحذ العينات بالتدريج ثم القيام بعملية التلميع باستخدام مسحوق الألومينا ثم اجراء التنميش باستخدام محلول النيتال حيث أظهر تحليل صورة البنية المجهرية للكرة المحلية باستخدام برنامج Image J ومن خلال تباين الألوان بالضبط الأبيض والأسود أن نسبة الكربيدات في البنية وصلت الى 18.8% ونسبة من الاوستنيت المتبقي ضمن البنية المارتنسيتية



الشكل 5– صورة البنية المجهرية للكرة المحلية (X800)

بينما لوحظ من خلال تحليل صورة البنية المجهرية للكرة المستوردة أن نسبة الكربيدات 14.9% بالإضافة الى نسبة من الاوستنيت المتبقي في بنية مارتنسيتية ناتجة عن المعالجة الحرارية للكرة الطاحنة.



الشكل 6- صورة البنية المجهرية للكرة المستوردة(X800)

5- الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرت النتائج تحطم الكرة المحلية بعد 2060 صدمة بعد ظهور عدد من التشظيات في محيطها الخارجي مع تتالي الصدمات ما يفسر ضعف في متانتها على التحطم خصوصا بوجود عيوب السكب الداخلية التي لوحظت بعد انهيار الكرة حيث تعتبر المسامية والشقوق الداخلية في البنية سبباً رئيسياً في تركيز الاجهادات ما يساعد في انتشار الشق التعبي و انهيار الكرة بشكل أكبر وعدم القدرة على مقاومة الصدمات المتكررة، بينما تحطمت الكرة المستوردة بعد حوالي 14000 صدمة ما يعكس متانة التحطم المرتفعة فيها بظل [illegible] عيوب السكب المؤدي الى تجانس توزع الاجهادات الناتجة عن الصدمات في البنية وانتشار الشق ضمن البنية كما لعبت نسبة الكربيدات M7C3 في البنية دورا في ذلك ،حيث أن نسبة الكربيدات المرتفعة في الكرات المحلية 18.23% سببت ارتفاع في مقاومة الاهتراء للكرة لكنها تنتج بنية أكثر مرونة و أقل قابلية لمقاومة انتشار الشقوق التعبية الناتجة عن تتالي الصدمات بينما النسبة الأقل من الكربيدات في الكرات المستوردة حققت التوازن المطلوب بين متانة التحطم ومقاومة الاهتراء.

كما تبين من خلال تحليل اختبار القساوة أن الكرات المحلية بمعدل 54.4 HRC مقابل 62.7HRC ، حيث أن القساوة تعبر من أهم العوامل في مقاومة التأكل و الاهتراء المرافقة لظروف عمل الكرة الطاحنة لكن الانهيار السريع للكرة المحلية على الرغم من ارتفاع نسبة الكربيدات فيها الى 18.23 % لكن عيوب السكب سببت نقاط ضعف موضعية في النبة تركزت فيها اجهادات الصدم وسبب الانهيار المبكر، كما تبرز القساوة المرتفعة للكرة المستوردة انعكاساً للمعالجة الحرارية والوصول الى البنية المارتنسيتية المتوازنة مع الكربيدات.

تبين نتائج اختبار الصدم تشاربي أن الكرة المحلية تحطمت عند Joule 2 بسبب النسبة المرتفعة من الكربيدات في البنية التي ترفع هشاشة الكرة وتخفض قدرة الكرة على امتصاص الطاقة الناتجة عن الصدمات المتكررة بينما وجد أن الكرة المستوردة تحطمت عند Joule 4 بسبب البنية المارتنسيتية المتجانسة مع الكربيدات وغياب العيوب في هيكل الكرة.

ونتيجة لذلك يمكن استنتاج مايلي:

1- تتميز الكرات المستوردة بمتانة تحطم أعلى بالتوافق متانة الاهتراء وذلك بسبب تجانس البنية المارتنسيتية مع الكربيدات وغياب عيوب السكب وبالتالي فإنها مناسبة للتطبيقات الخاصة بعمليات الطحن التي تتطلب ظروف تآكل مرتفعة.
2- تعتبر الكرات الطاحنة المحلية جيدة نسبياً لتطبيقات ذات ظروف تآكل وصدم أقل من المستوردة بسبب انخفاض متانة التحطم الناتجة عن الهشاشة المرافقة لنسبة الكربيدات المرتفعة وعيوب السكب في البنية.
3- تبين نتائج اختبار السقوط الحر أن الكرات المستوردة التي عملت على عدد صمات اكبر تتميز ببنية متجانسة ومتوازنة أكبر.

- **التوصيات:**

1- اجراء المعالجة الحرارية بهدف تحسين بنية الكرات الطاحنة المحلية وتخفيض نسبة الكربيدات فيها الى حدود نسبة الكربيدات في الكرة المستوردة أو أقل.

2- دراسة عميقة لنسبة الأوستنيت المتبقي في البنية وتخفضيها مقابل زيادة نسبة البنية المارتنسيتية في البنية التي تسبب تحسين خصائص القساوة ومتانة التحطم للكرة الطاحنة.

3- العمل على تقليل عيوب السكب والمشاكل الناتجة عنها من خلال تطوير عمليات السكب المحلية للكرات الطاحنة واستعمال طرائق تنقية المعدن وإزالة الغازات من الكرة المسبوكة.

References

1. **MDPI**. 2023. *Development of High Chromium White Cast Irons (HCWCIs) for Wear–Corrosive Environments: A Critical Review*, Metals, Vol. 13, Issue 11, Article 1831. DOI: 10.3390/met13111831.
2. **Springer**. 2020. *Wear Mechanism of High Chromium White Cast Iron and Its Microstructural Evolutions During the Comminution Process*, Tribology Letters, Vol. 68, Article 17. DOI: 10.1007/s11249-020-01317-6.
3. **Ningguo Hexin**. 2023. *Heat Treatment Process for High Chromium Grinding Ball*.
4. **Blickensderfer, R., Tylczak, J. H., & Laird, G.** 1989. *Spalling of High-Chromium White Cast Iron Balls Subjected to Repetitive Impact*.
5. **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.

6. **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.
7. **Wiengmoon, A.** 2010. Carbides in High Chromium Cast Irons, *Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University*.
8. **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.
9. **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.
10. **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.
11. **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