Comprehensive Journal of Science
Volume (10), Issue (38), (Dec, 2025)
ISSN: 3014-6266

مجلة العلوم الشاملة
المجلد (10) العدد 38 ديسمبر 2025
ردمد: 3014-6266

تحسين الصلابة ومقاومة ألاحتكاك للفولاذ الصلبAISI H12 باستخدام الطلاء الصناعى (كربيد التنغستن)

حمدى عبد الحميد حسن رقص

الهندسة الميكانيكية، كلية الهندسة، جامعة عمر المختار، ليبيا

Improvement of the hardness and abrasion resistance of AIS H12 steel using industrial coating (tungsten carbide)

Hamdi Abdulhamid Raghs

Mechanical engineering, Faculty of Engineering, Omar Al Mukhtar University, Libya
Email: hamdi.raghs@omu.edu.ly

تاريخ الاستلام:2025/11/3 –تاريخ المراجعة: 2025/11/16– تاريخ القبول: 2025/11/26– تاريخ للنشر : 2025 /12/8

ملخص البحث

تم دراسة تأثير وفعالية الطلاء الصناعى ، طلاء كربيد التنجستن على الأداء الترايبولوجي للفولاذAISI H12 من خلال أجراء اختبارات التعرية ، وقمنا بإجراء تحليل لطلاء كربيد التنجستن على أداء التعرية (wearللفولاذ H12 بتقنية بصرية باستخدام مجهر المسح الإلكتروني(SEMوصورطبوغرافية ثلاثية الأبعاد وكذلك تجربة معامل الاحتكاك . وفقًا للنتائج التي تم الحصول عليها من اختبارات التعرية ، قلل الفولاذ المطلي بكربيد التنجستن معامل الاحتكاك بنسبة 23.2٪ مقارنة بالفولاذ غيرالمطلي.الهدف من هذه الدراسة هو زيادة مقاومة التعرية لفولاذ العمل الساخن H12 باستخدام طلاء كربيد التنجستن.

الكلمات الدالة: المجهر الإلكتروني ((SEM، تحليل الأشعة السينية لتشتيت الطاقة (,(EDXالصلابة، المعهد الأمريكي للحديد والصلب ((AISI، معامل الاحتكاك، طلاء كربيد التنغستن ((WC، فولاذ H12، وقود الأكسجين عالي السرعة .(HVO)

Abstract:

In this research, the effect and effectiveness of industrial coating, tungsten carbide coating on the tribological performance of AISI H12 tool steel was studied through wear test. We performed an analysis of the tungsten carbide coating on the erosion performance of H12 steel using optical techniques such as scanning electron microscopy (SEM), three-dimensional topographic images, and a coefficient of friction experiment. According to the results obtained from the erosion tests, tungsten carbide-coated steel reduced the coefficient of friction by 23.2% compared to uncoated steel. The aim of this study is to increase the wear resistance of H12 hot work steel, by using tungsten carbide coating.

Keywords: Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive X-ray analysis (EDX), American Iron and Steel Institute (AISI), Coefficient Of Friction , tungsten carbide coating, (WC) , H12 tool steel, High Velocity Oxygen Fuel (HVOF), hardness.

المقدمة

برز مجال هندسة الأسطح، نتيجةً لتزايد الخصائص للمواد المستخدمة في المجالات الهندسية والتقدم التكنولوجي، و وكذلك الحاجة إلى مواد هندسية جديدة طويلة الأمد وعالية الأداء ومنخفضة التكلفة، في هندسة الأسطح، تُجرى دراسات حول تطوير وتركيب وإنتاج واستخدام الخصائص الفيزيائية أو الكيميائية للمادة،. من الضروري طلاء فولاذ العمل الساخن **AISI H12** وحماية السطح بطبقات مناسبة للاستخدام في بيئة العمل،لأنهو يتعرض لتآكل شديد وتشوه سطحي نتيجةً لظروف العمل.يُستخدم الفولاذ في التطبيقات الصناعية عند درجات حرارة 400 درجة مئوية فأكثر. يتميز هذا الفولاذ بصلابة ومتانة عالية، و يحتوي على عناصر سبائك الكروم والموليبدينوم والفوسفور. يُستخدم فولاذ أدوات العمل الساخن **H12** عمومًا كمواد للبثق والضغط الساخن والقولبة**[1-5]**.

تحدث تشققات وتشوهات مجهرية وكبيرة على سطح المادة،لأنه يتعرض هذا الفولاذ لإجهادات مثل التعب، والزحف، والتشوه البلاستيكي، والقوى الحرارية، ، وذلك حسب درجة حرارة البيئة المستخدمة. وللحد من هذه التشوهات، تُستخدم طرق مختلفة لتصلب السطح. في التطبيقات الصناعية، تُستخدم طرق تصلب السطح مثل النيترة، والكربنة، بالإضافة إلى عملية الطلاء **[6-8]**.

1. المواد والطرق التقنية المستخدمة:

تم أستخدام فولاذ **H12** في التجارب لأنه الأكثر استخدامًا في الأعمال الساخنة، ويُظهر أداءً احتكاكيًا متفوقًا مقارنةً بأنواع الفولاذ الأخرى.وفي إطار الدراسة، سوف يتم زيادة مقاومة فولاذ **H12** للتعرية (**wear**) باستخدام الطلاء الصناعى قبل عملية الطلاء واختبارات التعرية، نُظِّفت أسطح العينات باستخدام ورق صنفرة مرقم من 200 ، 400، 800 إلى 1000 لإزالة طبقة الأكسيد على السطح.

تم تحضير عينات الفولاذ بأبعاد 40 مم × 15 مم × 10 مم. ولتحسين الأداء الاحتكاكي للفولاذ ، طُليت عينات فولاذ **H12** بمادة كربيد التنغستن. يُستخدم كربيد التنغستن على نطاق واسع، خاصةً في التطبيقات الصناعية المعرضة للتآكل بالقص، إذ يزيد من صلابة المواد ومقاومتها للتآكل و التعرية.

شكل 1: عينات الفولاذ AISI H12 طلاء كربيد التنغستن

نظراً للخواص الميكانيكية والاحتكاكية العالية لمادة كربيد التنغستن (**WC**)، تم أختيار كربيد التنغستن كمادة طلاء لتقليل التآكل والتشوهات الناتجة عن التآكل على سطح الفولاذ. واستُخدم الكوبالت (**Co**) كمادة رابطة لضمان التصاق كافٍ بين كربيد التنغستن وفولاذ **H12**. يتفاعل الكوبالت جيداً مع عناصر مجموعة الكربيدات، ويوفر قابلية عالية للبلل والذوبان على السطح.

جدول رقم (1): التركيب الكيميائي للفولاذ**H12**

(%)التركيب الكيميائي	Mn	Si	V	Mo	Cr	C
	0.60	1.25	0.50	1.50	5.50	0.40

تتشكل طبقة طلاء عالية المتانة والصلابة ومقاومة التآكل على السطح، بفضل الكوبالت المطيل المعزز بمادة كربيد التنغستن، مع زيادة كمية الكوبالت، تقل المسامية وتزداد قوة التماسك بين الطلاء والمادة الأساسية، كما أن نسبة تقوية المادة الرابطة مهمة لتحقيق الطلاء للأداء الاحتكاكي المطلوب.

علاوة على ذلك، مع زيادة كمية الكوبالت، تزداد صلابتها، ولكن بعد معدل معين، تُقلل هذه الزيادة من مقاومة المادة للتعب الحراري، وهذا يعتمد على الصلابة والمتانة. وهذا يؤثر سلبًا على الخواص الميكانيكية للمادة.

فى هذا البحث، قمنا بتحليل الأداء الاحتكاكي لطلاءات كربيد التنغستن (**WC**) المقواة بالكوبالت (**Co**) مع قياس الصلابة وفقدان الكتلة التراكمي وقيم معامل الاحتكاك وبحثنا في تأثير نسبة الكوبالت على الاحتكاك ومقاومة التآكل والتعرية. كذلك تتميز عمليات الطلاء باستخدام وقود الأكسجين عالي السرعة (**HVOF**) بانخفاض المسامية، والمتانة العالية، ومقاومة التآكل والتعرية، وكذلك إمكانية الحصول على طلاءات سيراميكية عالية الصلابة والمتانة ومقاومة التآكل بفضل الإجهاد الانضغاطي المتبقي الذي تُحدثه. كما أن انخفاض تكلفتها وعدم وجود آثار بيئية سلبية يعززان استخدامها في التطبيقات الصناعية.

في هذه الدراسة، تم أختيار طريقة **HVOF** بسبب الأداء الاحتكاكي والميكانيكي، والعوامل الاقتصادية والبيئية. تم قياس قيم الصلابة الدقيقة للعينات باستخدام جهاز قياس الصلابة(**Vickers**) كما فى الشكل (2). والقيم المتحصل عليها موضحة في الجدول (2). تم حساب قيم الصلابة بأخذ المتوسط الحسابي بعد إجراء 6 قياسات.

جدول رقم (2): قيم صلابة العينات

نوع العينة	**قيمة الصلابة (فيكرز(Vickers))**
عينة نقية	263 ± 40 HV
عينة مطلية	1078 ± 110 HV

شكل 2: جهاز قياس الصلابة

تم أستخدم جهاز قياس الاحتكاك (**tribometer)**، جهاز يقيس الكميات الفيزيائية المتعلقة بالاحتكاك بين الأجسام المتحركة، مثل مُعامل الاحتكاك، وقوة الاحتكاك، وحجم التآكل بين سطحين متلامسين أثناء الاحتكاك بينهما.بلغت درجة حرارة المحيط بالتجربة ودرجة حرارة الماء النقي المستخدم فيها حوالي24°**C** درجة مئوية. وأظهرت القياسات التي أُجريت خلال التجارب أن تغير درجة حرارة المحيط ودرجة حرارة الماء كان طفيفًا. أُجريت التجارب في بيئة مائية نقية لمحاكاة الظروف الجافة والجوية. حجم الماء النقي الذي أُجريت فيه التجارب كان 300 مل. كمادة كاشطة في نظام الاختبار استُخدمت كرة فولاذية **Cr6100** بصلابة 50 **HRC**.

شكل 3: جهاز قياس الاحتكاك

تم استخدم طرق التصوير بالمجهر الإلكتروني الماسح **SEM (Scanning Electron Microscopes)**، وتحليل العناصربواسطة تحليل الأشعة السينية**EDX (Energy Dispersive X Ray Analysis)** في تحليل **EDX**، استخدمت الطريقة الخطية وطريقة رسم الخرائط.، وقياس الصلابة الدقيقة لتوصيف العينات المطلية. واستُخدم مقياس **(Dynamometer)** لقياس معامل الاحتكاك، وصورطبوغرافية ثلاثية الأبعاد **(Optical Profilometer)** لتحليل السطح للفولاذ.

شكل 4: المجهر الإلكتروني الماسح **(SEM)**

3. نتائج التجارب المعملية والمناقشة:

تم تحليل النتائج على مرحلتين، التوصيف المعدني والتريبولوجي للعينات المطلية بـ **WC–Co**. في التوصيف المعدني، تم تحليل قياس الصلابة وصور المجهر الإلكتروني الماسح **(SEM)**، و**XRD**، و**EDX** (الخطية والرسم الخرائطي). في التوصيف التريبولوجي، حُللت قيم معامل الاحتكاك الناتجة عن اختبارات التعرية **(wear test)**, بالإضافة إلى ذلك، فُحصت مورفولوجيا السطح باستخدام صور المجهر الإلكتروني الماسح والتضاريس ثلاثية الأبعاد.

1.3. وصف طبقة طلاء كربيد التنغستن **(WC)**:

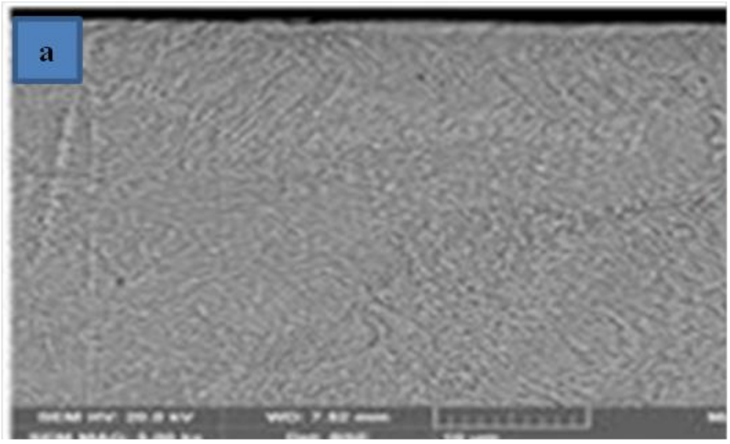
تجذب الطلاءات القائمة على الكربيد الانتباه في تطوير خصائص أسطح المواد الهندسية. يمكن للمحاليل الصلبة الوسيطة، أن تزيد من الأداء الاحتكاكي للمواد المعرضة للتآكل بفضل صلابتها العالية [12،14].

بناءً على استقرار عملية الطلاء، يمكن الحصول على سُمك طلاء متجانس. يُظهر الشكل 5 مقطعًا عرضيًا للفولاذ المطلى بواسطة كربيد التنغستن **(WC– Co)**. يوضح الشكل 5.**a** البنية الدقيقة للبيرلايت **(pearlite microstructure)** ، بينما يوضح الشكل. 5.**b** مقطعًا عرضيًا مطليًا بكربيد التنغستن بسمك 165.74 ميكرومتر. يُلاحظ أن الطلاء يُشكل سطحًا متموجًا بسبب سمكه العالي. وقد لوحظ في الدراسات العلمية وجود أشكال مماثلة على الأسطح المطلية بكربيد التنغستن[13،15].

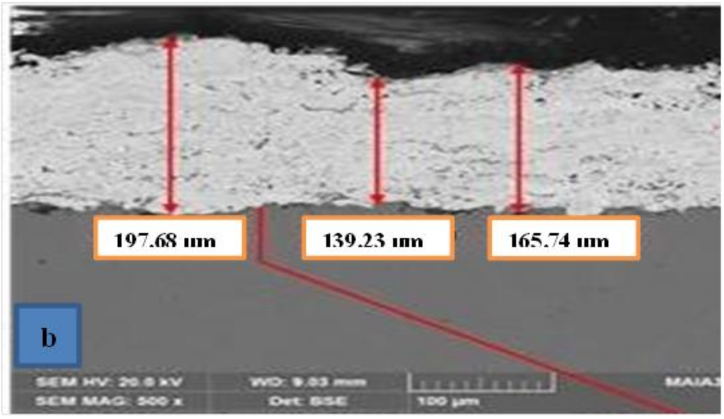
يمكن القول إن شكلًا متموجًا يتشكل على السطح اعتمادًا على معدل رش طريقة **HVOF**. وقد أدى معدل الرش العالي في طريقة **HVOF** إلى تموج شكل السطح من خلال إحداث تأثير تشكيل كروي. ومع ذلك، لم يُلاحظ تكوين بنية دقيقة الحبيبات في عمليات تشكيل الكرات في البنية الداخلية.

نظرًا لقصر مدة معالجة **HVOF** وتكوين طبقة من كربيد التنغستن **(WC)** على السطح أثناء العملية، لم يحدث أي تغيير في البنية الدقيقة. ووفقًا لصورة المجهر الإلكتروني الماسح، فقد تبين وجود أقل قدر من الشقوق والفراغات وعيوب التمزق في طبقة الطلاء. وبالنظر إلى سمك طبقة الطلاء، يمكن القول إن العيوب الناتجة ضئيلة.

في الشكل **b**.5 ، تظهر جسيمات كربيد التنغستن (**WC**) موزعة بشكل متجانس في مصفوفة الكوبالت بنسبة 13 %. على الرغم من ميل جسيمات كربيد التنغستن (**WC**) للتكتل، إلا أنه يتضح من صورة الخريطة الأولية أن توزيعها متجانس بفضل رابط الكوبالت.



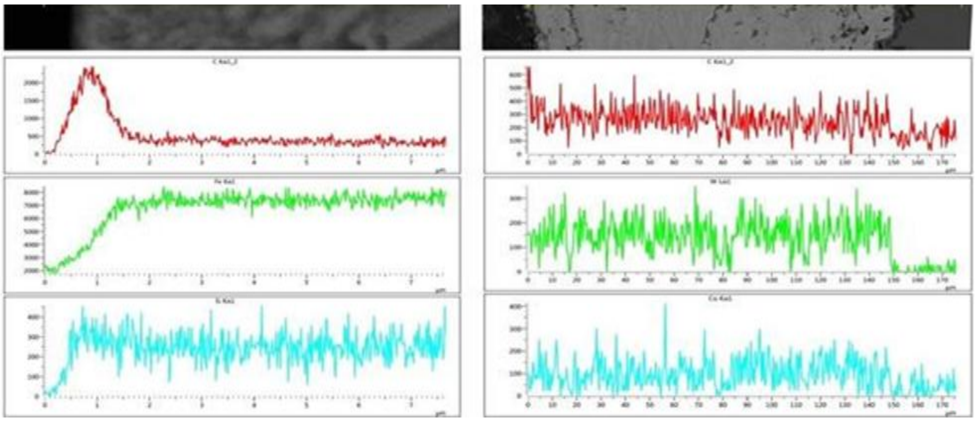
شكل 5:**a**) صورة المجهر الإلكتروني الماسح للمقطع العرضي لسطح العينة النقية



شكل 5:**b**) صورة المجهر الإلكتروني الماسح للمقطع العرضي لسطح العينة المطلية

يوضح الشكل (6) تحليلات **EDX** لجودة الطلاء. في الشكل **a**.6، يظهر سطح العينة المفتوحة على سطح طبقة الأكسيد. بعد عملية الطلاء، يتضح أن توزيع الكربون متجانس على سطح مادة الفولاذ **H12**. ويمكن القول إن طبقة الأكسيد تتشتت تبعًا للضغط ودرجة الحرارة أثناء عملية الطلاء، بالإضافة إلى تأثير الاضمحلال.

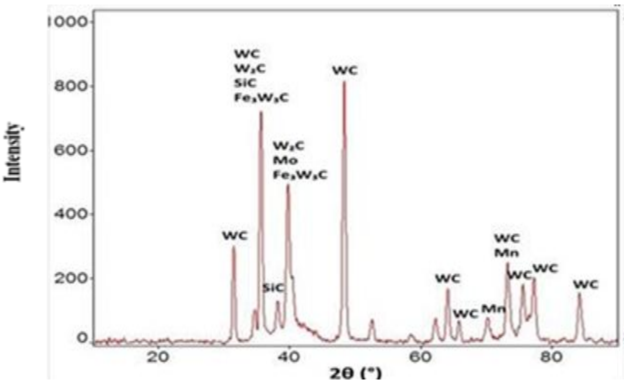
العناصر السائدة (**Co،W،C**) الظاهرة في الشكل **b**.6 موزعة بشكل متجانس على طول طبقة الطلاء. وبناءً على ذلك، يمكن القول إن جودة الطلاء الطيفية كافية.



(b) (a)

شكل 6: **a)** تحليل **EDX** لسطح العينة النقية **b)** تحليل **EDX** لسطح العينة المطلية

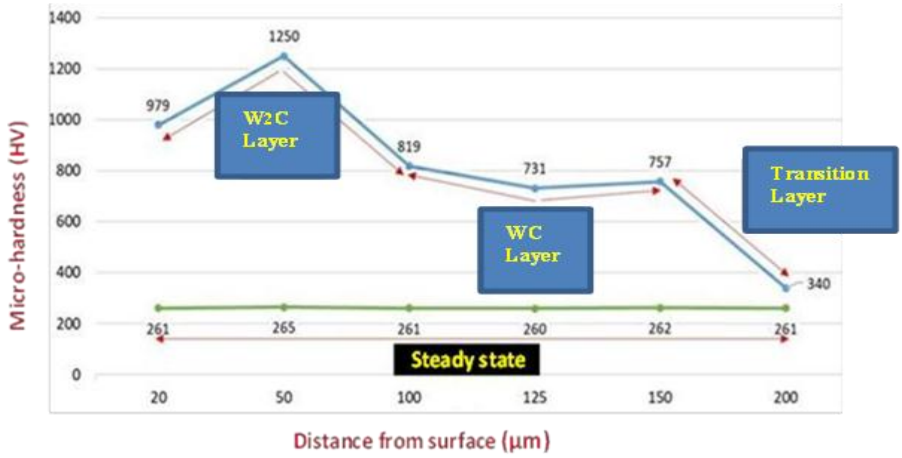
بالإضافة إلى تجانس عناصر الطلاء، فإن الرابطة المتكونة مع المادة الأساسية مهمة أيضًا. يظهر ذلك في مخطط حيود الأشعة السينية (**XRD**) في الشكل (7)، حيث تتشكل سبيكة **Fe3W3C** نتيجةً لمحلول الحالة الصلبة المتكون مع المادة الأساسية. ويمكن القول إن تكوين رابطة مستقرة يحدث بفضل بنية القفص البلوري المكعب للسبائك. ومن المتوقع تكوين قمم **WC** و **W2C** الموضحة في الشكل (7) في السبائك المطلية بالتنغستن.



شكل 7: تحليل حيود الأشعة السينية

في الشكل (6)، لا يُلاحظ أي تغير في اللون لـ **WC** و **.W2C**ومع ذلك، ووفقًا للرسم البياني الموضح في الشكل (8)، يُلاحظ وجود طبقة (**WC layer**) ذات صلابة تصل إلى حوالي 757 **HV** على سطح المادة، ثم طبقة **W2C**(**W2C layer**) التي تصل صلابتها القصوى إلى 1250 **HV** بسبب الأكسدة. بينما لم يُلاحظ أي تغيير في الصلابة على طول طبقة**WC** ، إلا أن قيمة صلابة طبقة **W2C**ارتفعت أولًا ثم انخفضت. ويمكن القول إن التباين في طبقة الصلابة يحدث بسبب معدل الأكسدة ومعلمات **HVOF**.

من الحالات الملحوظة الأخرى في مخطط الصلابة وجود منطقة الانتقال على مسافة حوالي 55 ميكرومتر،في هذه المنطقة انخفضت قيمة الصلابة بشكل مُتحكم فيه، تشكيل اتجاه خطي من HV757 إلى HV250 بفضل هذا الانخفاض، يقل تركيزات الإجهاد التي قد تحدث بسبب تغيرات الصلابة أثناء تدفق القوة في المادة وإطالة عمر طبقة الطلاء.يمكن تقييم هذا الاتجاه كحالة إيجابية من حيث قوة الطلاء.

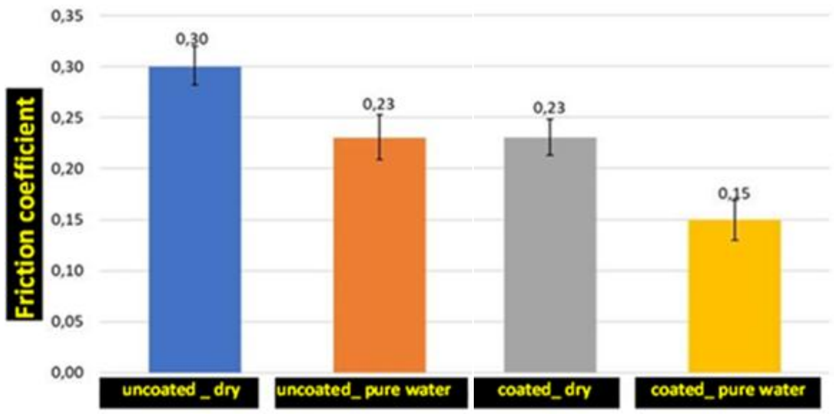


شكل 8: رسم بياني للصلابة

2.3. الأداء الاحتكاكي لطبقة كربيد التنغستن (WC):

لتحليل أداء الاحتكاك، فُحصت بيانات معامل الاحتكاك. ووفقًا للشكل(9)، انخفض معامل الاحتكاك لعينة الفولاذ H12 غير المطلية في بيئة الماء النقي (Uncoated- pure water) بنسبة 23% مقارنةً بالبيئة الجافة (Uncoated- dry)يمكن تفسير ذلك بتكوين طبقة غشاء من الماء النقي في منطقة الخشونة عند سطح التآكل والتعرية. انخفضت إجهادات الضغط والقص الناتجة عن الاحتكاك مع طبقة الغشاء، وانخفض معامل الاحتكاك. ومع ذلك، تُعدّ القيم المُحصّلة في البيئة المائية مهمةً لتحليل تأثير الطلاء. وقد تبيّن أن قيمة معامل الاحتكاك للعينة المطلية بكربيد التنغستن (coated- dry)تساوي قيمة معامل الاحتكاك للعينة غير المطلية في بيئة مائية نقية .

يُظهر هذا أن زيادة صلابة الطلاء بمقدار757 HV عالي تُحدث تأثير طبقة غشاء سائلة. ازدادت صلابة الطلاء من 260 HV إلى 1000 HV ، مما أدى إلى انخفاض معامل الاحتكاك بنسبة 23%. يشير انخفاض معامل الاحتكاك إلى فعالية طلاء كربيد التنغستن (WC) وإمكانية تطبيقه في تقليل احتكاك الفولاذ.



شكل 9: قيم معامل الاحتكاك

لا يمكن استخدام طلاء كربيد التنغستن (WC) في جميع التطبيقات الصناعية نظرًا للمتطلبات التقنية والاقتصادية. ومع ذلك، يُمكن تطبيق طلاء كربيد التنغستن على الاحتكاك الانزلاقي بدلًا من الاحتكاك المتدحرج. في هذه المناطق، يُعدّ تقليل معامل الاحتكاك

باستخدام طلاء كربيد التنغستن (**WC**) أمرًا بالغ الأهمية لتقليل التشوهات. يتميز طلاء كربيد التنغستن (**WC**) ببنية سداسية متماسكة **hcp** (**hexagonal Close–Packed**) ، بينما يتميز الفولاذ ببنية شبكية بلورية مكعبية مركزة الحجم(**hmk**) –**volume**) (**centered cubic crystal lattice** . يتسارع تكوين الروابط بين هياكل **hcp** و**hmk**، خاصةً تحت الضغط ودرجة الحرارة، أي في البيئات ذات الطاقة العالية للمادة. يمكن القول أنه نتيجة للاتصال المستمر بين الفولاذ **H12** والطلاء والمعادن الأخرى، فإن قوة الرابطة بين الفولاذ ستزداد [18،16].

بسبب زيادة الضغط ودرجة الحرارة نتيجة الاحتكاك. يمكن أن يؤدي ارتفاع درجة الحرارة والضغط في مناطق طلاء كربيد التنغستن حيث يحدث احتكاك الانزلاق، يسبب زيادة قوة التصاق طلاء كربيد التنغستن(**WC**) ، مما يُعزز مقاومة التآكل والتعرية. بهذه الطريقة ستزداد أزمنة التآكل والتعري الثانوي للمواد الهندسية. ويُعدّ تقليل معامل الاحتكاك باستخدام طلاء كربيد التنغستن في المناطق التي يكون فيها تشوه الفولاذ شديدًا، وإطالة زمن التعري الثانوي للطلاء بفضل الطاقة المُدخلة أثناء الاحتكاك العالي أمرًا بالغ الأهمية لزيادة العمر الافتراضي للفولاذ.

يظهرالشكل (10) صور المجهر الإلكتروني الماسح (**SEM**) لتحليل آليات التآكل والتعرية. يُظهرانخفاض عرض آثارالتعرية للعينات المطلية وغير المطلية، عند مستوى مم في البيئة الجافة، إلى مستوى ميكرومتر في بيئة الماء النقي. بفضل طبقة الاحتكاك التي تُشكلها المياه انخفضت نقاط التلامس بين الكرة الكاشطة والمادة الفولاذية،.

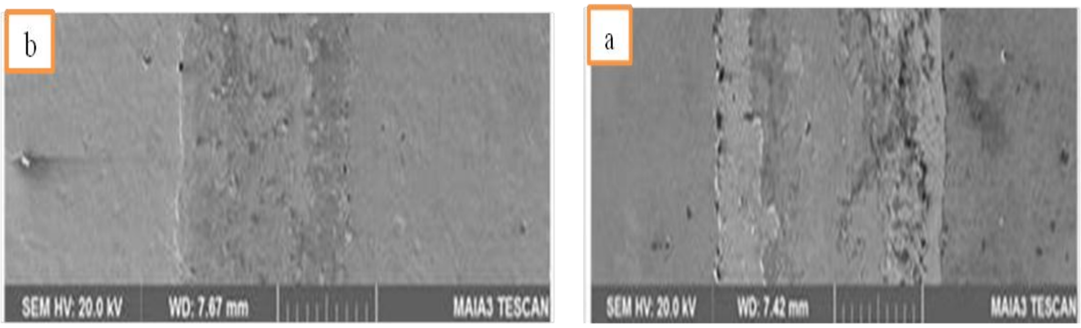
أدى انخفاض التلامس بين المواد إلى أنقاص مساحة ندبة التعرية. في صورة المجهر الإلكتروني الماسح للعينة غير المطلية(**uncoated dry**) الموضحة في الشكل **a.10** يُلاحظ حدوث آلية تآكل كاشطة شديدة. بينما لوحظت ندبة احتكاك منتظمة في مركز الفولاذ المُصاب بالتآكل والتعرية، لوحظت تكوينات غير منتظمة في المناطق الهامشية منه. يمكن تفسير هذه التكوينات غير المنتظمة بتأثير الالتصاق وتأثير الحرث الناتج عن الجسيمات المنفصلة عن المنطقة المركزية.

يمكن القول إن أكثر من آلية تآكل فعالة في بيئة الاحتكاك الجاف، إلا أن التآكل يكون في الغالب كاشطًا نظرًا لثبات حدود المادة. في الشكل**b10.(Uncoated – water)** ، يتضح أن آلية تآكل كاشط أكثر سطحية تتشكل بفعل تأثير الغشاء السائل مقارنةً بالبيئة الجافة الشكل 10 **a**. في صور العينة المطلية بالكربون المقاوم للماء الموضحة في الشكلين (**d.10, c.10**) يُلاحظ حدوث آليات تقشر على السطح. يُعد التآكل المتقشر آلية شائعة في المواد الفولاذية نتيجةً للتعب.

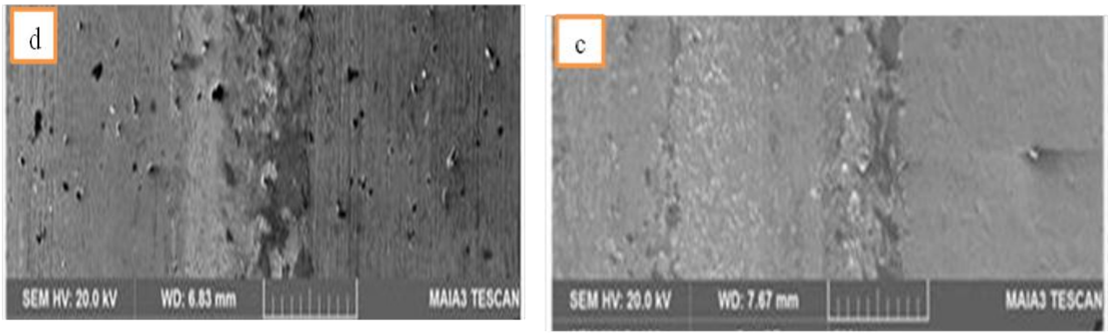
تتمدد الشقوق الشعرية التي تتشكل بتأثير القوى المماسية على سطح الفولاذ بفعل الحمل الدوري وهي فعالة في تكوين آلية التقشر. ومع ذلك يُلاحظ أن التقشر في الشكل **c.10** (**coated dry**) أكثر سطحية.

نظراً لأن زيادة الصلابة الناتجة عن طلاء كربيد التنغستن (**WC**) تقلل التشوة البلاستيكى للمادة، وانخفض معدل التقشر. وهذا يُظهر زيادة في عمر خدمة فولاذ **H12** المُغطى بكربيد التنغستن (**WC**). ووفقاً للصورة الموضحة في الشكل **d.10** (**coated water**), يلاحظ ازدياد عيب التقشر في عينة الفولاذ المُغطى بكربيد التنغستن تحت الماء النقي.

على الرغم من أن عرض ندبة التآكل والتعرية قد انخفض بفعل تأثير السائل، إلا أن التقشر أصبح واضحًا نتيجة تكوّن طبقة غشاء شبه سائلة، ويمكن القول ستتشوه الأسطح المطلية بشكل أكبر في بيئة المياه بسبب طبقة رقيقة و شبه سائلة.



شكل 10: **a)** فولاذ غير مطلي وجاف **b)** فولاذ غير مطلي مع ماء



شكل 10: **c)** فولاذ مطلي بكربيد التنغستن وجاف **d)** فولاذ مطلي بكربيد التنغستن مع ماء

تظهر الصورالطبوغرافية المأخوذة من مناطق التعرية في الشكل(11). تُظهر قيم **Ra** متوسط الخشونة على طول مسار القياس و **Sa** متوسط الخشونة على مساحة القياس ،الموضحة في الشكل(11)، وتبين توافقًا مع معايير التحليل الأخرى. يشير الحصول على قيم **Ra** و **Sa** بقيم صغيرة عدديًا (<0.40 ميكرومتر) إلى حدوث تشوه بفعل آلية الكشط بين كرة الكشط ومادة الفولاذ **H12** في الشكل(11)، تُمثل المناطق الحمراء نقاط الذروة، والمناطق الزرقاء نقاط القاع، بينما تُمثل المناطق الصفراء والخضراء الحد الأدنى لخشونة السطح.

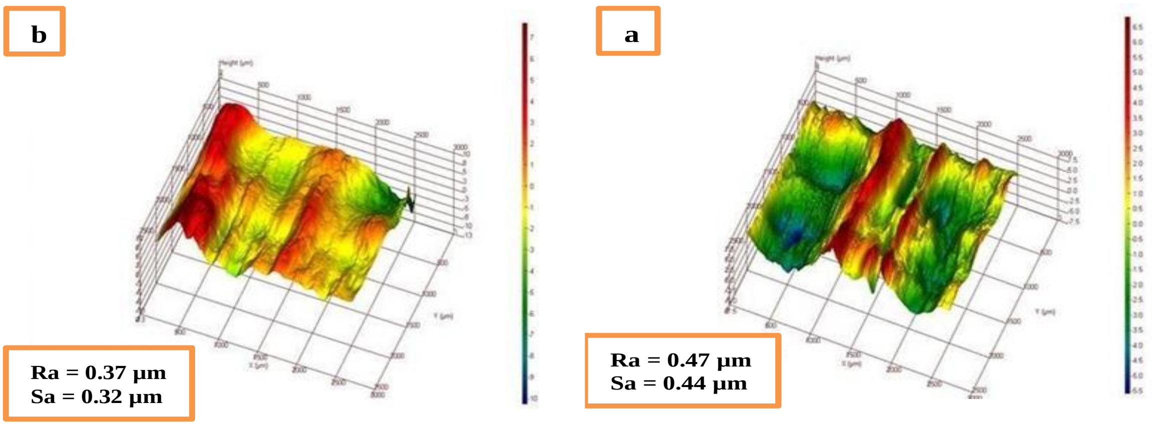
يوضح الشكل **11. a** مورفولوجي أو "علم التشكل" أن

فولاذ **H12** يتعرض لتشوه شديد تحت تأثير احتكاك القص(**uncoated dry**). تؤكد المناطق الحمراء وجود آليات الالتصاق والحرث المزعومة وفقًا لصور المجهر الإلكتروني الماسح. ومرة أخرى تبرز صورة التعرية والتآكل الشديد التي حددتها صور، **(SEM)** في منتصف الشكل يُظهر شكل فولاذ **H12** غير المطلي تحت الماء النقي(**Uncoated water**). وجود آلية تآكل كاشطة بشكل مستوٍ (الشكل **b.11**.

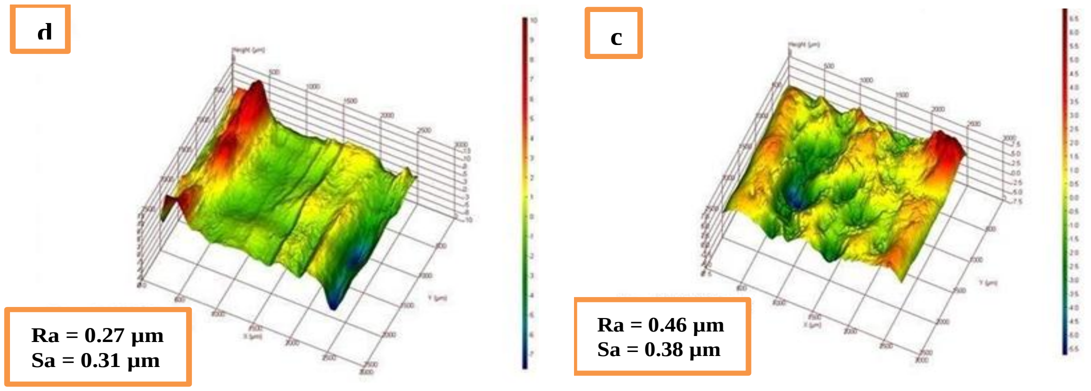
في الشكل**c.11**، يُلاحظ تشكل سطح خشن نتيجةً لظروف التآكل الجاف **(coated dry)**. ووفقًا لصور المجهر الإلكتروني الماسح، لم تظهر آليات التقشر المزعومة بوضوح في صور التضاريس ثلاثية الأبعاد.

ومع ذلك، يُشير ندرة درجات اللونين الأحمر والأزرق إلى أن طلاء كربيد التنغستن **(WC)** يزيد من مقاومة التآكل والتعرية ويقلل من فقدان المواد. في الشكل**d.11**، يُلاحظ وجود تشوه طفيف على سطح الفولاذ المطلي بكربيد التنغستن **(WC)** في ظروف الماء النقي,

(coated– water) بفضل صلابة الطلاء وطبقة الغشاء السائل يبدو السطح مستويًا بدرجات اللونين الأخضر والأصفر، ويُعزى التموج المتشكل على السطح إلى عدم استمرارية طبقة الغشاء السائل. وقد تسببت مشكلة الالتصاق الناتجة عن الاحتكاك في مناطق الغشاء السائل وارتفاع درجة الحرارة في حدوث تقلبات لمستوى الميكرون على السطح.



شكل11: **a**) فولاذ غير مطلي وجاف **b**) فولاذ غير مطلي مع ماء



شكل 11: **c**) فولاذ مطلي بكربيد التنغستن وجاف **d**) فولاذ مطلي بكربيد التنغستن مع ماء

4. الخاتمة و الخلاصة:

في هذه البحث، تم دراسة تأثير طلاء (**WC– Co**)على مقاومة تآكل فولاذ **H12**. وتم تحديد خصائص الطلاء من خلال تحليل صور المجهر الإلكتروني الماسح (**SEM**)، و**EDX**، و**XRD**، وقياسات الصلابة. ولتحليل نتائج اختبارالتعرية للعينات المطلية وغير المطلية، تم فحص صور التضاريس ثلاثية الأبعاد. وفيما يلي النتائج التي تم الحصول عليها:

- عند فحص صور المجهر الإلكتروني الماسح (**SEM**) المأخوذة

من أسطح الطلاء، تبيّن أن سمك الطلاء كان حوالي616 ميكرومتر، وأن هناك فجوات وعيوب تشققات ضئيلة على السطح. ووفقًا لصور **EDX**، حُددت العناصر السائدة على أنها (**Co, W, C**) ، وتم أستنتاج أن العناصر موزعة بشكل متجانس وفقًا لصور رسم العناصر.

وفقًا لنتائج تحليل حيود الأشعة السينية (**XRD**) لتحديد سطح الطلاء وأطواره، تبيّن أن سبيكة **Fe3W3C** تشكلت نتيجة لمحلول الحالة الصلبة المتشكل مع مادة المصفوفة، وأن طوري **WC** و**W2C** كانا شديدي الكثافة. ووفقًا لنتائج قياس الصلابة الدقيقة، تبيّن أن قيم الصلابة في المناطق التي تشكّل فيها طورين **WC** و**W2C** كانت ~757 **HV** و~1250 **HV** على التوالي.

وفقًا لنتائج معامل الاحتكاك التي أُجريت في ظروف المياه النقية والجافة، تبيّن أن معامل الاحتكاك للعينة غير المطلية في بيئة المياه النقية(23 %) كان أقل من البيئة الجافة (30%). ويرتبط هذا الوضع بانخفاض إجهادات الضغط والقص لطبقة الغشاء السائل. وقد تبين أن معامل الاحتكاك (0.023) للعينة غير المطلية في بيئة الماء النقي كان متساويًا مع معامل الاحتكاك (0.023) للعينة المطلية في البيئة الجافة. ويُفسر ذلك بأن الصلابة التي تزداد مع طبقة الطلاء تُعطي تأثير الماء النقي. كما لوحظ وجود فجوة تعرية كبيرة على أسطح العينات غير المطلية مقارنةً بالعينات المطلية.

وفقًا لصور المجهر الإلكتروني الماسح التي تم الحصول عليها بعد اختبارات التعرية، فقد تم تحديد أن عرض ندبة التآكل والتعرية كان مم في الظروف الجافة وميكرومتر في ظروف المياه النقية. وقد لوحظ أن آلية التآكل الكاشطة الأكثر سطحية تحدث في ظروف المياه النقية مقارنة بالظروف الجافة.

وفقًا لصور التضاريس ثلاثية الأبعاد المأخوذة من أسطح التآكل والتعرية، تبيّن أن درجات اللونين الأحمر والأزرق كانت عالية بسبب خشونة عالية في العينات غير المطلية، بينما كانت درجات اللونين الأصفر والأخضر شديدة بسبب انخفاض التشوه في العينات المطلية. تتوافق نتائج صور التضاريس ثلاثية الأبعاد مع نتائج صور المجهر الإلكتروني الماسح.

المراجع:

[1] J. W. Martin, “Concise Encyclopedia of the Mechanical Properties of Materials”, Elsevier Science & Technology, Oxford, United Kingdom (2010).

[2] Bert Verlinden, Julian Driver, Indradev Samajdar, Roger D. Doherty, “Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials: Volume 11”, Elsevier Science & Technology, Oxford, United Kingdom (2009).

[3] S. Maya-Johnson et al. Dry and lubricated Wear of rail steel under rolling contact fatigue - Wear mechanisms and crack growth, Wear (2017)

[4] Raghs, Bilgehan Kondul, Muhammet Huseyin cetin. Investigation of wear behavior of boronized H13 steel under environment of nano-silver-added lubricants coated with different ligands (2020).

[5] Bhaduri,, Amit, “Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys”, Springer Nature Switzerland (2018).

[6] Holmberg, K. and A. Matthews. “Tribology of Engineered Surfaces.” Wear: Materials, Mechanisms, and Practice. Ed. Gwidon W. Stachowiak. John Wiley and Sons, Ltd. Hoboken, NJ. p.123 (2009)

[7] Wole Soboyejo, “Mechanical Properties of Engineered Materials”, CRC Press, United Kingdom (2019).

[8] Joshua Pelleg, “Mechanical Properties of Materials”, Springer Science & Business Media, United Kingdom (2012).

[9] D. Nikas et al. Mechanical properties and fatigue behaviour of railway wheel steels as influenced by mechanical and thermal loadings (2016).

[10] Z.K. Fu et al. Investigation on microstructure and Wear characteristic of laser cladding Fe-based alloy on wheel/rail materials (2015).

[11] Abdel Salam Makhlouf, Mahmood Aliofkhazraei , “Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries”, 1st Edition, Elsevier Science & Technology (2015).

[12] I.Saravanan, A.Devaraju, Ganesh babu, “Investigation of Surface Treatment process on stainless steel and its effects for tribological (2020).

[13] L. Qiao et al. Wet abrasive Wear behavior of WC-based cermet coatings prepared by HVOF spraying (2021).

[14] Q. Yang et al. Sliding wear wehavior of WC-12% co coatings at elevated temperatures (2006).

[15] B. Somasundaram et al. Wear behavior of HVOF sprayed WC-Co/NiCrAlYSi (35–65%) and WC-Co/NiCrAlYSi (80–20%) coatings on turbine SS316 steel (2020).

[16] Xue Han, Zhenpu Zhang, Jiayu Hou, “Tribological behavior of surface treatment/ austempered AISI 5160 steel”, Tribology International, (2020).

[17] Cheng, X., Jiang, Z., Wei, D., Hao, L., Wu, H., Xia, W., Zhang, X., Luo, S., and Jiang, L., "Effects of surface preparation on tribological behaviour of a ferritic stainless steel in hot rolling", (2017).

[18] Cetin, M. H. and Korkmaz, S., "Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method", (2020).

[19] Vashishtha, N., Khatirkar, R. K., and Sapate, S. G., "Tribological behaviour of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr3C2−25NiCr coatings", (2017).

[20] Ian Hutchings, Philip Shipway, “Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials”, Spedizione Gratis & Amazon (2017).

[21] O. Yazici et al. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive Wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels Tribol (2018).

[22] . Pan, Q. and Lu, L., “Improved Fatigue Resistance of Gradient Nanograined Metallic Materials: Suppress Strain Localization and Damage Accumulation”, (2020).

[23] S. Maya-Johnson et al. Dry and lubricated Wear of rail steel under rolling contact fatigue - Wear mechanisms and crack growth (2017).

[24] Ma, L., He, C. G., Zhao, X. J., Guo, J., Zhu, Y., Wang, W. J., Liu, Q. Y., and Jin, X. S., "Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions", (2016).