Araid Journal of Science and Technology
Higher Institute of Science and Technology-Shmokh

مجلة الرائد للعلوم والتقنية
المعهد العالي للعلوم والتقنية ـ الشموخ

تاريخ الإستلام: 29-05-2026 | تاريخ القبول: 24-06-2026 | تاريخ النشر: 30-06-2026

تعزيز وتحسين مقاومة التعرية و الكشط لمادة الحديد الزهر عن طريق المعالجة السطحية

حمدى عبد الحميد حسن رقص
الهندسة الميكانيكية، كلية الهندسة، جامعة عمر المختار، ليبيا
hamdi.raghs@omu.edu.ly

الملخص

في هذه البحث، تم دراسة تأثير طلاءات كربونات نتريد التيتانيوم **(TiCN) Titanium Carbonitride** و كربيد التنغستن **(WC) Tungsten Carbide** على الأداء الاحتكاكي لحديد الزهر الجرافيتي من خلال اختبارات التعرية (**wear tests**), وتم تحليل التأثيرات الميكانيكية لعمليات الطلاء باستخدام قياسات الصلابة وتقنيات التصويرالمجهر الإلكتروني (**SEM**) و حيود الأشعة السينية (**XRD**) و تحليل الأشعة السينية المشتتة للطاقة (**EDX**). تم التحقق من التأثير الاحتكاكي لعينات **TiCN , WC** المطلية والغير مطلية**(coated and uncoated)** عن طريق اختبارات التعرية والأحتكاك على الصفيحة التي أجريت في ظل ظروف جافة وكذلك مع زيت البورون. تم الحصول على قيم معامل الاحتكاك وحجم التآكل وذلك لدراسة تأثير عملية الطلاء وزيت البورون على سلوك الاحتكاك و التعرية. وتم تحديد آليات التعرية باستخدام (**SEM**) المأخوذة من الأسطح المتآكلة، كما تم تحليل العناصر المكونة للأسطح باستخدام (**EDX**). بالإضافة إلى ذلك، تم قياس خشونة السطح وأستخدم الصور الطبوغرافية ثنائية وثلاثية الأبعاد (**2D - 3D**) لدراسة تغيرات شكل السطح. أظهرت نتائج تحليل مورفولوجيا السطح انخفاض قيم الخشونة في التجارب التي استخدام فيها زيت البورون، بينما حسن طلاء **TiCN** جودة السطح. كما تدعم صور شكل السطح ثنائية وثلاثية الأبعاد هذا التغيير لقيم الخشونة. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل وتحسين أداء مقاومة التعرية لحديد الزهر الجرافيتي المطلي بـ **WC-Co** و **TiCN** في بيئة جافة وبيئة زيت البورون.

الكلمات الدالة: المجهر الإلكتروني الماسح (**SEM**)، تحليل الأشعة السينية لتشتيت الطاقة (**EDX**)، حديد الزهر الجرافيتي, كربونيتريد التيتانيوم **(TiCN)** معامل الاحتكاك، اختبارات التعرية والأحتكاك, طلاء كربيد التنغستن (**WC**)، الرش الحراري عالي السرعة بالأكسجين (**HVOF**), حيود الأشعة السينية (**XRD**), الترسيب الفيزيائي للبخار(**PVD**).

Enhancement of wear and abrasion resistance of cast iron material by surface treatment

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

ABSTRACT

In In this research, the effect and effectiveness of industrial coatings Titanium Carbonitride (TiCN) and Tungsten Carbide,(WC-Co) on the tribological performance of cast iron was investigated through wear test under lubricated and dry conditions. Mechanical effect of the coating were analysed using imaging and visual methods, X-Ray Diffraction(XRD), Energy Dispersive X-ray analysis (EDX), Scanning Electron Microscope (SEM), and measurements of micro hardness. The friction coefficient and wear volume (tribological effect) of coated samples were investigated using wear test performed under dry conditions and with boron oil. Abrasion mechanisms were identified using (SEM) taken from worn surfaces, as well as elemental analysis of the surfaces using (EDX), Furthermore, measurements f surface roughness and 3D topographic images were used to examine surface morphology. When studying the effect boron oil on wear resistance compared to dry environmental, the coefficient of friction and the wear volume reduced, analysis of surface morphology revealed decrease in roughness values in tests which using boron oil.Therefore, in the present study, the wear performance of graphite cast iron material will be improved by coating and using boron oil.

Keywords: Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive X-ray analysis (EDX), X-Ray Diffraction(XRD), Friction Coefficient, Tungsten Carbide (WC-Co), Titanium Carbonitride (TiCN), High Velocity Oxygen Fuel (HVOF), Physical vapor deposition (PVD), graphite cast iron, wear test.

1. المقدمـة

تستقطب أسطوانات الدرفلة الساخنة المصنوعة من حديد الزهر ذي الجرافيت الكروي اهتمامًا متزايدًا كبديل لمادة الفولاذ عالي السرعة. تتميز هذه المادة بخصائص ملائمة لعملية الدرفلة بفضل خواصها الميكانيكية الفائقة (مقاومة التآكل والتعرية، وقوة الشد، ومقاومة الأكسدة في درجات الحرارة العالية، ومقاومة الإجهاد، وقدرة امتصاص الاهتزازات، وليونة عالية، وقابلية عالية للتشغيل والتشكيل) [1-2]. مع ذلك، فإن ظروف التشغيل الصعبة الناتجة عن درجات الحرارة العالية والأحمال الثقيلة والسرعات العالية تُقلل من مقاومة التآكل والتعرية لأسطوانات الدرفلة الساخنة المصنوعة من حديد الزهر ذي الجرافيت الكروي. توجد دراسات منشورة حول زيادة مقاومة التآكل والتعرية لحديد الزهر ذي الجرافيت الكروي من خلال تقوية العناصر السبيكية وطرق المعالجة الحرارية [3-4]. إلا أن هذه الطرق تُحدث تغييرات في كلٍ من البنية السطحية والداخلية للمادة، مما يؤدي إلى انخفاض الليونة وقابلية التشكيل. وللحد من هذه المشكلة، تستقطب عمليات طلاء الأسطح، التي تُحسّن الخصائص الاحتكاكية من خلال تغيير البنية الفيزيائية والكيميائية لسطح المادة فقط، اهتمامًا متزايدًا وخاصة في المجال الصناعي، يمكن زيادة صلابة المواد ومقاومتها للتآكل والتعرية بشكل كبير بفضل طلاءات **Ti, WC** [5-6]. إن حقيقة أن طبقات كربيد التنجستن والتيتانيوم تزيد بشكل ملحوظ من صلابة المادة (حوالي 1500 **HV**) وتوفر مقاومة عالية للتآكل

والتعرية عند درجات الحرارة المرتفعة (حتى 400 درجة مئوية) لها أهمية بالغة للأداء الاحتكاكي [7-8]. وقد تناولت دراسات منشورة أداء التآكل والتعرية لمواد حديد الزهر الكروي الجرافيتي المطلية بكربيد التنجستن وكربيد التيتانيوم وتأثير عملية الطلاء على الأداء الاحتكاكي من خلال فحص البنية المجهرية وسلوك التآكل والتعرية لحديد الزهر الكروي الجرافيتي المطلي بكربيد التيتانيوم. وبناءً على نتائج الدراسات المنشورة، تبين أن طلاءات **WC** و**TiC** تزيد من مقاومة التآكل لمادة حديد الزهر الكروي الجرافيتي في ظروف درجات الحرارة العالية والأحمال الثقيلة. ومع ذلك، لا توجد دراسات كافية تتناول سلوك التآكل لمادة حديد الزهر الكروي الجرافيتي المطلية سطحيًافي بيئة تشحيم [9-10]. أظهرت الدراسات المنشورة أن طلاءات كربيد التنجستن (**WC**) وكربيد نتريد التيتانيوم (**TiCN**) تزيد من مقاومة المواد للتآكل والتعرية. مع ذلك، اقتصرت هذه الدراسات على بحث تأثير هذه الطلاءات على مقاومة حديد الزهر ذي الجرافيت الكروي للتآكل في الظروف الجافة[11-12]. يمنع الشكل الكروي لتركيب الجرافيت زيادة الإجهاد التي تحدث في الجرافيت الصفائحي، مما يمنح المادة متانة وقوة عالية وليونة. وبفضل هذه الخصائص المميزة، يُستخدم حديد الزهر ذو الجرافيت الكروي على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية والهندسية. مع ذلك، فإن انخفاض مقاومته للتآكل تحت الأحمال الثقيلة ودرجات الحرارة العالية يحد من استخدامه. [13-15].

2.المواد والطرق التقنية المستخدمة:

1.2. عينات الاختبار وعملية الطلاء:

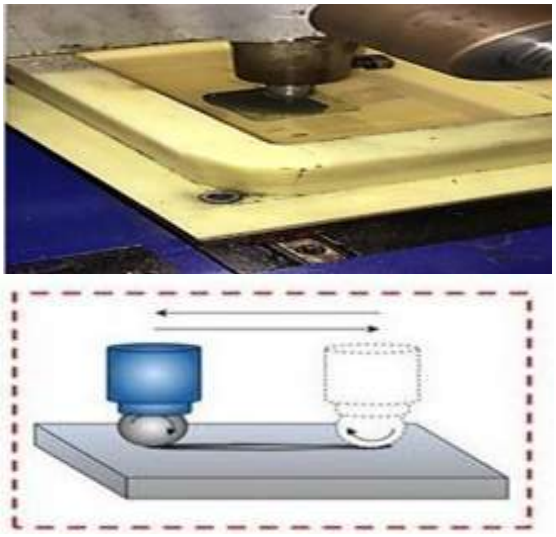
نظرًا لقوته العالية ومقاومته للتآكل والتعرية وسهولة تشكيله فقد استخدمت قطعة من حديد الزهر ذي الجرافيتي الكروي بقطر 30 mm وسماكة 7mm كقطعة عمل, إن امتلاك الجرافيت لخصائص التوصيل الحراري ومقاومة الحرارة، بالإضافة إلى خصائص التشحيم، يحسن الأداء الاحتكاكي للمادة. علاوة على ذلك، يتم الحصول على الجرافيت الكروي بإضافة 0,03% – 0,08% من المغنيسيوم إلى الحديد المنصهر أثناء إنتاج المادة.

طبقت عمليات طلاء **WC-Co** و**TiCN** لتحسين مقاومة التآكل والتعرية للحديد الزهر ذي الجرافيت الكروي. وقد فضل استخدام طلاء **WC-Co** و**TiCN** لكونهما أكثر مواد الطلاء شيوعًا في المجال الصناعي [16-18]**.** يمنح طلاء **WC-Co** المادة صلابة عالية ومقاومة للتآكل والتعرية والتآكل الكيميائي ومقاومة للأكسدة عند درجات الحرارة العالية وقد فضل استخدام طريقة الرش الحراري عالي السرعة (**HVOF**) الشائعة الاستخدام في المجال الصناعي لعملية طلاء **WC-Co**، وباستخدام هذه الطريقة يمكن تحقيق وتوليد طاقة حركية عالية عند درجات حرارة أقل مقارنةً بالطرق الأخرى[20-22]. بهذه الطريقة يقل الإجهاد الحراري الذي يتعرض له الطلاء ولا تتأثر خصائص المادة سلبًا، وبالمقارنة مع الطرق الأخرى يمكن الحصول على سطح طلاء ذي مسامية منخفضة ، ويمكن زيادة عمر خدمة المادة بفضل قدرتها العالية على الالتصاق [24-25]. تتميز الطلاءات القائمة على التيتانيوم بثباتها الكيميائي والحراري العالي، وصلابتها العالية، وقوتها الميكانيكية العالية وتظهر طلاءات **TiCN** أداءً تريبيولوجيًا فائقًا في المجال الصناعي. في هذه الدراسة، تم تفضيل طريقة الترسيب الفيزيائي للبخار (**PVD**) لعملية طلاء **TiCN**. فمقارنةً بطريقة الترسيب الكيميائي للبخار، تُنتج طريقة الترسيب الفيزيائي للبخار أغشية رقيقة ذات التصاق أقوى بمادة المصفوفة عند درجات حرارة منخفضة [26-29].

بفضل إجراء العملية في درجات حرارة منخفضة، لا تتأثر المتانة الميكانيكية والبنية الكيميائية للمادة الأساسية سلبًا بالتأثيرات الحرارية. إضافةً إلى ذلك، يمكن تقليل التغير في الخصائص للمادة إلى أدنى حدٍّ ممكن بتكوين طبقة رقيقة مقارنةً بطريقة الترسيب الكيميائي للبخار **(CVD)** . وبهذه الطريقة يمكن تحسين الأداء الميكانيكي والاحتكاكي للمادة الأساسية مع الحفاظ على خصائصها الفيزيائية والكيميائية[30-32].

2.2. أختبارات التعرية والكشط:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل أداء مقاومة التعرية لحديد الزهر ذي الجرافيت الكروي المطلي بـ **WC-Co** و **TiCN** في بيئة جافة وبيئة زيت البورون المحضر بتركيز 5%. استخدمت عينة من حديد الزهر ذي الجرافيت الكروي البيرليتي المطلي بـ **WC-Co** و **TiCN** كعينة لأختبار التعرية ، بينما استخدمت قطعة من فولاذ **AISI 52100 (100Cr6)** بقطر 6 **mm** وصلابة 62 **HRC** كمادة كاشطة. يُبين الجدولان (2,1) التركيب الكيميائي للمواد المستخدمة في التجارب. أُجريت التجارب في ظروف جافة وفي وجود زيت البورون، مع ثبات الحمل والسرعة. تم تحليل تأثير عملية الطلاء ومستحلب زيت البورون على سلوك الاحتكاك باستخدام قيم معامل الاحتكاك المقاسة بجهاز قياس الاحتكاك أثناء التجارب.



شكل(1) صورة لمنصة اختبار التعرية

جدول (1) التركيب الكيميائي للحديد الزهر الجرافيتي

التركيب الكيميائي	C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	Mo
(%)	3.8	0.4	2.0	0.1	2.2	0.5	0.5

3.2. تحليل فقدان الحجم وشكل السطح:

لتحليل كمية التشوه الناتج عن التعرية كميًا، تم قياس فقدان الحجم وقيم خشونة السطح ، وتم تحليل مورفولوجيا سطح المواد المطلية بـ **WC-Co** و **TiCN** على مرحلتين: توصيف الطلاء وتوصيف آلية التعرية. ولتوصيف الطلاء أُجريت قياسات الصلابة على فترات محددة من أسطح العينات المطلية بـ **WC-Co** و **TiCN**. كما تم الحصول على صور **SEM** و **EDX** و **XRD** لتحديد سماكة الطلاء، وإجراء التحليل العنصري. وقورنت قيم الصلابة وتحليلات الصور المستخلصة من العينات المطلية بالعينات غير المطلية. علاوة على ذلك، تم تحليل صور **SEM** والتضاريس ثلاثية الأبعاد لفحص جودة السطح وتحديد آليات التعرية التي تحدث في مناطق التشوه, في تحليل **EDX** استخدمت الطريقة الخطية وطريقة رسم الخرائط وتحليل العناصربواسطة تحليل الأشعة السينية **EDX**.

شكل(2) جهاز قياس الصلابة

شكل(3) المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)

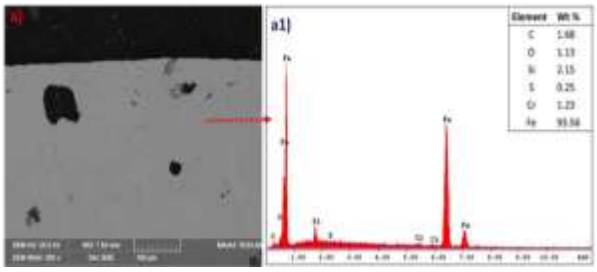
3. نتائج التجارب المعملية والمناقشة:

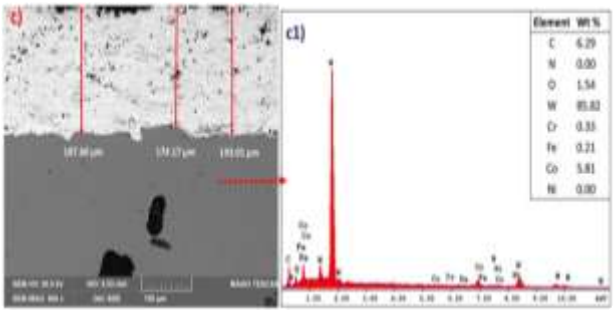
في البداية، تم إجراء توصيف معدني للمادة الأساسية وطبقات الطلاء. وفي الخطوة الثانية، تم تحليل نتائج اختبارات التعرية والكشط التي أجريت في بيئات جافة وبيئات تحتوي على زيت البورون.

1.3. توصيف الطلاء:

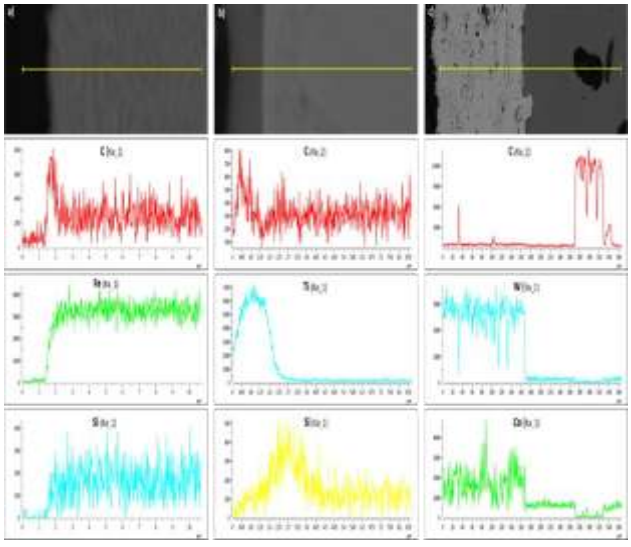
تم التقاط صور مجهرية إلكترونية ماسحة (**SEM**) من مقاطع عرضية لعينات المادة الأساسية والمواد المطلية، وخضعت هذه الصور لتحليل العناصر باستخدام (**EDX**) (الشكل 4). كما أُجري تحليل **EDX** على طول الخط لتحديد التغيرات العنصرية في طبقات الطلاء والمادة الأساسية (الشكل 5). يظهر الرسم البياني في الشكل 4 أن المناطق السوداء الكروية الظاهرة في الشكل هي جرافيت، وكذلك يظهر طبقة طلاء رقيقة من **TiCN** بمتوسط سمك 1.70 ميكرومتر.

التصق طلاء **TiCN** بسطح المادة بسماكة متجانسة ولم يلاحظ أي تشققات أو فراغات. يظهر الشكل 4 (**c**) أن طبقة طلاء **WC** تتميز بسماكة متوسطة تبلغ 180 ميكرومتر وبنية متجانسة وخالية من العيوب وتتغلغل حتى نقاط خشونة السطح. يظهر الشكل 5(**c**) توزيع عنصر الكربون بشكل متجانس في كل من طبقة الطلاء ومادة الحديد الزهر. يعتبر التشابه في توزيع عنصر الكربون في كلتا المادتين مهمًا لفهم التوافق المميز بين الطلاء والمادة الأساسية وقد تشكلت ذروة للكربون فقط في المستوى الذي يوجد فيه الجرافيت الكروي. بالإضافة إلى ذلك، يعمل عنصر الكوبالت كمادة رابطة بين المادة الأساسية ومادة الطلاء.



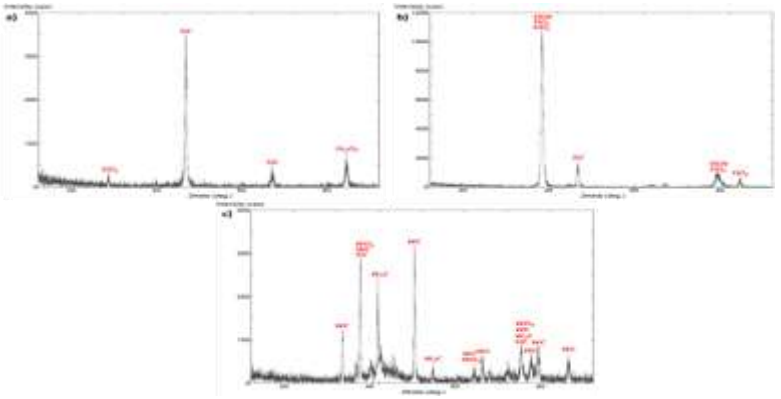


شكل(4) صور المجهر الإلكتروني الماسح ونتائج قياس **EDX** (**a**) المادة الأساسية، (**b**) المادة المطلية بـ **TiCN** , (**c**) المادة المطلية بـ **WC-Co**

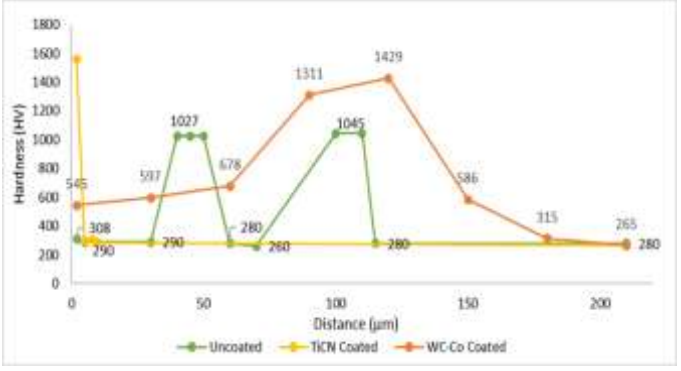


شكل(5) نتائج قياس طول الخط **EDX** (**a**) المادة الأساسية، (**b**) المادة المطلية بـ **TiCN** و (**c**) المادة المطلية بـ **WC-Co**

يظهر مخطط حيود الأشعة السينية **(XRD)** في الشكل 6 تكون مركبات كربيد السيليكون (**SiC**) وأكسيد الحديد الثلاثي (**Fe_2O_3**) في مادة الحديد الزهر. وقد تبين أن صلابة المادة تزداد في المناطق التي تتواجد فيها سبيكة كربيد السيليكون ضمن مصفوفة الحديد . في مخطط الصلابة في الشكل 7، يلاحظ أن قيمة صلابة مادة الحديد الزهر غير المطلية تبلغ حوالي 295 HV، وترتفع هذه القيمة إلى حوالي 1010 HV في المناطق التي يتواجد فيها مركب كربيد السيليكون. بحسب الشكل 6 (**b**)، تبين عدم حدوث تمايز في سبيكة طلاء **TiCN.** ووفقًا لمنحنى الصلابة انخفضت صلابة طلاء **TiCN** من 1560 **HV** إلى 309 **HV** ويعزى هذا الانخفاض المفاجئ في منحنى الصلابة إلى غياب منطقة انتقاليةأو إلى وجود منطقة انتقالية ضئيلة جدًا نظرًا لسمك طلاء **TiCN** الذي يبلغ حوالي 2 ميكرومتر. في الشكل 6 (**c**)، يلاحظ تكون مركبي **WC** و**W_2C** بكثافة في المادة االمطلية بـ **WC**. ويعزى وجود مركب **W_2C** إلى عملية إزالة الكربون وتأكسد **WC**. في الشكل 6 (**c**) لا يوجد فرق ملحوظ في درجة اللون بين المناطق التي تحتوي على مركبي **WC** و**W_2C**. مع ذلك عند فحص منحنى الصلابة ، يتبين أن قيمة الصلابة تبلغ حوالي **HV**590 في المناطق التي تحتوي على مركب **WC**، وترتفع هذه القيمة إلى حوالي **HV**1420 في المناطق التي تحتوي على مركب **W_2C** (الشكل 7).



شكل(6) نتائج قياس **XRD** (**a**) المادة الأساسية، (**b**) المادة المطلية بـ **TiCN** ,(**c**) المادة المطلية بـ**WC−Co**



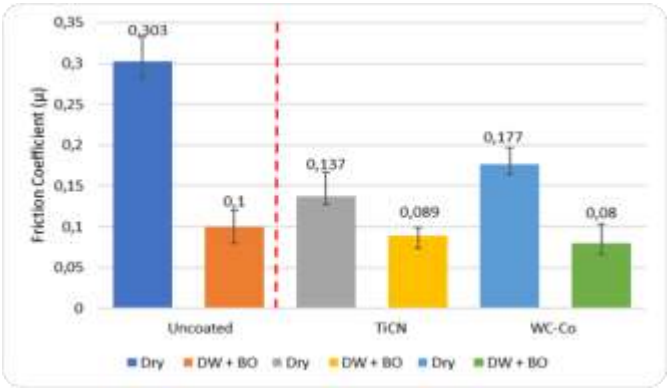
شكل(7) نتائج قياس الصلابة (**a**) المادة الأساسية، (**b**) المادة المطلية بـ **TiCN** و (**c**) المادة المطلية بـ **WC-Co**

2.3. سلوك الاحتكاك والتعرية:

تتولد قوى الاحتكاك نتيجة للقوى المماسية الناتجة عن تأثير معامل الاحتكاك والذي يختلف تبعًا للخصائص الميكانيكية للمواد وجودة السطح والظروف البيئية على الأسطح المعرضة للتآكل والتعرية. في الأنظمة التي تعمل تحت ظروف تحميل ثقيلة للغاية تؤدي معاملات الاحتكاك العالية إلى زيادة استهلاك الطاقة وانخفاض الكفاءة نتيجة لقوى الاحتكاك الناتجة. يعتبر تقييم معامل الاحتكاك أمراً بالغ الأهمية لأداء النظام وعمر المواد.

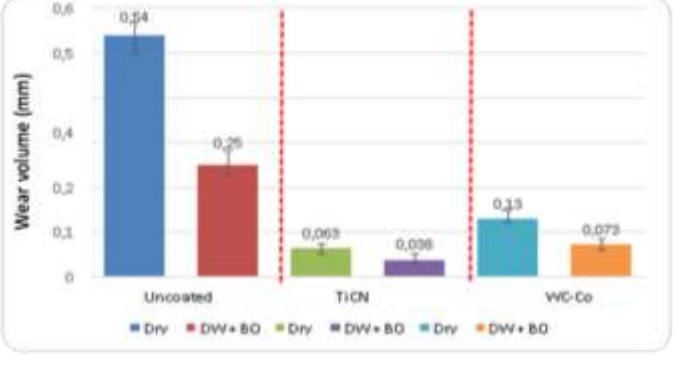
تم الحصول على قيم معامل الاحتكاك في نطاق هذه الدراسة، وهي موضحة في الشكل(8) و يتضح أن طلاءات **TiCN** و**WC-Co** تقلل معامل الاحتكاك بنسبة 55 % ، 42 % على التوالي، مقارنه بالسطح غير المطلي في الظروف الجافة. ازدادت كمية الكربيد على السطح بفضل طبقات **TiCN** و**WC-Co** المدمجة فيه مما أدى إلى زيادة صلابة المادة، إضافه إلى ذلك يعد التركيب غير المتبلور لطبقة **TiCN** وتكون مركب **W2C** أثناء طلاء **WC-Co** من العوامل الأخرى التي تزيد الصلابة. وبفضل زيادة صلابة السطح والتجانس المورفولوجي للأسطح المطلية تم الحصول على قيم أقل لمعامل الاحتكاك مقارنه بالسطح غير المطلي.

عند دراسة تأثير الظروف البيئية على معامل الاحتكاك، لوحظ انخفاض معامل الاحتكاك في ظروف التشحيم مقارنه بالظروف الجافة. ووفقاً للشكل 8، فقد تبين أن مستحلب زيت البورون قد خفض معامل الاحتكاك للمواد غير المطلية والمواد المطلية بـ **TiCN**، والمواد المطلية بـ **WC-Co** بنسبة 67 %، 35.%، 55 % على التوالي. باستخدام زيت البورون تتشكل طبقة تشحيم حدودية بين المواد مما يقلل المقاومة والالتصاق بينها وهذا يسهل حركة المادة الكاشطة مما يؤدي إلى انخفاض معامل الاحتكاك وتؤكد الدراسات السابقة هذه النتيجة.



شكل(8) معاملات الاحتكاك للمواد غير المطلية والمطلية في ظل ظروف التزييت والجافة

في المواد المتلامسة يزداد مقدار التعرية طرديًا مع زيادة معامل الاحتكاك بين الأسطح. وكذلك يتوقع حدوث تعرية أكبر في المواد ذات المقاومة المنخفضة كما يتوقع انفصال جزيئات كبيرة الحجم عن المادة. بحسب الظروف المذكورة، بالإضافة إلى انخفاض الحجم تنخفض جودة السطح أيضاً في المواد المعرضة للتعرية. مع ذلك في ظروف التعرية في البيئات السائلة يتوقع انخفاض معامل الاحتكاك وفقدان الحجم مقارنه بظروف البيئة الجافة وذلك نتيجة لتكون طبقة تشحيم وزيادة مقاومة التعرية والاحتكاك. يوضح الشكل 9 قيم فقدان الحجم المستخلصة من تحليل السطح ثنائي الأبعاد ضمن نطاق الدراسة. ووفقاً للشكل 9 ، في الظروف الجافة يقلل طلاء **TiCN** وطلاء **WC-Co** حجم التعرية بنسبة 88% و76 % على التوالي، مقارنه بالسطح غير المطلي ويعزى هذا الانخفاض الكبير في حجم التعرية إلى زيادة صلابة السطح في طلاء **TiCN** و**WC-Co** وهذايشير إلى إمكانية زيادة مقاومة التعرية لمادة حديد الزهر ذي الجرافيت الكروي بشكل ملحوظ بفضل طلاء **TiCN** وطلاء **WC-Co**. وفقاً للشكل 9 ، تبين أنه في ظل ظروف مستحلب زيت البورون انخفض حجم التعرية للمواد غير المطلية والمواد المطلية بـ **TiCN**، والمواد المطلية بـ **WC-Co** بنسبة 53.8 %، و39.7 %، و43.9 % على التوالي مقارنه بالظروف الجافة.



شكل(9) أحجام التآكل للمواد غير المطلية والمطلية في ظل ظروف التزييت والجافة

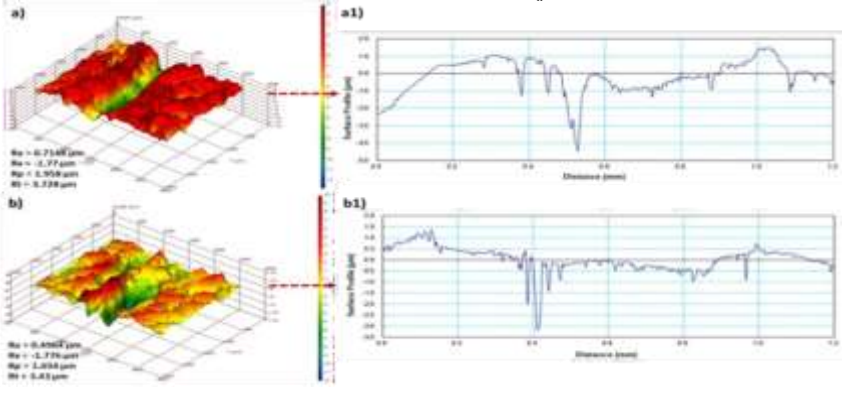
3.3.تحليل مورفولوجيا السطح:

وقد ذكر في الدراسات السابقة أن الحرارة العالية الناتجة عن تأثير الاحتكاك في منطقة التلامس للمواد لا يمكنها خلق توزيع متجانس لدرجة الحرارة على السطح بسبب عدم انتظام خشونة السطح خاصة عند نقاط الخشونة العالية يتوقع زيادة في انتقال الحرارة ، يحدث تشوه على الأسطح الخشنة بسبب التمدد والانكماش على المستوى الميكروي

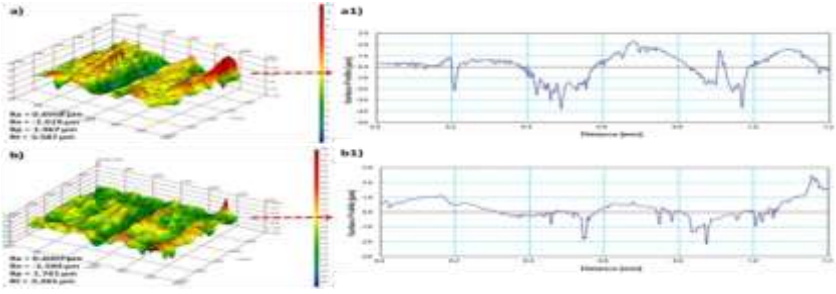
الناتج عن التوزيع غير المتساوي للطاقة الحرارية، تعد التشوهات من أهم العوامل التي تؤثر سلباً على مورفولوجيا السطح. تم فحص صور مقياس التضاريس ثنائية وثلاثية الأبعاد وقيم خشونة السطح لتحليل مورفولوجيا سطح المناطق المتآكلة والمتعرية, ولزيادة موثوقية التحليلات تم الحصول على صور ثنائية وثلاثية الأبعاد للأسطح باستخدام أجهزة قياس مختلفة. وتعرض صور مقياس التضاريس ثنائية وثلاثية الأبعاد وقيم الخشونة للعينات غير المطلية، والمطلية بـ **TiCN**، والمطلية بـ **WC-Co** على التوالي في الأشكال (10,11، 12).

في الصور الطبوغرافية الموضحة في الأشكال 10، 11، 12، يمثل اللونان الأصفر والأخضر المناطق المستوية وشبه المستوية، بينما يمثل اللون الأحمر نقاط الارتفاع، ويمثل اللون الأزرق نقاط العمق وتشير الكثافة العالية للونين الأصفر والأخضر إلى شكل سطح مستوٍ مثالي. يظهر الشكل 10 (**a**), صور طبوغرافية ثلاثية الأبعاد وصور ثنائية الأبعاد لسطح عينة غير مطلية تعرضت للعوامل الجوية في ظروف جافة. في الشكل10 (**a**) يلاحظ أن المناطق الحمراء أكثر وفرة مقارنة بالحالات الأخرى، وأن السطح متموج، أما في صور سطح العينة المطلية بـ **TiCN** الشكل11(**a**)، فيلاحظ أن اللون الأحمر قليل، وأن المناطق الصفراء والخضراء كثيفة وأن عرض وعمق مسار التعرية قد انخفضا. بحسب صور سطح العينة المطلية بـ **WC-Co** (الشكل12 (**a**)، تسببت الحرارة العالية المتولدة في منطقة التشوه في تكوين مصادر دقيقة مما أدى إلى ظهور نتوءات خشونة وقد حالت كثافة هذه النتوءات دون التوزيع المتجانس للطاقة الحرارية في المنطقة، مما أدى إلى تكوين سطح غير منتظم. تشير الصور الطبوغرافية للعينات غير المطلية والمطلية بـ **TiCN** إلى تشكل تآكل كاشط منتظم، بينما تشير الصورة الطبوغرافية للعينة المطلية بـ **WC-Co** إلى تشكل مزيج من التعرى الزاحف والتعرى الالتصاقي. يمكن القول إن طوري كربيد التنجستن (**WC**) وثنائي كربيد التنجستن (**W2C**) فعالان في تكوين آليات تعرية مختلفة في العينة المطلية بكربيد التنجستن، وقد أثرت صلابة كربيد التنجستن (حوالي **HV** 500) وصلابة ثنائي كربيد التنجستن (حوالي **HV** 1400) على تغير خصائص التعرية. انتشرت طبقة كربيد التنجستن (**WC**) على السطح ومع استمرار الاحتكاك تراكمت مادة كربيد التنجستن على حواف منطقة التآكل والتعرية.

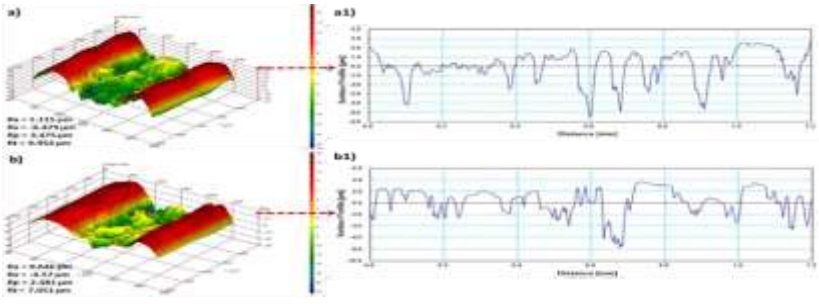
في العينات المحفورة في مستحلب زيت البورون، مقارنة بالعينات الجافة، انخفضت مساحة المناطق الحمراء بينما زادت مساحة المناطق الصفراء والخضراء مما يدل على استواء السطح (الشكل10(**b**)، الشكل11(**b**)، والشكل 12(**b**)) ولأن مستحلب زيت البورون شكل طبقة رقيقة بين المادتين فقد ساهم ذلك في توزيع متجانس للطاقة الحرارية على السطح مما أدى إلى سطح أقل تموجاً مقارنة بالعينات الجافة. بسبب الترابط القوي بين ذرات البورون والهيدروجين والأكسجين التي تشكل مركب حمض البوريك فإن كل طبقة تتشكل عند سطح التعرية لها بنية قوية مما يزيد من قدرة تحمل الغشاء المتكون من مستحلب زيت البورون. علاوة على ذلك، فإن الكثافة المنخفضة لزيت البورون (**g/ml** 0.085) تسهل انتشاره المتجانس في الماء النقي مما يزيد من تغلغله في منطقةالتعرى, وبفضل قدرته العالية على تحمل الأحمال وقدرته على التغلغل يقلل مستحلب البورون من خشونة السطح ويحسن جودته، وذلك حسب النتائج المستخلصة من الصور الطبوغرافية ثلاثية الأبعاد والنتائج المستخلصة من صور مقياس التضاريس ثنائي الأبعاد وقياسات الخشونة.



شكل(10) صور تضاريس السطح لسطح غير مطلي تم تشكيله في (**a**) بيئة جافة , (**b**) بيئة زيت البورون



شكل(11) صور تضاريس لسطح مطلي بـ **TiCN** في **(a)** بيئة جافة , **(b)** بيئة زيت البورون



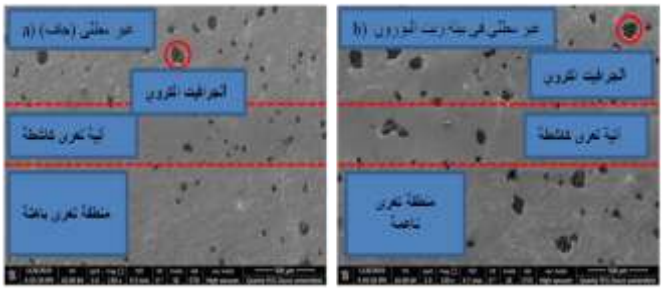
شكل(12) صور تضاريس للأسطح المطلية بـ **WC-Co** في **(a)** بيئة جافة , **(b)** بيئة زيت البورون

تعتبر تحليلات المجهر الإلكتروني الماسح (**SEM**) ضرورية لفهم آليات التعرية بشكل أفضل. ولذلك تم تحليل صور المجهر الإلكتروني الماسح الملتقطة من الأسطح المتآكلة بالتزامن مع نتائج تحليل تشتت طاقة الأشعة السينية (**EDX**). في صور المجهر الإلكتروني الماسح، تحدد منطقة التعرية على كل عينة بخط متقطع. وكذلك يمكن ملاحظة آليات التعرى الكاشط والالتصاق في صور المجهر الإلكتروني الماسح. علاوة على ذلك، يلاحظ وجود الجرافيت الكروي في العينات غير المطلية والمطلية بـ **TiCN** (الشكل13 **(a), (b)**, الشكل14 **(a)**, **(b)**). ونظرًا لأن عمق التعرية بلغ أقصى قيمة له عند حوالي 10 ميكرومتر، لم تلاحظ طبقات الجرافيت اعتماداً على سمك العينة المطلية بـ **WC** (حوالي 180 ميكرومتر) الشكل15 **(a)**, **(b)**

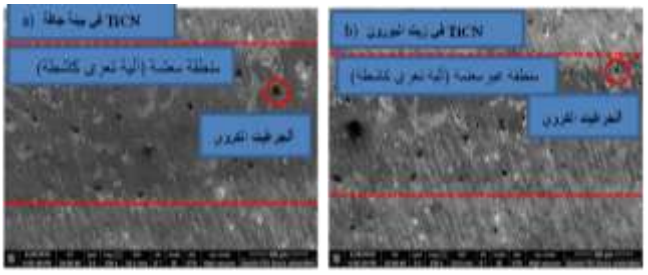
لوحظت آلية تعرى كاشطة في العينة غير المطلية؛ ومع ذلك، لم تلاحظ أي تكونات لحام دقيقة أو جزيئات مدمجة (الشكل13**(a),(b)**) في حين كانت خطوط التعرية مرئية في العينة غير المطلية في الظروف الجافة (الشكل13 **(a)**)، لم يلاحظ أي خطوط تآكل في وسط زيت البورون (الشكل13 **(b)**)، وقد نتج عن ذلك اختلاف في التباين بين السطحين.

يشير تكون اللحام ووجود الجسيمات في العينات غير المطلية ووجود خطوط التعرية إلى حدوث آلية التآكل الكاشط، يحمي سطح العينة غير المطلية جسيمات كربيد السيليكون(**SiC**) مما يزيد من مقاومتها للكاشط، بالإضافة إلى تأثير الجرافيت المزيت. ويظهر الشكل الأكثر استواءً للسطح في وسط زيت البورون فعالية عملية التشحيم.

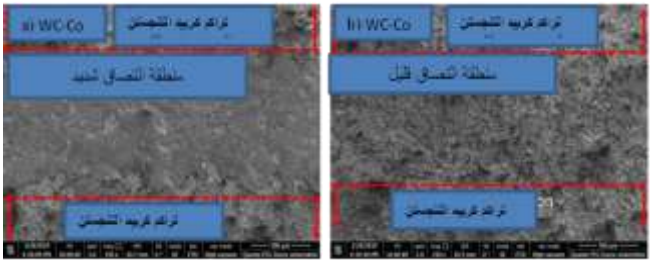
من المتوقع أن تؤدي جودة السطح المحسنة إلى زيادة مقاومة الإجهاد والتعرى، في العينات المطلية بـ **TiCN** زادت مقاومة التعرى نتيجة لزيادة صلابة السطح، مما أدى إلى زيادة خطوط التآكل على السطح. مع ذلك، لم تصل هذه الخطوط إلى مستوى يمكن أن يشوه طبقة طلاء **TiCN**.



شكل(13) صور مجهرية ماسحة لأسطح غير مطلية

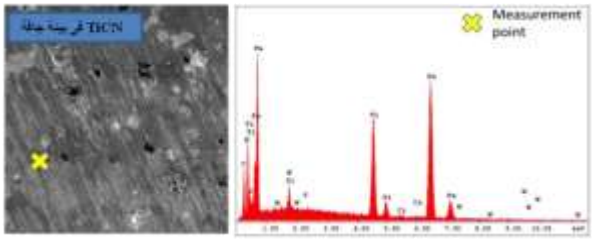


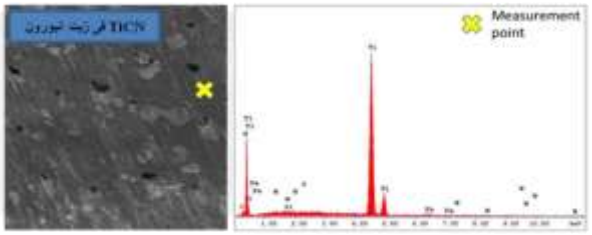
شكل(14) صور مجهرية ماسحة لأسطح مطلية بـ **TiCN**



شكل(15) صور مجهرية ماسحة لأسطح مطلية بـ **WC-Co**

توضح نتائج تحليل **EDX** للأسطح في حالتي الجفاف والتشحيم لطلاء **TiCN** في الشكل 16. وفقاً لهذه النتائج، يتواجد عنصر التيتانيوم بتركيز عالى على سطحي التعريه. ونتيجة لذلك، يتضح أن مقاومة التعريه تزداد مع طلاء **TiCN**، إلا أن جودة السطح تتأثر سلباً بالخدوش وكما هو الحال في حالة السطح غير المطلي لوحظ اختلاف في التباين بين السطح الجاف والسطح المشحم في طلاء **TiCN**. أظهر زيت البورون فعالية على العينة المطلية بـ **TiCN**، وحافظ على شكل سطحها مقارنة بالظروف البيئية الجافة. كما لوحظ التأثير الوقائي لزيت البورون على طبقة طلاء كربيد التنجستن. ووفقًا لصورة المجهر الإلكتروني الماسح يقل التعرى الالتصاقي على سطح كربيد التنجستن المطلي في وجود زيت البورون.



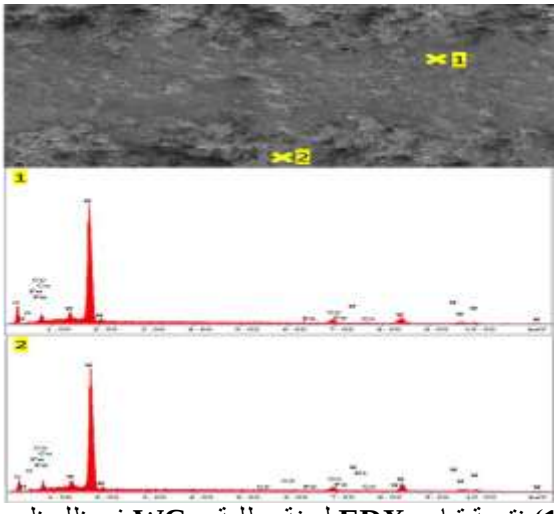


شكل(16) نتائج قياس **EDX** لعينة مطلية بـ **TiCN** في ظروف جافة , وفي زيت البورون

4.3. أستنتاج النتائج:

كما هو موضح في الشكل 7، يتكون طلاء كربيد التنجستن من طوري**WC, W2C** وتختلف قيم الصلابة باختلاف هذين الطورين. ونظراً لأن صلابة طور **WC** تبلغ حوالي 550 **HV** وصلابة المادة الكاشطة تبلغ حوالي 690 **HV**، فإن الجزء المعرض للتعرية من الطلاء يتعرض لتشوه كبير، مما يؤدي إلى حدوث تعرى الالتصاق. وعلى الرغم من أن صلابة مادة الحديد الزهر (حوالي 295 **HV**) أقل من صلابة المادة الكاشطة، إلا أن ملاحظة التعرى الكاشط فقط على مادة الحديد الزهر يمكن تفسيرها بوجود الكربون الحر وجزيئات كربيد السيليكون في بنية المادة. بسبب هذه البنية لم تتشكل آلية تعرى لاصق بين الأسطح المتلامسة أما في طلاء كربيد التنجستن فقد تشوهت طبقة كربيد التنجستن منخفضة الصلابة وازدادت مقاومة التعريه باتجاه طبقة كربيد التنجستن (حوالي 1420 **HV**). ونتيجة لذلك، انتشرت طبقة كربيد التنجستن على السطح بين المادة الكاشطة وطبقة كربيد التنجستن مما أدى إلى تشكل آلية تعرى لاصق. وبناءً على هذا السلوك يختلف السلوك الاحتكاكي لطلاء **WC** سلباً عن سلوك العينة غير المطلية وطلاء **TiCN**. إذا استمرالتعرى، فمن المتوقع حدوث تآكل كاشط نتيجة للصلابة العالية في طور **W2C**. وتؤكد الصور الطبوغرافية هذا التوجه, في شكل(12) تبدأ البنى المستوية بالتشكل بعد عمق تعرى يبلغ حوالي 9.5 ميكرومتر أي بعد أن تبدأ طبقة **W2C** في إحداث تأثيرها (الطبقة الصفراء). يمكن وصف هذه الحالة بأنها انتقال من آلية التعرى الالتصاقي إلى التعرى الكاشط, وخلال تعرى **WC** لم تلاحظ أي جزيئات منفصلة؛ إذ التصقت الجزيئات المتكونة نتيجة التعرى بالسطح تراكمت عند حافة خط التعرى(شكل(15) .

كما تؤكد نتائج تحليل **EDX** في الشكل 17 أن مادة **WC** تلتصق بالسطح على طول خط التعريه نتيجة التعرى الالتصاقي، وأن مادة التنجستن تتراكم باتجاه الحواف الجانبية دون أن تنفصل عن السطح. يمكن تفسير اختلاف تباين اللون بين نقطتي القياس الأولى والثانية في نتائج تحليل **EDX**، على الرغم من تساوي المحتوى العنصري، في التعرى الالتصاقي يحدث تعتيم نتيجة وجود الكربون بينما في التعرى الكاشط يكون لون السطح غيرمعتم (فاتح).



شكل(17) نتيجة قياس **EDX** لعينة مطلية بـ **WC** في ظل ظروف جافة

وبناءً على هذه النتائج يمكن القول إن طلاء كربيد التنجستن (**WC**) يعد ذو أهمية بالغة من حيث تقليل معامل الاحتكاك وفقدان الحجم ولكنه ينطوي على بعض الشكوك فيما يتعلق بجودة السطح نظراً لتعقيد آليات التعريه والتآكل. وفقاً للنتائج التجريبية، تتمتع العينات غير المطلية والمطلية بـ **TiCN** بخصائص سطحية متشابهة إلا أنه العينة المطلية بـ **TiCN** يمكن استخدامها لفترة أطول نظرًا لمزاياها في معامل الاحتكاك وفقدان الحجم. تتمثل عيوب العينة المطلية بـ **TiCN** في تكون خدوش كاشطة على سطح التعرى نتيجة صلابتها العالية. مع ذلك يظهر طلاء **WC-Co** خصائص تعريه مختلفة مقارنةً بالحديد الزهر المطاوع وطلاء **TiCN**. ورغم أنه يظهر أداءً أفضل من المادة الأساسية من حيث معامل الاحتكاك وفقدان الحجم، إلا أن تباين خصائص التعريه يجعل من الصعب الحصول على قيم ثابتة لخشونة السطح.

4.الخاتمة و الخلاصة:

في هذه الدراسة، تم فحص الأداء الاحتكاكي لمادة الحديد الزهر الكروي المطلية بـ **TiCN** و **WC-Co** من خلال اختبارات التعريه التي أجريت في ظل ظروف بيئية مختلفة (جافة ومستحلب زيت البورون) عند حمل 50 نيوتن وسرعة انزلاق 60 دورة في الدقيقة. لتقييم خصائص الطلاء، أُجريت قياسات الصلابة المجهرية على الأسطح، وحددت سماكة الطلاء باستخدام صور المجهر الإلكتروني الماسح وأُجريت تحليلات العناصر والمركبات باستخدام صور حيود الأشعة السينية وتحليل تشتت طاقة الأشعة السينية, كما حللت قيم معامل الاحتكاك وحجم التآكل لدراسة تأثير عملية الطلاء و زيت البورون على أداء مقاومة التعريه. تم الحصول على صور مجهرية إلكترونية ماسحة (**SEM**) لمناطق التعريه لتحديد آليات التعريه والتآكل وتحليل مورفولوجيا سطح العينات المتآكلة. بالإضافة إلى ذلك، تم فحص شكل السطح باستخدام مقياس التضاريس ثنائي الأبعاد والصور الطبوغرافية ثلاثية الأبعاد تم الحصول عليها من الأسطح المتعرية والمتآكلة، وتم تحليل التغيرات في شكل السطح كمياً باستخدام قيم قياس الخشونة. تمت مقارنة نتائج التحليل التي تم الحصول عليها للعينات المطلية مع العينات غير المطلية. وفيما يلي النتائج التي تم الحصول عليها في نطاق هذه الدراسة:

- أظهر فحص صور المجهر الإلكتروني الماسح للأسطح المطلية أن سمك طبقة **TiCN** يبلغ حوالي 1.75 ميكرومتر، بينما يبلغ سمك طبقة **WC-Co** حوالي 185 ميكرومتر. عند دراسة تأثير عملية الطلاءعلى قيم الصلابة لوحظ أن انه قيم الصلابة للعينة غير المطلية HV295، والعينات المطلية وصلت قيم الصلابة إلى HV1560 , HV1420 مع طلاء **TiCN** و**WC-Co** على التوالي.
- أظهرت صور حيود الأشعة السينية (**XRD**) للأسطح عدم وجود تمايز في السبيكة على الأسطح المطلية بـ **TiCN**، وتكون مركبات **WC** و**W2C** على الأسطح المطلية بـ **WC-Co**. ارتبطت الزيادة في الصلابة على السطح المطلي بـ **WC-Co** بتحول مركب **WC** إلى مركب **W2C**.
- عند دراسة تأثير عملية الطلاء على معامل الاحتكاك تبين أنه في الظروف الجافة قلل طلاء **TiCN** وطلاء-**WC Co** معامل الاحتكاك بنسبة 55 % ، 42 % على التوالي، مقارنة بالسطح غير المطلي. وبمقارنة قيم معامل الاحتكاك المقاسة في الظروف الجافة، وتبين في وجود زيت البورون بتكوينه طبقة تشحيم حدودية على السطح، قلل معامل الاحتكاك للمواد غير المطلية والمطلية بـ **TiCN** والمطلية بـ **WC-Co** بنسبة 67 %، 35%، 55، % على التوالي.
- تم تحليل تأثير عملية الطلاء ومستحلب زيت البورون على سلوك التعرية من خلال فحص قيم حجم التآكل التي تم الحصول عليها باستخدام مقياس التضاريس ثنائي الأبعاد. في الظروف الجافة تبين أن طلاءات **TiCN**، **WC-Co** قللت حجم التآكل بنسبة 88%، 76 % على التوالي مقارنة بالسطح غير المطلي. أما في ظروف زيت البورون فقد تبين أن حجم التعرية للمواد غير المطلية والمواد المطلية بـ **TiCN** والمواد المطلية بـ **WC-Co** قد انخفض بنسبة 53.8 %، 39.7%، 43.9 % على التوالي مقارنة بالظروف الجافة.
- بحسب التحليل الطبوغرافي ثلاثي الأبعاد (3D) يظهر سطح العينة غير المطلية مساحة أكبر باللون الأحمر مقارنة بالعينات المطلية مما ينتج عنه نسيج سطحي متموج، أما على الأسطح المطلية بـ **TiCN** و **WC-Co**، فتسود الألوان الصفراء والخضراء، ويقل عمق التعري بشكل ملحوظ مقارنة بالعينة غير المطلية.
- أظهر تحليل التضاريس ثلاثي الأبعاد(3D)، أن العينات المحفورة في زيت البورون تتميز بانخفاض في المساحات الحمراء وزيادة في المساحات الصفراء والخضراء (مما يدل على استواء السطح) مقارنة بالعينات الجافة، وقد حسن زيت البورون جودة السطح بفضل قدرته العالية على تحمل الأحمال وقدرته على الاختراق. وتؤكد النتائج

المستخلصة من صور التضاريس للنتائج المستخلصة من صور مقياس التضاريس ثنائي الأبعاد (2D) وقياسات خشونة السطح.

- أظهرت صور المجهر الإلكتروني الماسح (**SEM**) للأسطح المتآكلة آليات تعرية كاشطة في العينات غير المطلية والمطلية بـ **TiCN**، بينما لوحظت آليات تعرية لاصقة في العينة المطلية بـ **WC-Co**. وفي ظل ظروف زيت البورون تحسنت جودة السطح مقارنة بظروف التعري الجاف، وتؤكد نتائج صور تحليل الأشعة السينية (**EDX**) نتائج صور المجهر الإلكتروني الماسح (**SEM**).

5.المراجـــــع

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

[2] Taha, M. A, Faisal, M., El-Shenawy, "Effect of deformation parameters on microstructural evolution of GGG40 spheroidal graphite cast iron alloy", Materials Sciences And Applications, 10 (06): 433–450 (2019).

[3] Yıldızlı, K., Odabaş, D., and Nair, F., "Investigation of Erosive wear of The Borided AISI 1020 Steel", Balıkesir University Journal Of The Institute Of Science And Technology, 5 (1): 130–140 (2013).

[4] Babu, N, Madtha, and L. S, "Experimental behavioural study of ductile cast iron microstructure and its mechanical properties", International Journal Of Engineering Research, 3 (3): 1470–1475 (2015).

[5] Gigovic-Gekic, and A.Avdusinovic, H. "Heat treatment of nodular cast iron", Trends In The Development Of Machinery And Associated Technology, (October): 669–672 (2009).

[6] Gelfi, M., Pola, A., Foglio, E, Goffelli, S., and Lusuardi, D., "Fatigue characterization and optimization of the production process of heavy section ductile iron castings", International Journal Of Metalcasting, 11 (1): 33–43 (2017).

[7] Bhaduri, Amit, "Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys", Springer Nature Switzerland (2018).

[8] Sahin, S. and Meric, C., "Investigation of the effect of boronizing on cast irons", Materials Research Bulletin, 37 (5): 971–979 (2012).

[9] Wang, L., Wang, S. qi, Yang, Z. run, Li, D. sheng, and Wei, M. xian, "Wear behavior and mechanism of spheroidal graphite cast iron", Journal Of Iron And Steel Research International, 20 (10): 81–86 (2013).

[10] Motallebzadeh, A., Dilektasli, E., Baydogan, M., Atar, E., and Cimenoglu, H., "Evaluation of the effect of boride layer structure on the high temperature wear behavior of borided steels", Wear, 328–329: 110–114 (2015).

[11] Mozumder, Y. H., Behera, R. K., Sindhoora, L. P., Pattanaik, Salim, M., Shama, S., A., Mishra, S. C., and Sen, S., "Adhesive wear behavior of heat treated spheroidal graphite cast iron", IOP Conference Series: Materials Science And Engineering, 75 (1): 1–8 (2015).

[12] İmece, Y., Erdem, O., and Tuc, B., "Investigation of Tribological Properties of MoS2 and Graphite Coatings Under Different Environmental Conditions", Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University, 33 (3): 995–1012 (2018).

[13] Lewis, R., Gallardo, E. A.,Vera, E. E., Vite, M., and Laguna-Camacho, J. R.,

"A study of the wear performance of TiN, CrN and WC/C coatings on different steel substrates", Wear, 271 (9–10): 2116–2124 (2011).

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

[15] Venkateswarlu, K. and Rajinikanth, "An investigation of sliding wear behaviour of WC-Co coating", Tribology International, 44 (12): 1711–1719 (2011).

[16] Meric, C., Sahin, S., Backir, B., and Koksal, N. S., "Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons", Materials And Design, (9): 751–757 (2006).

[17] Vardavoulias, M., Basak, A. K., Celis, J. P., and Matteazzi, P., "Effect of nanostructuring and Al alloying on friction and wear behaviour of thermal sprayed WC-Co coatings", Surface And Coatings Technology, 206 (16): 3508–3516 (2012).

[18] 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).

[19] Ma, G., Wang, L., Gao, H., Zhang, J., and Reddyhoff, T., "The friction coefficient evolution of a TiN coated contact during sliding wear", Applied Surface Science, 345: 109–115 (2015).

[20] Wang, Q., Chen, Z. H., and Ding, Z. X., "Performance of abrasive wear of WC- 12Co coatings sprayed by HVOF", Tribology International, 42 (7): 1046–1051 (2009).

[21] El-Labban, H. F.,and Mahmoud, E. R. I. "Microstructure and wear behavior of TiC coating deposited on spheroidized graphite cast iron using laser surfacing", Technology & Applied Science Research, 4 (5): 696–701 (2014).

[22] Gunen, A., Kanca, E., cakir, H., Karakas, and Demir, M., "Effect of borotitanizing on microstructure and wear behavior of Inconel 625", Surface And Coatings Technology, 311: 374–382 (2017).

[23] Wang, J. Fan, Z., and Sun, D., "Wear characteristics of spheroidal graphite roll WC-8Co coating produced by electro-spark deposition", Rare Metals, 29 (2): 174–179 (2010).

[24] El-Eskandarany, M. S., "Mechanical Alloying 2nd ed.", William Andrew, New York, 306-321 (2015).

[25] Wang, S. Q., Wei, M. X., and Cui, X. H., "Comparative research on wear characteristics of spheroidal graphite cast iron and carbon steel", Wear, 274–275: 84–93 (2012).

[26] Yazici, O. and Yilmaz, S., "Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels", Tribology International, 119 (August 2017): 222–229 (2018).

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

[28] Zhu, B., Mardel, J., and Kelly, G. L., "An investigation of tribological

properties of CN and TiCN coatings", Journal Of Materials Engineering And Performance, 13 (4): 481–487

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

[30] Fernandino, D. O. and Boeri, R., "Fracture of pearlitic ductile cast iron under different loading conditions", Fatigue And Fracture Of Engineering Materials And Structures, 38 (1): 80–90 (2015).

[31] Gonzaga, R. A., "Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons", Materials Science And Engineering A, 567: 1–8 (2013).

[32] 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).

[33] Azman, N. F., Syahrullail, S., and Rahim, E. A., "Preparation and dispersion stability of graphite nanoparticles in palm oil", Jurnal Tribologi, 19 (July): 132–141 (2018).