Taj Al-Ma'rifa Journal مجلة تاج المعرفة
ISSN : 3104-8846, ISSN-L: 3104-8838

Study of the mechanical properties of ST-37 steel by cold forming using severe vibratory peening

* Hamdi Abdulhamid Raghs

Mechanical engineering, Faculty of Engineering,
Omar Al Mukhtar University, Libya

hamdi.raghs@omu.edu.ly

*Corresponding Author: * Hamdi Abdulhamid Raghs

Keyword

Severe vibratory peening (SVP), shot peening(SP), Surface severe plastic deformation (SSPD), hardness, vibratory finishing, wear test, Scanning Electron Microscope (SEM), Optical microscope (OM), Fatigue, laser cutting, X-Ray Diffraction (XRD),

Abstract

In this research, the mechanical and microstructure properties of ST-37 steel were investigated after treatment with severe vibratory peening (SVP) to highlight the performance and potential of this innovative treatment within the field of surface severe plastic deformation (SSPD). St-37 carbon steel samples were subjected to Severe vibratory peening treatment at three levels, Scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy (OM) images revealed a two-layer gradient structure. X-ray diffraction (XRD) analysis showed the complete disappearance of the oxide layer, as well as surface nanocrystalline crystallization resulting from severe plastic deformation (SPD). Microhardness testing revealed average improvement. Severe vibratory peening resulted in increased hardness from surface to depth. In wear and friction tests, the volume loss after severe vibratory peening was less; in addition, coefficient of friction of the untreated sample was the lowest under all loads. It has been observed that this technique produces a deeper surface formation and removes unwanted oxide layers.

Received : 20/04/2026 Accepted : 06/05/2026

DOI: https://doi.org/10.64943/jkc.2026.040216

Copyright © 2026 JKC ; Published by Higher Institute of Science and Technology, Tajoura, Libya
This is an open access article licensed under CC BY: (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)

دراسة الخواص الميكانيكية للفولاذ ST-37 بالتشكيل على البارد بأستخدام الصقل بالدق ألاهتزازى الشديد

*** حمدى عبد الحميد حسن رقص**

الهندسة الميكانيكية، كلية الهندسة، جامعة عمر المختار، ليبيا

hamdi.raghs@omu.edu.ly

***الباحث المرسل:** * حمدى عبد الحميد حسن رقص

الكلمة المفتاحية:

المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، المجهر الضوئي (OM), التشكيل بالدق الاهتزازي الشديد (SVP)، التشوه السطحي البلاستيكي الشديد (SSPD)،الصلابة، التشطيب الاهتزازي، اختبارات التعرية والأحتكاك، حيود الأشعة السينية (XRD).

الملخص

في هذه البحث، تم فحص البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للفولاذ **ST-37** بعد معالجتها بالتشكيل الاهتزازي الشديد **(SVP)** بهدف إبراز إمكانات وأداء هذه المعالجة المبتكرة ضمن طرق التشكيل البلاستيكي الشديد للسطح **(SSPD)**. خضعت عينات من الفولاذ الكربوني العادي **St-37** لمعالجة **SVP** بثلاثة مستويات لفترات زمنية. أظهرت صور المجهر الضوئي **(OM)** والمجهر الإلكتروني الماسح **(SEM)** بنية متدرجة ثنائية الطبقات وأظهر تحليل حيود الأشعة السينية **(XRD)** اختفاء طبقة الأكسيد تمامًا، بالإضافة إلى التبلور النانوي السطحي الناتج عن التشكيل البلاستيكي الشديد **(SPD)**.كشف اختبار الصلابة المجهرية عن تحسن فى مستوى الصلابة مقارنةً بالعينة غير المعالجة. أدى التشكيل الاهتزازي الشديد إلى زيادة الصلابة من السطح إلى العمق. في اختبارات التعرية والأحتكاك كان فقدان الحجم بعد التشكيل الاهتزازي الشديد أقل. ومع ذلك، كان معامل الاحتكاك للعينة غير المعالجة هو الأدنى عند جميع الأحمال وقد لوحظ أن بأنه هذه التقنية تحدث تشكيلًا أعمق للسطح وتزيل طبقات الأكسيد غير المرغوب فيها.

تاريخ الإستقبال: 2026/04/20 تاريخ القبول: 2026/05/06

DOI: https://doi.org/10.64943/jkc.2026.040216

1. المقدمــة

تتعرض أجزاء الآلات للتلف، كالإجهاد والتآكل طوال فترة خدمتها، الاحتكاك والتآكل غالباً ما يؤديان إلى نتائج غير مرغوب فيها في التطبيقات الهندسية. في العديد من التطبيقات التي يوجد فيها احتكاك يكون الهدف هو تقليل فقد المواد. ويؤدي الاحتكاك والتآكل إلى فقدان الطاقة والمواد. ولذلك، تطبق عمليات معالجة وتحسين سطحية متنوعة لتقليل هذه الخسائر، كما يعد الإجهاد من أخطر أسباب تلف الأجزاء الحيوية. ونظراً لهذه الأنواع من التلف تكتسب عمليات تحسين السطح أهمية بالغة.

تعد عملية التشكيل اللدن السطحي عملية تستخدم لزيادة صلابة سطح المادة، والاستفادة من تأثير الإجهاد المتبقي وتحسين خواصها الميكانيكية. إضافة إلى ذلك، تتميز هذه العمليات بمزايا عديدة لا سيما في زيادة مقاومة الإجهاد نظرًا لسهولة تطبيقها وانخفاض تكلفتها, إضافة إلى تطبيقاتها العديدة

التي تمكن من إنشاء هياكل دقيقة الحبيبات تحت السطح، تعتبر سهولة تطبيق تقنيات (**SSPD**) وقابليتها للتطبيق على جميع المواد المعدنية ميزة إضافية لها[1-4].

تحسن البنية الدقيقة الناتجة عن عمليات التشوه البلاستيكي الشديد على السطح(**SSPD**) الخواص الميكانيكية للمواد، كما تزيد من صلابتها وقوة خضوعها. إلا أن من عيوب هذه البنية الدقيقة انخفاض قيم المطيلية، مع ذلك أظهرت بعض الدراسات أن قيم المطيلية والمتانة لهذه المواد تزداد معاً , تعد عملية التشكيل البلاستيكي السطحي المفرط بمساعدة الاهتزاز (**VA-SSPD**) ، إحدى طرق التشوه البلاستيكي الشديد على السطح ، طريقة تتضمن وضع جزء ثابت داخل حجرة اهتزازية مملوءة بكرات وتطبيق المعالجة. تزداد الحركة النسبية بين الجزء المعالج والكرات بشكل ملحوظ مما يؤدي إلى سرعات اصطدام عالية. تؤدي عملية (**VA-SSPD**) إلى إجهادات ضغط متبقية وتصلب السطح، تحدث هذه العملية تغييرات سطحية في الركيزة تصل إلى حوالي 400 ميكرومتر . وتسبب إجهادات ضغط على سطح المادة وتحته ونتيجة لذلك، يتأخر بدء وانتشار تشققات الإجهاد. وبالتالي، يحدث تحسين في عمر الإجهاد للمادة [5-9].

تتيح طرق (**SSPD**) تكوين طبقات متعددة ذات خصائص متغيرة، مثل مورفولوجيا السطح وعمق الطبقة المتأثرة بالعملية والبنية الحبيبية الدقيقة، وتختلف هذه الطرق باختلاف مبادئ تطبيقها. وتؤخذ في الاعتبار المعايير الرئيسية للعملية وهي، الطريقة ووقت المعالجة ومعدل التشبع، ومع ازدياد مقدار التشوه اللدن على أسطح المواد تزداد صلابة السطح وتتعمق طبقة التصلب، ومع ازدياد وقت المعالجة تتشكل حبيبات نانوية الحجم , تسهم البنية الدقيقة على سطح المواد أو أسفله مباشرةً في تحسين الخواص الميكانيكية للمواد بشكل ملحوظ، لا سيما المتانة وصلابة السطح. إضافةً إلى ذلك، يُقلل تكوّن هذه البنى على السطح أو أسفله مباشرةً من سرعة بدء ظهور الشقوق المجهرية والكبيرة الناتجة عن الإجهاد والتآكل على سطح المادة وانتشارها إلى المناطق الداخلية, تعد عملية التشكيل الكروي التقليدي(**SP**) معالجة سطحية باردة تستخدم في الغالب لزيادة مقاومة التعب للأجزاء المعدنية وتستخدم هذه العملية بشكل خاص في صناعات الطيران والفضاء والسيارات [10-15].

2. مشكلة الدراسة:

تبرز مشكلة دراسة الفولاذ منخفض الكربون ويعرف أيضاً بالفولاذ الطري، أساساً في ضعف مقاومته للتآكل والتعرية خاصة في البيئات البحرية ومحدودية قابليته للتقسية مقارنة بالصلب عالي الكربون، فضلاً عن تدهور خصائصه الميكانيكية عند تعرضه للحرارة العالية أثناء عمليات اللحام.الفولاذ منخفض الكربون هو نوع من الفولاذ يحتوي عادةً على أقل من 0.25% من الكربون, الفولاذ منخفض الكربون يتمتع بالعديد من المزايا إلا أنه يعاني أيضاً من بعض القيود عندما يتعلق الأمر بالاختيار وهو ما يجب أخذه في الاعتبار. على الرغم من أن الفولاذ منخفض الكربون ليس بنفس صلابة أنواع الفولاذ الأخرى إلا أنه يمكن زيادة قوته بعدة طرق كالمعالجة الحرارية،استخدم طلاء مضاد للتآكل والتعرية، التصليد السطحي, تسمح هذه الأساليب للصلب بأداء أفضل في ظل الظروف الصناعية القاسية.

3.أهداف وأهمية الدراسة:

تهدف دراسة الخواص الميكانيكية للفولاذ منخفض الكربون إلى تقييم سلوكه تحت تأثير الأحمال وفهم خواصه كالمرونة والصلابة وقوة الشد لتحديد مدى ملاءمته للتطبيقات الصناعية, ومن المهم دراسة الخواص الميكانيكية للفولاذ منخفض الكربون لتحديد قدرة التحمل و معرفة قوة الشد ونقطة الخضوع التي تقيس قدرة الفولاذ على تحمل الأحمال القصوى قبل التشوه الدائم أو الكسر وتقييم المرونة والليونة يساعد في تحديد مدى قدرة الفولاذ على التشكيل والسحب لصناعة الصفائح والأجزاء المختلفة دون التعرض للكسر، وكذلك تطوير عمليات التصنيع بالطرق التي تضمن الحفاظ على جودة المعدن وتوازنه الاقتصادي وتحسين مقاومة التآكل والصدمات واستجابة الفولاذ لظروف العمل البيئية وقياس قدرته على امتصاص الصدمات تحت درجات الحرارة المتغيرة ,تتيح هذه الدراسات تحسين أداء المعدن وتجنب الانهيارات المفاجئة في الآلات.

4. التجارب المعملية:

1.4. أختيار المواد:

يعد فولاذ **St-37** من الفولاذ الكربوني منخفض السبائك وذات استخدامات واسعة في المواد الإنشائية ونظراً لسهولة لحامه العالية يفضل استخدامها في العديد من أجزاء الآلات التي تتطلب اللحام. يشير الرمز **St** إلى الفولاذ الذي يحتوي على نسبة كربون تصل إلى 2%، بينما تبلغ قوة الشد إلى 370 نيوتن/م^2، تم اختيار فولاذ **St-37** منخفض الكربون لدراسة تحسين بنية الحبيبات في الطبقة السطحية وتحت السطحية بعد تعريضه لعملية التشوه البلاستيكي الاهتزازي الشديد. يوضح الجدول (1)التركيب الكيميائي للعينة المعالجة بينما يوضح الجدول(2) الخصائص الميكانيكية.

جدول (1) التركيب الكيميائي للفولاذ ST37

العنصر	نسبة الوزن (%)
C	0.18
Mn	1.5
P	0.03
S	0.03
N	0.01

جدول (2) الخواص الميكانيكية للفولاذ ST3

قوة الشد [MPa]	370-520
قوة الخضوع [MPa]	240
الاستطالة عند الكسر [%]	28

2.4. تحضير العينات:

تم تحضير أربع عينات أبعاد كل منها 30 × 120 مم، من صفائح فولاذية منخفضة الكربون من نوع **St-37**، تم اختيارها لعملية التشوه السطحى البلاستيكي الشديد(**SSPD**), يوضح الشكل 1. الرسم الفني للعينات المحضرة، تم حفر ثقوب في الزوايا الأربع للعينات ثم تم تثبيتها على الحوامل عند هذه الزوايا، تم قطع العينات من صفائح معدنية بسماكة 4 مم باستخدام آلة قطع بالليزر وفقاً للرسومات. يوضح الشكل 2 . العينة **St-37** المنتجة لعملية (**SSPD**).

شكل (1) أبعاد عينة St-37 لعملية (SSPD)

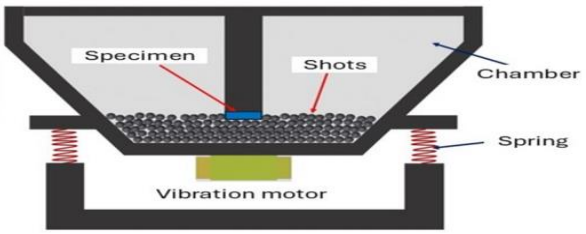
شكل (2) عينة St-37 لعملية (SSPD)

3.4. عملية التشوه السطحى البلاستيكي الشديد(SSPD):

تم التخطيط لتطبيق معالجة سطحية ميكانيكية على العينات باستخدام جهاز التشكيل بالدق الاهتزازي الشديد (**SVP**)

وبناءً على ذلك كان الهدف هو دراسة تأثير تطبيق عملية التشوه البلاستيكي الشديد على الخواص الميكانيكية والبنية المجهرية لمادة الفولاذ منخفض الكربون **St-37**. في جهاز التشكيل بالدق الاهتزازي يتم توليد الاهتزاز بواسطة محركات اهتزازية وينتج هذا الاهتزاز عن دوران أوزان لا مركزية داخل المحرك، تهدف هذه العملية إلى اصطدام الجزء الثابت بالكرات داخل حجرة اهتزازية، ولتحقيق ذلك تثبت حوامل على هيكل حامل مثبت على قاعدة ثابتة وتربط العينات بأجزائها السفلية. يوضح الشكل 3. جهاز التشكيل بالدق الاهتزازي الشديد (الحجرة والحوامل والكرات)،بينما يوضح الشكل 4. رسمًا تخطيطيًا للجهاز.

شكل (3) جهاز التشكيل بالدق الاهتزازي الشديد (SVP)



شكل (4) رسم تخطيطي لجهاز التشكيل بالدق الاهتزازي الشديد (SVP)

في هذه العملية استخدمت كرات فولاذية بقطر 5 مم وصلابة 80 **HRC**. يجب توزيع الكرات بالتساوي داخل الغرفةعند تثبيت العينات على الحامل ويكون وضع الحامل داخل الكرات، مع التأكد من عدم وجود أي فراغات على سطح العينة، تعديل تردد العملية على 60 هرتز باستخدام نظام يعمل بمحرك و يتم تشكيل العينات بنفس التردد. لتحديد تأثير أوقات المعالجة المختلفة على العينات، خضعت ثلاث عينات من **St-37** لمعالجة التشوه البلاستيكي الاهتزازي الشديد لثلاث فترات زمنية مختلفة (25، 45، 65 دقيقة). ترد معايير المعالجة في الجدول 3. وتظهر العينات المعالجة في الشكل 5 .

جدول (3) الخواص الميكانيكية للفولاذ

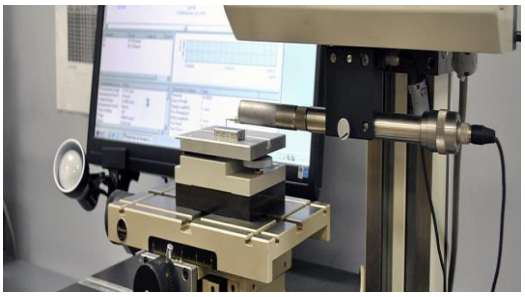
العينة	التردد (Hz)	قطر الكرة (mm)	نوع الكرة
1	60	5	فولاذ
2	60	5	فولاذ
3	60	5	فولاذ

شكل (5) العينات الثلاثة التي خضعت لعملية المعالجة

4.4. فحوصات البنية المجهرية:

لتحديد أي تغييرات قد تطرأ على المنطقة السطحية بعد عملية التشكيل تم التقاط صور مجهرية ضوئية (**OM**) وصور مجهرية إلكترونية ماسحة (**SEM**) لمنطقة مقطعية عمودية على السطح المشكل بعد العمليات المعدنية. في البداية، قطعت العينات التي خضعت لعملية المعالجة إلى أحجام مناسبة ثم صقلت بورق صنفرة ، وصقلت ونفذت عملية الحفر على فترات زمنية تتراوح بين 30 و40 ثانية وكذلك تم أجراء تحليل حيود الأشعة السينية (**XRD**) لتحديد التغيرات في البنية الطورية للمادة. أجريت قياسات الصلابة المجهرية لفولاذ **St-37** منخفض الكربون من مناطق مقطعية عمودية على الأسطح المعالجة، وأجريت اختبارات خشونة السطح لتحديد تأثير خشونة سطح الفولاذ **St-37**، استخدم في هذه الاختبارات جهاز اختبار خشونة السطح وحددت قيم **Ra ,Rt ,Rq** عن

طريق حساب المتوسط الحسابي للقياسات المأخوذة، يوضح الشكل6. قياسات خشونة سطح العينات التي خضعت لاختبار الخشونة.



شكل (6) جهاز قياس خشونة سطح للعينات

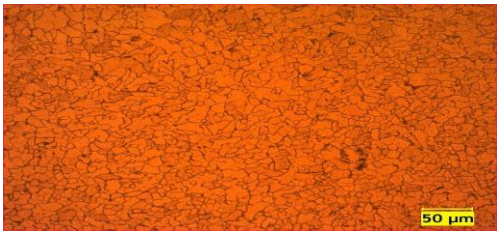
5. نتائج التجارب المعملية والمناقشة:

1.5. تحليلات البنية المجهرية:

استخدم المجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني الماسح لتحديد التغيرات في البنية المجهرية لعينات فولاذ **St-37** والتي خضعت للمعالجة لفترات زمنية مختلفة. يوضح الشكل7. صور ما بعد المعالجة لعينات غير معالجة وعينات معالجة ، لوحظ أنه مع زيادة مدة المعالجة ازداد عمق الحفر على سطح العينة وازداد استواء السطح.

شكل (7) صور البنية لـ: a) غير المعالجة عينات معالجة (b) 1,(c) 2 , (d) 3

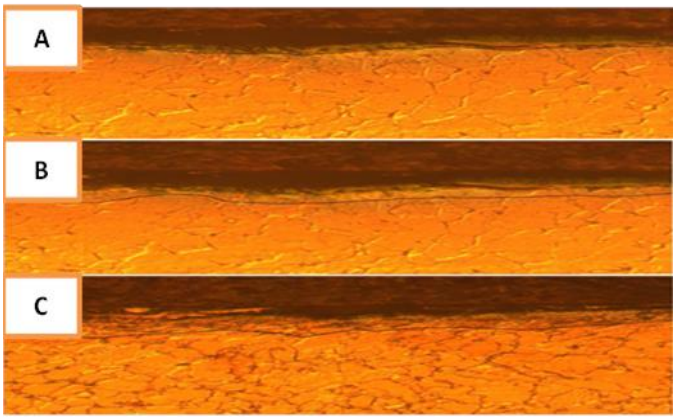
يوضح الشكل 8. صورة البنية الداخلية للعينة الملتقطة بواسطة المجهر الضوئي وتتشابه بنية الفريت والبيرلايت في البنية الداخلية مع تلك الموجودة في الفولاذ الكربوني المنخفض القياسي.



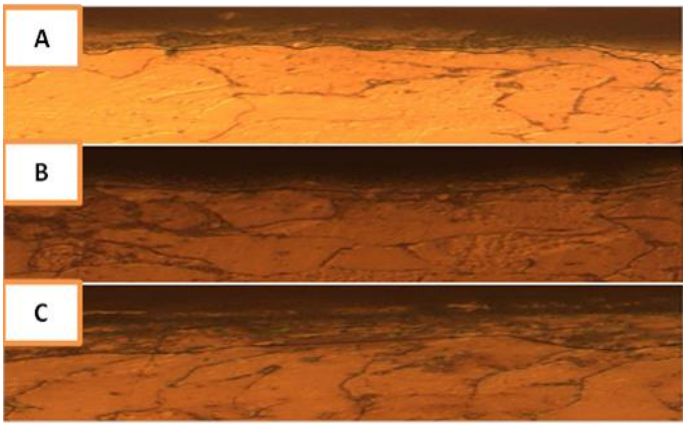
شكل (8) صورة مجهرية لعينةSt-37 (X200)

تظهر الأشكال(9،10) صورًا مجهرية ضوئية بتكبير 200 و500 مرة لعينات غير معالجة وعينات

معالجة. لوحظ ازدياد عمق الطبقة المشوهة مع ازدياد مدة المعالجة، و اختفاء حدود الحبيبات في المعالجة 3 حيث كان تشوه السطح أكثر فعالية.

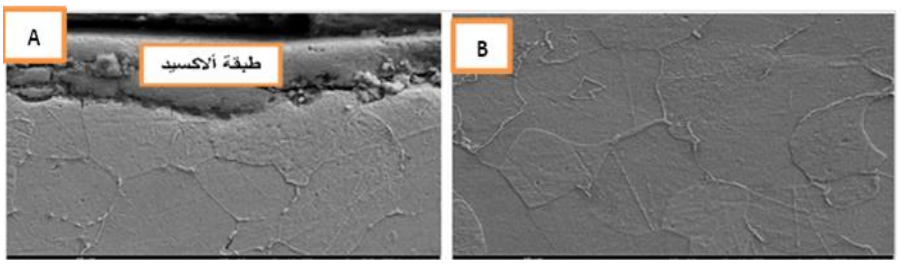


شكل (9) صور البنية المجهرية 3 (c ,2 b) ,1 a) (تكبير x200)

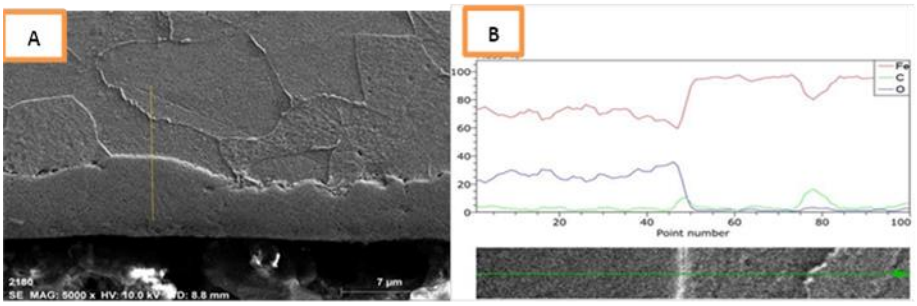


شكل (10) صور البنية المجهرية 3 (c ,2 b) ,1 a) (تكبير x500)

يوضح الشكل 11. صو ر مجهرية إلكترونية ماسحة (**SEM**) للبنية المجهرية للمناطق الداخلية والسطحية لعينة **St-37** غير المعالجة، لوحظ وجود طبقة مختلفة عن البنية الداخلية في المنطقة السطحية للعينة وأكدت دراسات **EDX** و**XRD** أن هذه الطبقة هي طبقة أكسيد، يوضح الشكل 12. تحليل **EDX**.

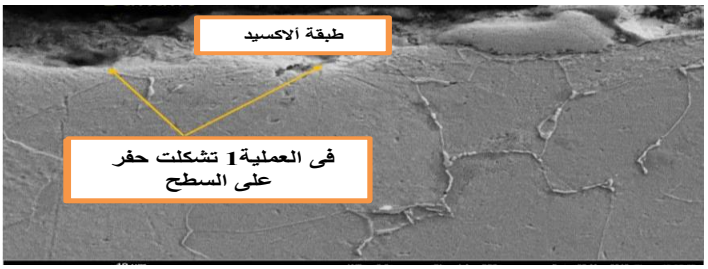


شكل (11) صورة مجهرية إلكترونية ماسحة للبنية الدقيقة لـ St-37: a) السطح، b) الداخل



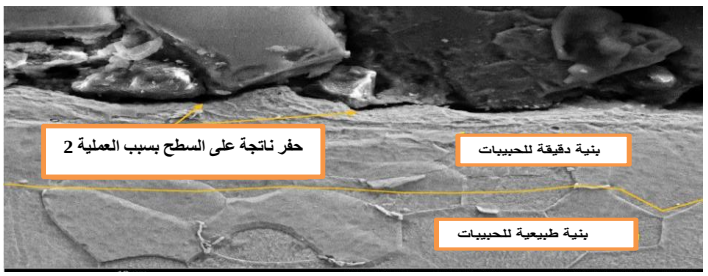
شكل (12) a) الطبقة السطحية، b) تحليل EDX الخطي

يوضح الشكل 13. صور للأسطح المعالجة بعملية 1، ومن الجدير بالذكر أن عملية التشوه البلاستيكي الشديد تشوه السطح وتغير بنيته. بالإضافة إلى ذلك، يلاحظ أن طبقة الأكسيد مشتتة إلى حد كبير مع بقاء بعض أجزائها.



شكل (13) a) صور المجهر الإلكتروني الماسح للسطح بعد عملية 1

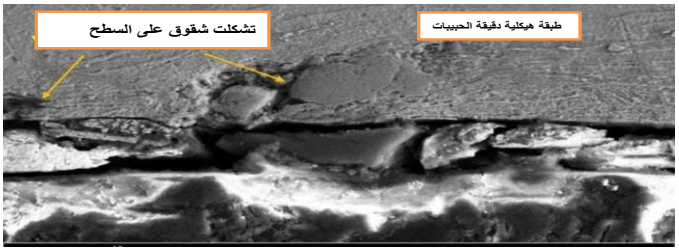
يوضح الشكل14. صور مجهرية إلكترونية ماسحة (**SEM**) للعينة المعالجة بعملية 2، يتضح اختفاء طبقة الأكسيد من سطح العينة بعد العملية ، وأن عملية التشوه البلاستيكي الشديد تسببت في ظهور تشققات في الركائز. علاوة على ذلك، مع عملية 2، أصبح تشوه السطح أكثر وضوح، وأصبحت حدود الحبيبات المشوهة رقيقة جدًا لدرجة أنها غير مرئية لتحليل **SEM**، حيث أصبحت الطبقة واضحة أسفل السطح مباشرة، تظهر الطبقة ذات الحبيبات الدقيقة سماكة غير متجانسة على طول السطح، وقد تم الحصول على متوسط سماكة للطبقة يتراوح بين 10 و15 ميكرون بعد العملية.



شكل (14) صور المجهر الإلكتروني الماسح للسطح بعد عملية 2

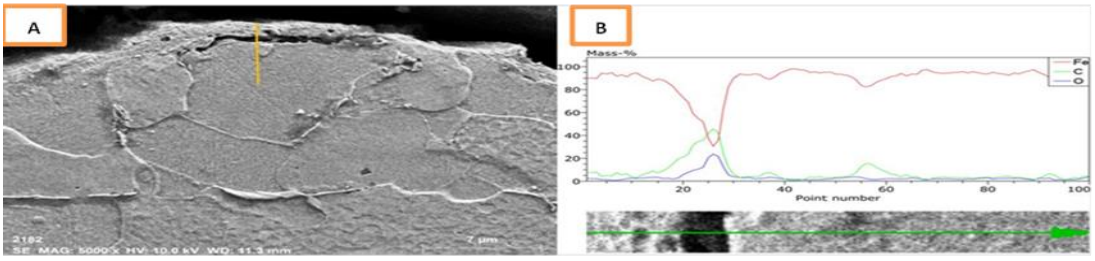
يوضح الشكل 15. صور مجهرية إلكترونية ماسحة بعد عملية 3، وقد تم ملاحظة تشققات على

السطح بعد العملية وبالمقارنة مع عملية 2، ازداد متوسط سمك الطبقة ذات الحبيبات الدقيقة قليلاً، حيث تراوح بين 16 ,20 ميكرون ويتضح أن التشوه الأكبر حدث في عملية 3. ولم نلاحظ أي نتائج متعلقة بطبقة الأكسيد.

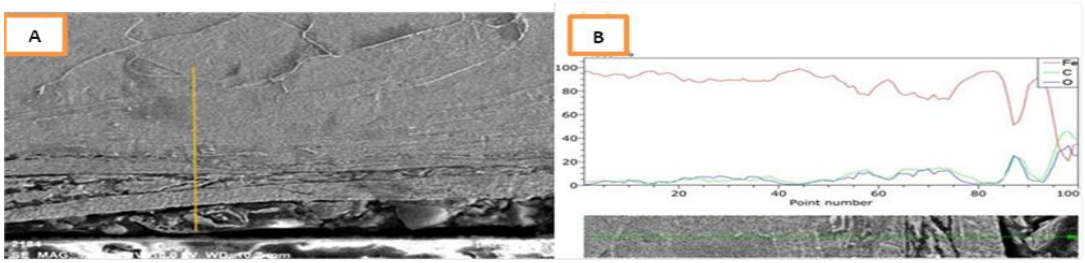


شكل (15) صور المجهر الإلكتروني الماسح للسطح بعد عملية 3

يوضح الشكلان16 ،17. تحليلات **EDX** السطحية بعد العمليتين (2, 3)على التوالي، على عكس العينة غير المعالجة لوحظ وجود طبقة الأكسيد وهو ما يتعارض مع طبيعة العينة وسطحها، تتوافق المكونات الأساسية مع تركيبة **St-37** ويؤكد ذلك أيضًا نتائج **EDX** التي تظهر إزالة طبقة الأكسيد من السطح بعد عملية التشكيل بالدق الاهتزازي الشديد.



شكل (16) a) تحليل (EDX) لخط الطبقة السطحية، b) تحليل EDX بعد عملية 2

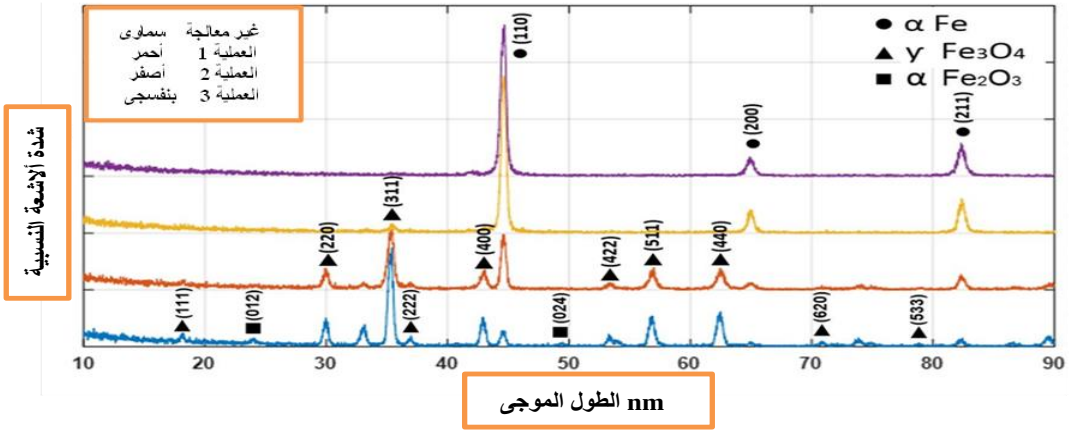


شكل (17) a) تحليل (EDX) لخط الطبقة السطحية، b) تحليل EDX بعد عملية 3

2.5. تحليل حيود الأشعة السينية(XRD):

يوضح الشكل 18. مخطط تحليل لحيود الاشعة (**XRD**) ويلاحظ وجود عنصر **Fe** ومركب **Fe3O4** في العينات غير المعالجة، وقد أسفر الكشف عن طبقة الأكسيد باستخدام (**SEM**) و (**EDX**) عن نتائج متقاربة ولا تزال طبقة الأكسيد التي أزيل جزء منها أثناء عملية 1 ، في العمليتين 2 , 3، أظهرت تحليلات **SEM**، **EDX**،**XRD** إزالة طبقة الأكسيد بالكامل. وبناءً على ذلك، يعتقد أن عملية التشكيل بالدق الاهتزازي الشديد بالإضافة إلى استخدامها كمعالجة سطحية لزيادة مقاومة

التعرية والتآكل والإجهاد، يمكن أن تكون أيضًا طريقة بديلة للتشغيل الآلي لإزالة الشوائب والطبقات وغيرها من السطح.



شكل (18) مخطط حيود الأشعة السينية لعينات الغير المعالجة و المعالجة، 1، 2، 3

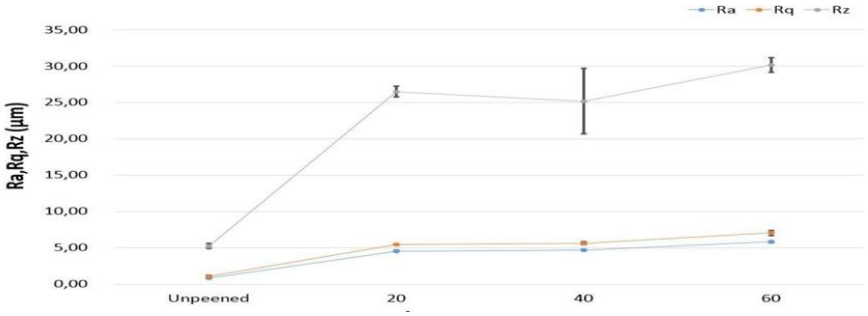
يعد التشوه السطحى البلاستيكي الشديد من أهم المعايير التي تظهر تحسن حجم الحبيبات على السطح، عند فحص قمتين مختلفتين في الجدول4. لوحظ ارتفاع ملحوظ في قيم **FWHM**، لا سيما في العمليتين 2 ,3.

جدول (4) قيم FWHM لعملية التشكيل بالدق الاهتزازي الشديد

FWHM (قيم)					
الطول الموجي	**الذروة**	**غير معالج**	**الفترة ألاولى**	**الفترة الثانية**	**الفترة ألثالثة**
45	110	0,40	0,460	0,455	0,520
65	200	0,35	0,78	0,57	0,75

3.5. خشونة السطح:

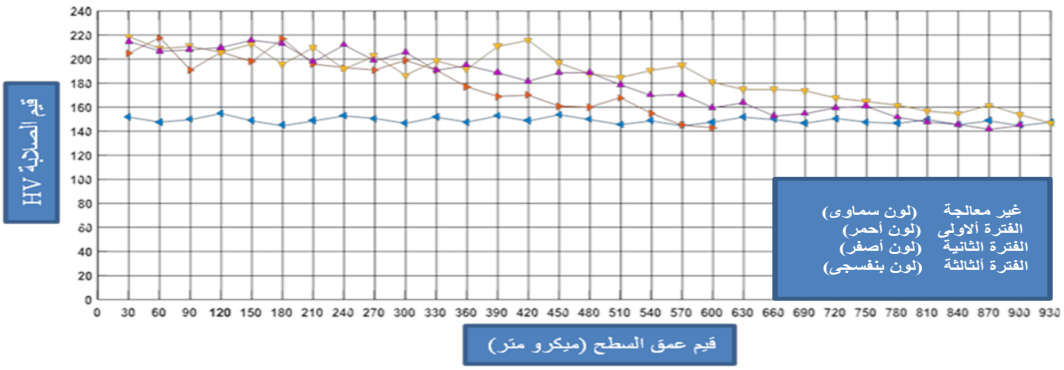
يظهر الشكل 19. قيم خشونة سطح العينات قبل وبعد العملية ، وقد تبين أن العينة 3 التي خضعت للمعالجة سجلت أعلى قيمة خشونة كما لوحظ ازدياد في قيمة الخشونة مع ازدياد مدة المعالجة.



شكل (19) قيم قياس خشونة سطح العينات

4.5. تحليلات الصلابة:

يوضح الشكل 20. قيم القياسات المأخوذة على فترات 30 ميكرومتر من السطح لثلاث فترات معالجة مختلفة، ونتيجة لقياسات الصلابة المجهرية لوحظ ارتفاع في قيم صلابة السطح في جميع فترات المعالجة، وسجلت أعلى قيم الصلابة في العينة 2. ونتيجة للمعالجة أظهرت قيم الصلابة على سطح عينة الفولاذ **St37** منخفض السبائك تحسناً قدره 67±5 HV أو ما معدله 47%. مع ازدياد العمق من السطح انخفض تأثير المعالجة على قيم الصلابة واستقر عند 144 ± 3 HV. لوحظ أن أقصى عمق تأثر بالمعالجة بلغ 928 ميكرومتر في العملية 2 المعالجة.



شكل (20) رسم بياني لقياس الصلابة

6. أستنتاج النتائج:

النتائج التي تم الحصول عليها من عملية التشكيل بالدق الاهتزازي الشديد اللاحقة التي تم إجراؤها على عينات من الفولاذ منخفض الكربون **St37** مدرجة أدناه.

- لوحظ أن العملية تسبب تشوهاً أعمق مع زيادة زمن المعالجة على الفولاذ **St37** منخفض الكربون، مما يشكل بنية دقيقة الحبيبات على السطح وبالقرب منه وقد ازداد عمق هذه البنية الدقيقة للحبيبات بالتوازي مع زيادة زمن المعالجة، كما لوحظ أن العملية تزيل طبقة الأكسيد من سطح فولاذ **St37** منخفض السبائك ولكنها تحدث تشققات على السطح.
- لوحظ أن خشونة سطح العينة تزداد مع زيادة مدة المعالجة، وسجلت أعلى نسبة خشونة في العينة التي عولجت في الفترة ألثالثة, وقد تبين أن ذلك يعود إلى ازدياد عمق الحفر المتكونة على السطح مع زيادة مدة المعالجة.
- أظهرت الاختبارات أن هذه العملية تحسن بشكل ملحوظ قيم صلابة السطح، وقد لوحظ تحسن متوسط بنسبة 49% في قيم الصلابة مقارنة بالعينة الغير معالجة. وكان التأثير الأكبر على قيم الصلابة بعد المعالجة في الفترة الثانية. وقد تبين أن المعالجة أحدثت تغييراً في الصلابة حتى عمق 928 ميكرومتر من سطح العينة.
- بناءً على جميع الاختبارات والنتائج التي تم الحصول عليها، لوحظ أن هذه العملية تؤثر على البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للمادة المعدنية. علاوة على ذلك، تم استنتاج أن زيادة وقت المعالجة يزيد من هذه التأثيرات.

7. المراجـــــــع:

[1] Mcgillivray, B., Canals, L., Badreddine, J., Yan, H., and Levesque, M., "Effect of vibratory peening on the sub-surface layer of aerospace materials", *Journal Of Materials Processing Tech.*, 264 (August 2018): 91–106 (2019).

[2] E. Maleki et al. Roles of surface coverage increase and re-peening on properties of AISI 1045 carbon steel in conventional and severe shot peening processesSurfaces and Interfaces. (2018)

[3] Y. Efe et al. Enhancement in microstructural and mechanical performance of AA7075 aluminum alloy via severe shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification Appl. Surf. Sci. (2020)

[4] Hu, C., Arms, V., Atoji, N., Kumar, S., Murtaza, Q., Li, S., and Murakami, M., "Investigations of influence of vibration smoothing conditions of geometrical structure on machined surfaces Investigations of influence of vibration smoothing conditions of geometrical structure on machined surfaces", *4th International Conference Recent Trends In Structural Materials*, 1–6 (2017).

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

[6] Erfan Malek, Sara Bagherifard a, Okan Unal b, Farshad Sabouri a Mario Guagliano.,Effects of different mechanical and chemical surface post-treatments on mechanical and surface properties of as-built laser powder bed fusion AlSi10Mg . Surface and Coatings Technology(2022).

[7] Maleki, E. and Unal, O., "Roles of surface coverage increase and re-peening on properties of AISI 1045 carbon steel in conventional and severe shot peening processes", Surfaces And Interfaces, 11 (September 2017): 82–90 (2018).

[8] Bourebia, M., Bouri, A.,Gharbi, A., Ghelloud, O. and Bouhamla, K., "Study of the Effect Burnishing on Superficial Hardness and hardening of S355JR Steel Using Experimental Planning", Sciencedirect, 157:568-577 (2019).

[9] Maleki, E., Unal, O. and Kashyzadeh, K.R., "Surface Layer Nanocrystallization of Carbon Steels Subjected to Severe Shot Peening: Analysis and Optimization", Materials Characterization, 157:109877 (2019).

[10] Travieso-Rodriguez, J.A., Jerez-Mesa, R., Gomez Gras, G., Lluma-Fuentes, "Hardening Effect and Fatigue Behavior Enhancement Through Ball Burnishing on AISI 1038", Journal of Materials Research and Technology, 8(6): 5639-5646 (2019).

[11] Saldana-Robles, A., Plascencia-Mora, H., Aguilera-Gomez, "Influence of Ball Burnishing on Roughness, Hardness and Corrosion Resistance of AISI 1045

Steel", Surface &Coatings Technology, 339: 191-198 (2018).

[12] Mohamed, A.O., Farhat, Z., Warkentin, A., and Gillis, J., "Effect of a Moving automated Shot Peening and Peening Parameters on Surface Integrity of Low Carbon Steel", Journal of Materials Processing Tech., 277: 116399 (2020).

[13] Gharbi, F., Sghaier, S., Morel, F., Benameur, T., "Experimental Investigation of the Effect of Burnishing Force on Service Properties of AISI 1010 Steel Plates", Journal of Materials Engineering and Performance, 24:721-725 (2015).

[14] Maleki, E., Unal, O. and Kashyzadeh, K.R., "Surface Layer Nanocrystallization of Carbon Steels Subjected to Severe Shot Peening: Analysis and Optimization", Materials Characterization, 157:109877 (2019).

[15] Olugbade, T.O. and Lu, J., "Literature Review on the Mechanical Properties of Materials after Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT)", Nano Materials Science, 2:3-31 (2020).

[16] Pan, Q. and Lu, L., "Improved Fatigue Resistance of Gradient Nanograined Metallic Materials: Suppress Strain Localization and Damage Accumulation", Scripta Materialia, 187:301-306 (2020)

[17] Estrin, Y. and Vinogradov, A., "Extreme Grain Refinement by Severe Plastic Deformation: A Wealth of Challenging Science", Sciverse Sciencedirect, 61:782-817 (2013).

[18] Maleki, E. and Unal, O.,"Roles of Surface Coverage Increase and Re-peening on Properties of AISI 1045 Carbon Steel in Conventional and Severe Shot Peening Proceses", Surfaces and Interfaces, 11:82-90 (2018).

[19] Bourebia, M., Bouri, A.,Gharbi, A., Ghelloud, O. and Bouhamla, K., "Study of the Effect Burnishing on Superficial Hardness and hardening of S355JR Steel Using Experimental Planning", Sciencedirect, 157:568-577 (2019).

[20] Olugbade, T.O. and Lu, J., "Literature Review on the Mechanical Properties of Materials After Surface Mechanical Attrition Treatment", Nano Materials Science, 2:3-31 (2020)

[21] Amin, S. and Panchal, H., "A review on thermal spray coating processes", International Journal Of Current Trends In Engineering & Research, 2 (4): 556–563 (2016).

[22] R. Karimbaev et al. Materials Science & Engineering A An improvement in fatigue behavior of AISI 4340 steel by shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification Mater. Sci. Eng. A (2020)

[23] 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", Wear, 376–377: 1804–1813 (2017).

[24] Kondul, B., and Cetin, M. H, "Investigation of Wear Behavior of Boronized H13 Steel under Environment of Nano-Silver-Added Lubricants Coated with Different Ligands", Surface Topography: Metrology and Properties, 8 (1): (2020).

[25] Federici, M., Menapace, C., Moscatelli, A., Gialanella, S., and Straffelini, G., "Effect of Roughness on the Wear Behavior of HVOF Coatings Dry Sliding Against a Friction Material", Wear, 368–369: 326–334 (2016).