Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (3) (JUNE, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) ملحق العدد 3 يونيو 2026
ردمد: 3135-2359

تحسين الخواص الميكانيكية للفولاذ AISI 1017 باستخدام التشوه البلاستيكي الشديد (SPD)

حمدى عبد الحميد حسن رقص

الهندسة الميكانيكية، كلية الهندسة، جامعة عمر المختار، ليبيا

Email: hamdi.raghs@omu.edu.ly

Improvement of Mechanical Properties of AISI 1017 Steel by using Severe Plastic Deformation (SPD)

Hamdi Abdulhamid Raghs

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

تاريخ الاستلام: 2026/6/29 تاريخ المراجعة 2026 /7/20 تاريخ القبول:2026/7/28- تاريخ النشر: 2026 /8/25

ملخـــــــص البحـــــــث

في هذا البحث، سندرس تأثير التشكيل بالدق الشديد (**SSP**) والتشكيل بالدق التقليدي (**CSP**) على الخواص الفيزيائية والميكانيكية لسبائك الفولاذ **AISI 1017**. أدى التشكيل بالدق إلى تغييرات في البنية المجهرية وانخفاض في مطيلية المعدن، كما هو موضح في اختبارات حيود الأشعة السينية (**XRD**). أظهرت التجارب تحسناً في مقاومة الشد وزادت صلابة السبيكة في العينات المعالجة، وتشير القيم إلى تحسن في مقاومة الشد القصوى ومقاومة الخضوع مع كل من التشكيل بالدق الشديد والتشكيل بالدق التقليدي. كما لوحظ انخفاض في المطيلية مع التشكيل بالدق، بالإضافة إلى تغييرات في البنية المجهرية وزيادة في شدة التشوه، بينما لوحظت زيادة في سمك الطبقة في حالة التشكيل بالدق الشديد مقارنةً بحالة التشكيل بالدق التقليدي، وذلك من خلال تحليلات حيود الأشعة السينية والمجهر الضوئي.

يهدف هذا البحث إلى اختبار تأثير التشكيل البلاستيكي الشديد (**SPD**) باستخدام اللحام بالقوس الكهربائي و التشكيل التقليدي (**CSP**) وعملية التشكيل الشديد (**SSP**) على الخواص الميكانيكية والبنية المجهرية لسبائك الفولاذ **AISI 1017**. وتأثير هذه العمليات على البنية المجهرية وتجانس العينات مما يؤدي إلى تغيير خواصها الميكانيكية. وقد تم تحضير عينات لاختبار الخواص الميكانيكية ودراسة خصائص البنية المجهرية.

الكلمات الدالة: التشكيل التقليدي (**CSP**) ، التشكيل الشديد (**SSP**), .حيود الأشعة السينية (**XRD**) ،المجهر الضوئي (**OM**), التشوه البلاستيكي الشديد، الفولاذ **AISI 1017**.إجهاد الخضوع، قوة الشد القصوى.

ABSTRACT

In this research, we will study the effect of Severe Shot Peening (SSP) and Conventional Shot Peening (CSP) the physical and mechanical properties of AISI 1017, shot peening caused changes in its microstructure and decreased the ductility of the metal that are indicated in XRD, and experiments showed improvement in tensile strength. Hardness of alloy increased in treated specimens, and values indicate improvement in ultimate tensile strength and yield strength values with SSP and CSP, respectively, also, decrease in ductility with shot peening, in addition, changes in microstructure, and deformation intensities are increased, while the layer thickness increase in the SSP case, in comparison with the CSP case are indicated through XRF XRD, optical microscopy analyses.

The aim of this research is to test the effect of SPD through shot peening and electric arc welding on microstructure and the mechanical properties of AISI 1017 steel alloys.
Keywords: Shot Peening (SP), Severe Plastic Deformation (SPD), Low carbon steel, AISI 1017, Arc welding, Optical microscope (OM), X-Ray Diffraction (XRD), Yield strain, Ultimate tensile strength, Yield strength.

المقدمـة

تستخدم تقنيات المعالجة الباردة لتحسين الخواص الميكانيكية لسبائك المعادن، وأهم هذه الخواص هي المتانة، والخشونة، والبنية المجهرية. يتم تشكيل المعادن عن طريق التشكيل البلاستيكي الشديد (**SPD**) من خلال عمليات مثل البثق الهيدروستاتيكي، الذي يحدث تشوهات في المعدن عند درجات حرارة منخفضة، مقارنة بالتقنيات الأخرى. ينتج عن التشكيل البلاستيكي الشديد بنية بلورية دقيقة، تختلف عن البنية البلورية للمعدن أو السبيكة الأصلية، يتميز التشكيل البلاستيكي الشديد بمزايا وعيوب مختلفة تتعلق بالخواص الميكانيكية وأداء المادة [1–5].

أجريت العديد من الدراسات التي تناولت الآثار الإيجابية للمعالجات الباردة للفولاذ وخاصة عملية التشكيل بالدق على خواصه الميكانيكية ، تسلط عملية التشكيل بالدق إجهادات ضغط على سطح المعدن تقابلها إجهادات شد من الطبقات الداخلية يؤدي التوازن بين هاتين القوتين إلى إجهاد متبقٍ يزيد من صلابة المعدن. علاوة على ذلك، تزيل عملية التشكيل بالدق حالات الفشل الناتجة عن تآكل الإجهاد والتعب، والتي تبدأ على سطح المادة وتنتشر , تم اختبار أنواع عديدة من الفولاذ لدراسة تأثير عملية التشكيل بالدق بما في ذلك الفولاذ المقاوم للصدأ والصفائح الفولاذية والعديد من سبائك الفولاذ الأخرى. ومع ذلك، تركز معظم هذه الدراسات على اختبار مقاومة الإجهاد وغالباً ما تدرس البنية المجهرية[6–9].

تستخدم معالجة الأسطح بتقنيات التبريد على نطاق واسع لتحسين الخواص الميكانيكية لسبائك المعادن. يعد التشكيل بالدق أحد هذه العمليات التي تؤثر على خشونة السطح والإجهادات المتبقية والبنية المجهرية, قد تكون آثار التشوهات اللدنة الناتجة عن اللحام أو التشكيل بالدق مفيدة أو ضارة على قوة المعدن وليونته. تنتج عملية التشكيل البلاستيكي الشديد (**SPD**) بنية بلورية دقيقة تختلف عن البنية البلورية للمعدن أو السبيكة الأصلية وذلك من خلال تكوين حبيبات فرعية ميكرومترية داخل الحبيبات الخشنة للمادة الأصلية. وتكمن مزايا هذه العملية في تحسين الأداء والخواص الميكانيكية من خلال قدرتها على إحداث تشوهات في البنية المجهرية عبر الحبيبات الدقيقة مما ينعكس إيجاباً على نتائج الأداء من حيث الصلابة وإجهاد الخضوع . مع ذلك، تتمثل عيوب هذه العملية بشكل رئيسي في انخفاض المطيلية، مما يقلل من قدرة المعدن على الخضوع للتشكيل البلاستيكي تحت الإجهاد. تعرف أنواع الفولاذ التي يعد الكربون عنصرها الرئيسي في السبائك باسم الفولاذ الكربوني، تحتوي هذه الأنواع على ما يصل إلى 1.2% من المنجنيز و0.4% من السيليكون. كما تحتوي على عناصر أخرى مثل النحاس والموليبدينوم والألومنيوم والكروم والنيكل. يعد فولاذ **AISI 1017** الكربوني فولاذ منخفض الكربون، يتميز بخصائص لحام جيدة وهو فولاذ لين ويمكن تقويته أثناء التشكيل على البارد والسحب أو التشكيل. يستخدم فى بعض ألاحيان كمعدن إنشائي نظراً لخصائصه المميزة. يتميز هذا الفولاذ بقابلية لحام ممتازة وليونة جيدة، مما يجعله مناسباً للعديد من التطبيقات، ويمكن تشكيله لأغراض متعددة كزوايا وشرائح وصفائح وألواح [11–16].

1.المواد والطرق التقنية المستخدمة:

1.1. عينات الاختبار:

السبيكة المستخدمة في هذه التجربة هي سبيكة الفولاذ **AISI 1017** و يعد الأكثر شيوعًا بين أنواع الفولاذ المدرفل على البارد

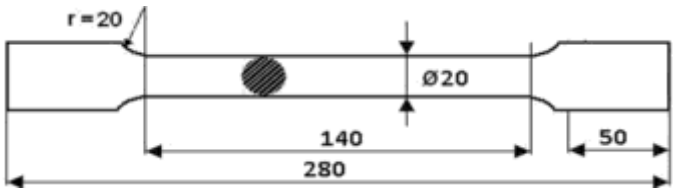
وهو متوفر عادة على شكل قضبان دائرية ومربعة وسداسية, يتميز هذا النوع بمزيج جيد من جميع خصائص الفولاذ النموذجية كالقوة، وبعض الليونة، وسهولة نسبية في التشغيل.

جدول (1) التركيب الكيميائي للفولاذ AISI 1017

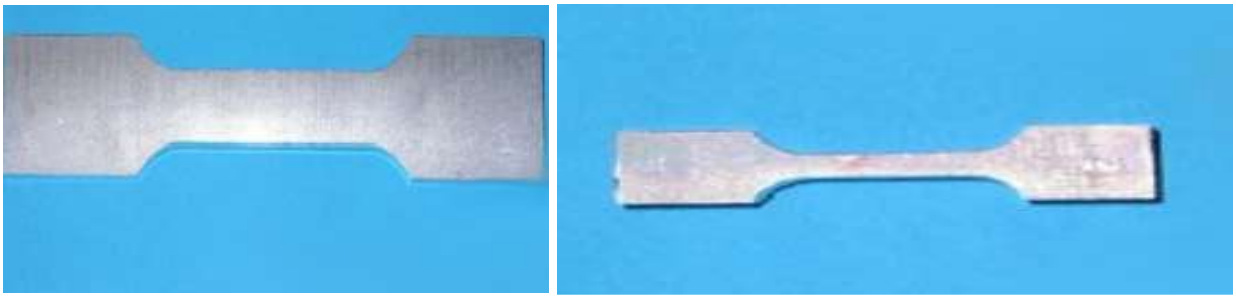
التركيب الكيميائي	P	Mn	S	Fe	C
(%)	0.04	0.30	0.05	99.30	0.15

بعد تنظيف الصفائح الفولاذية تم تجهيز عينات بأبعاد محددة لحمت كل صفيحتين باستخدام جهاز لحام القوس الكهربائي لتشكيل صفيحة واحدة، كما هو موضح في الشكل 3. وباستخدام القطع بالبلازما قطعت عينتان من الصفائح الملحومة إلى عدة عينات، وفقاً للمخطط الموضح في الشكل 1. وجهزت مجموعة من العينات لاختبار الشد بينما جهزت مجموعة أخرى لاختبار الإجهاد. اتبعت أبعاد العينات مواصفات **(ASTM)** لعينات الاختبار،يوضح الشكل2 .

عينات لاختبار الشد واختبارالتعب



شكل(1) رسم تخطيطي للعينات المختبرة



شكل(2) عينات لاختبار الشد واختبار الاجهاد والتعب

شكل(3) لحام الصفائح الفولاذية بالقوس الكهربائي

خضعت أربع من العينات الست لعملية التشكيل بالدق وهما التشكيل بالخردق التقليدي**(CSP)**،(التشكيل بالخردق الشديد **(SSP)**. يوضح الجدول2. ظروف عملية التشكيل بالدق, تتضمن عملية التشكيل ضرب العينات بجزيئات صغيرة بضغط محدد تعمل كمطرقة على مساحة صغيرة من السطح من أجل إنشاء انبعاجات أو نقرات, تم أستخدام جهاز حيود الأشعة السينية **(XRD)** لتحديد الأطوار وتحليلها، تم أستخدام جهاز اختبار الشد لإجراء اختبار الشد وتم اختبار العينات وفقاً للمعاييرالقياسية لاختبار المواد, وكذلك تم أجراء اختبار الصلابة عند ثلاث نقاط مختلفة للحصول على قيمة الصلابة عند كل نقطة.

جدول (2) التشكيل بالدق للتشكيل التقليدي (CSP) والتشكيل الشديد (SSP)

الشدة(Almen)	ضغط الهواء (psi)	المدة (ثوانى)	التغطية	حجم الطلقة
A14-16 (CSP) التقليدي	40	15	100%	S240
A30-32 (SSP) الشديد	80	20	100%	S240

شكل(4) جهاز اختبار الشد

شكل(5) جهاز اختبار الصلابة

2.1. أختبار الشد:

تقاس القوة اللازمة لكسر العينة واستطالتها من خلال اختبار قوة الشد وفقاً للمعاييرالقياسية لاختبار المواد. كما هو موضح في الجدول 3. احتفظت العينة الأولى المعالجة بتقنية التشكيل بالدق من النوع 32–30 بقوة خضوع تبلغ 365 ميجا باسكال، بينما لم تتجاوز الزيادة في قوة الشد القصوى 6%. وانخفضت الاستطالة في العينة الأولى بنحو 5%. وتعتبر هذه التغيرات طفيفة بالنسبة للعينة الأولى. أما العينة الثانية فقد أظهرت نتائج أكثر أهمية، حيث زادت قوة الخضوع بنسبة 19.9%، وزادت قوة الشد القصوى بنسبة 23.2%، بينما انخفضت الاستطالة بنسبة لا تقل عن 47.1%.

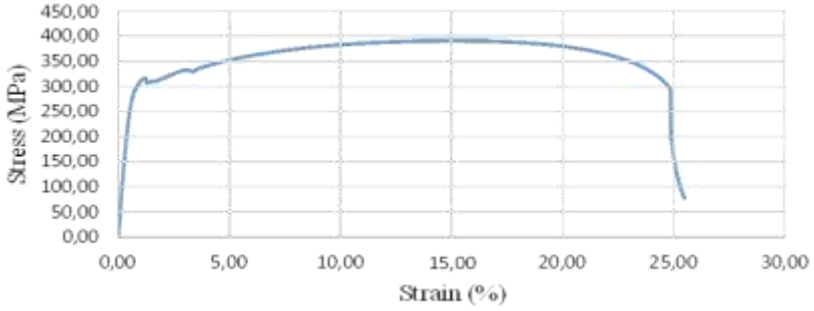
جدول (3) نتائج اختبار قوة الشد للفولاذ AISI 1017

شدة ألمن (Almen intensity)	قوة الشد القصوى (MPa)	قوة الخضوع (MPa)
30-32	398	335
30-32	395	330
14-16	380	315
14-16	375	305
غير معالج	370	280
غير معالج	365	270

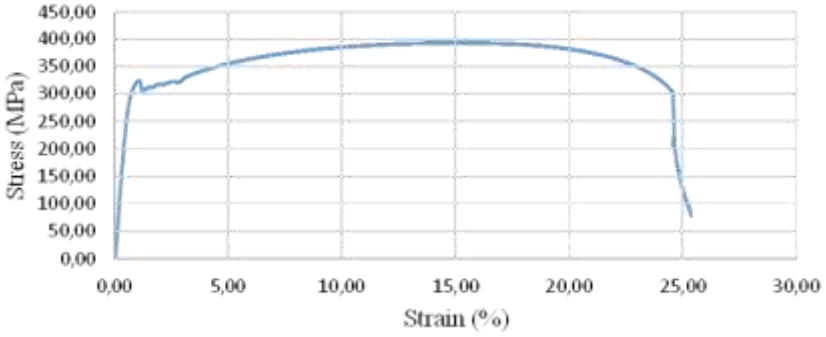
تشير النتائج إلى زيادة في مقاومة الشد مصحوبة بانخفاض في مطيلية العينة. أظهرت العينات المعالجة بتقنية التشكيل بالدق من النوع 16–14 وتلك غير المعالجة بها تغيرات طفيفة في مقاومة الخضوع ومقاومة الشد القصوى.

تظهر الأشكال (11.10.9.8.7.6) رسوم بيانية لنتائج اختبار الشد للعينات غير المعالجة والمعالجة بالتشكيل بالخردق التقليدي **(CSP)**، والمعالجة بالتشكيل بالخردق الشديد **(SSP)**، على التوالي. ومع ذلك، انخفضت الاستطالة بنسبة تتراوح بين 1.3%

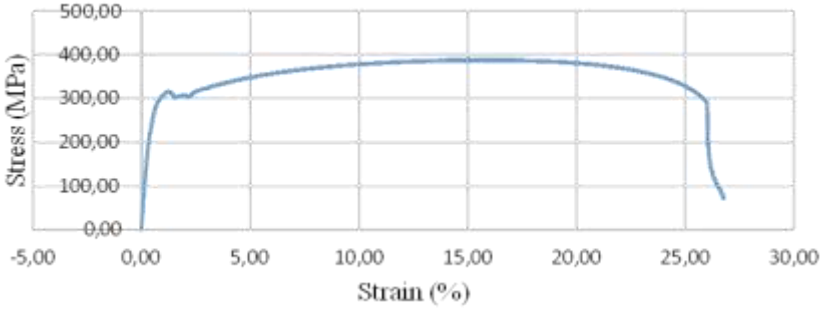
,27.5% على الأقل، مما يؤكد تأثير التشكيل بالخردق على مطيلية السبيكة. تستند هذه النتائج إلى القيم القياسية لنطاق AISI 1017. مع ذلك، أظهرت دراسات أخرى قيم مقاومة الخضوع ومقاومة الشد القصوى للسبيكة تبلغ 235 ميجا باسكال و436.8 ميجا باسكال، على التوالي، للعينات غير المعالجة. لذلك، تعتبر نتائج هذه الدراسة ذات أهمية بالغة مقارنة بتلك النتائج، كما تظهر النتائج أن التشكيل بالخردق الشديد (**SSP**) من النوع 32–30 أظهر مقاومة شد محسنة مقارنة بالتشكيل بالخردق التقليدي (**CSP**)، مما يؤكد نتائج الدراسات السابقة في هذا الصدد . عموماً، أظهر التشكيل بالخردق مقاومة محسنة مقارنة بالعينات غير المعالجة.



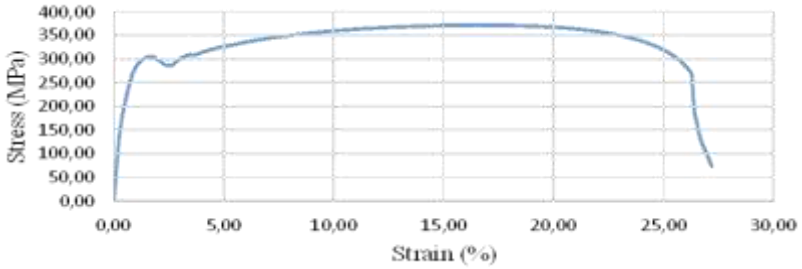
شكل(6) منحنى اختبار الشد لعينة التشكيل الشديد **(1) SSP**



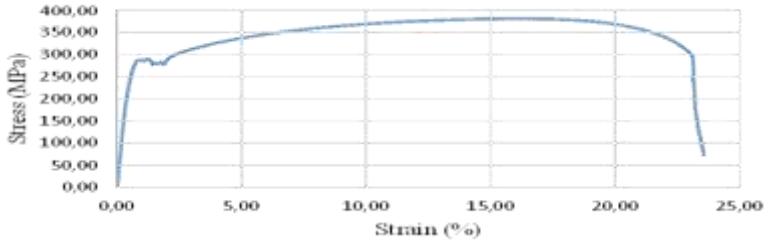
شكل(7) منحنى اختبار الشد لعينة التشكيل الشديد **(2) SSP**



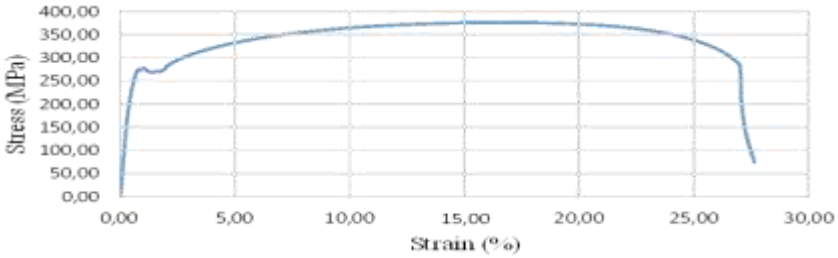
شكل(8) منحني اختبار الشد لعينة التشكيل التقليدي**(1) CSP**



شكل(9) منحني اختبار الشد لعينة التشكيل التقليدي**(2)** **CSP**



شكل(10) منحني اختبار الشد لعينة**(1)** غير معالجة



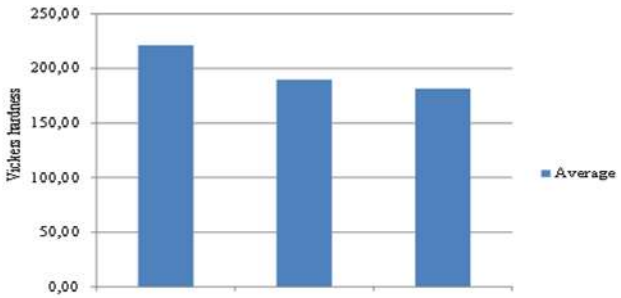
شكل(11) منحني اختبار الشد لعينة**(2)** غير معالجة

3.1. أختبار الصلابة المجهرية:

تم أجراء الصلابة المجهرية فيكرز بتطبيق حمل مقداره كيلوغرام واحد لمدة 20 ثانية باستخدام مؤشر كروي, تقاس القيم باستخدام مجهر ضوئي معاير لقياس الإجهاد بوحدة ميجا باسكال، كما هو موضح في الجدول 4. والشكل12. تظهر النتائج أن عملية التشكيل بالدق زادت الصلابة من قيمتها الأصلية البالغة 160 لسبائك AISI 1017 بنسبة تتراوح بين 21.7% , 48.1% في المتوسط, مما يبين بأنه قيم الصلابة المحصلة في هذه الدراسة توضح تحسن كبير فى صلابة الفولاذ منخفض الكربون.

جدول (4) قيم اختبار الصلابة

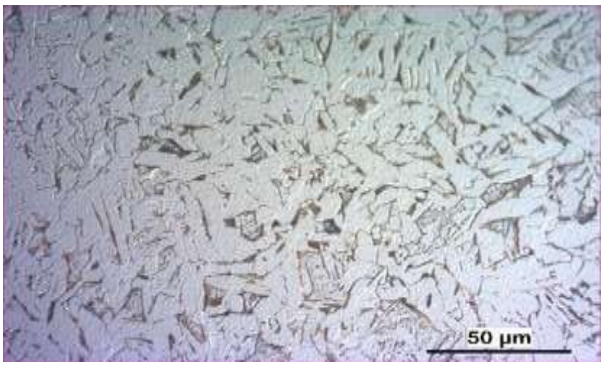
شدة ألمن (Almen intensity)	القيمة (1)	القيمة (2)	القيمة (3)	المتوسط
30-32	224	226	220	223.33
14-16	190	193	189	190.66
غير معالج	184	183	182	183



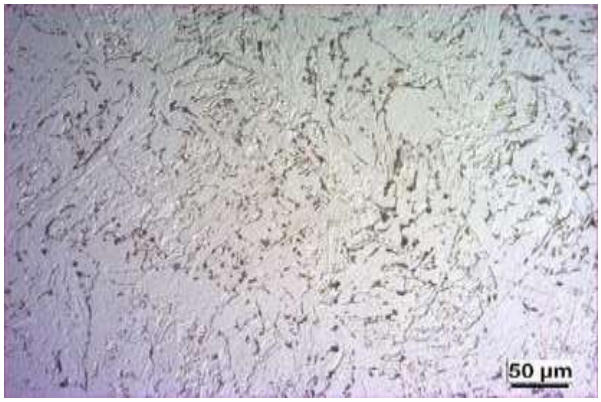
شكل(12) قيم الصلابة للسبائك التي تم فحصها

4.1. المجهر الضوئي:

تم فحص عينتين باستخدام المجهر الضوئي (الشكل14,13) لدراسة البنية المجهرية والتغيرات الميكانيكية الناتجة عن معالجة التشكيل بالخردق. أثرت عملية التشكيل بالخردق باستخدام خردق CSP على طبقة رقيقة بتأثير طفيف، بينما كان للتشكيل بالخردق باستخدام خردق SSP تأثير أقوى على طبقة أكثر سمكاً، في حالة الخردق ذي الشدة العالية لوحظ وجود بنية داخلية واضحة. وتظهر أطوار الفريت والبيرلايت بوضوح مع الخردق ذي الشدة العالية SSP .



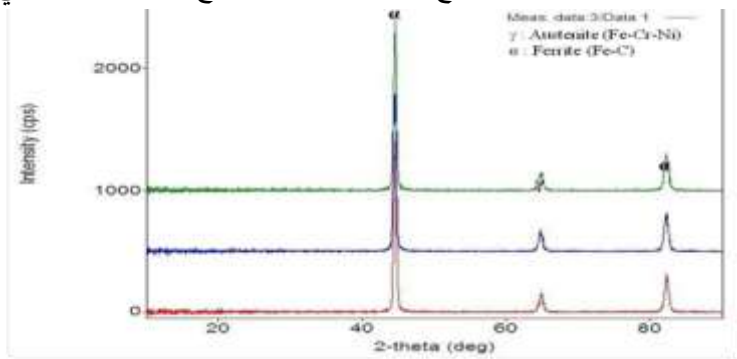
شكل(13) صورة مجهرية ضوئية لعينة معالجة بالتشكيل الشديد (SSP)



شكل(14) صورة مجهرية ضوئية لعينة معالجة بالتشكيل التقليدي(CSP)

5.1. تحليل الأشعة السينية (XRD):

لتحديد المادة البلورية في العينات المعالجة بالتشكيل بالدق تم استخدام تحليل حيود الأشعة السينية(**XRD**)، يوضح الشكل 15. قمم ثلاث عينات متطابقة في النمط من حيث الطور و والوضعية مع اختلافها في الشدة، يشير التوسع الطفيف عند 65.5, 83.4 درجة إلى وجود كميات ضئيلة من السبائك البلورية النانوية. تظهر القمم الثلاث الموضحة في الشكل حدوث تغيرات في الإجهادات الدقيقة مع التشكيل بالدق وانخفاض شدتها مع ازدياد شدة التشوه الناتج عن هذه العملية في الفولاذ منخفض الكربون.



شكل(15) مخطط حيود الأشعة السينية

2. الخاتمة و الخلاصة:

يمكن تحسين خصائص السبائك باستخدام تقنيات التشكيل على البارد مثل التشكيل بالدق بهدف تحسين المتانة والخشونة والبنية المجهرية. وقد تم دراسة تأثير التشكيل بالدق التقليدي (**CSP**) والتشكيل بالدق الشديد (**SSP**) على الخواص الميكانيكية لصلب **AISI 1017** من خلال مقارنتها بعينات غير معالجة، استخدمت شدتان وفقاً لمقياس ألمن، **(16-14)**، **(32-30)**.

أظهرت نتائج مقاومة الشد تحسينات في قيم مقاومة الخضوع ومقاومة الشد القصوى حيث بلغت 19.9%، 23.2% مع التشكيل بالدق التقليدي (**CSP**) والتشكيل بالدق الشديد (**SSP**) على التوالي، بينما انخفض الاستطالة بنسبة تصل إلى 27.3 %، مما يؤكد انخفاض المطيلية مع التشكيل بالدق.

ازدادت صلابة السبيكة في العينات المعالجة وأظهرت تحليلات حيود الأشعة السينية (**XRD**) تغيرات في البنية المجهرية، وقد تم دراسة شدة التشوه باستخدام المجهر الضوئي وتبين بأنهاازدادت، كما لوحظ ازدياد في سمك الطبقة في حالة معالجة (**SSP**) (مقارنة بحالة المعالجة التقليدية **CSP**). يوصى بإجراء اختبارات مماثلة على أنواع أخرى من الفولاذ منخفض الكربون بما في ذلك **AISI 1017** للمقارنة والاستناد إليها في الأبحاث المستقبلية ولإنشاء قاعدة بيانات شاملة لهذه السبيكة.

5.المراجـــــع:

[1] M. K. Singh, "Application of Steel in Automotive Industry," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering,* vol. 6, no. 7, pp. 246-253, 2016.

[2] V. Sharma, R. Kumar, H. Singh, W. Ahmad and Y. Pratap, "A Review Study on uses of steel in construction," *International Research Journal of Engineering and Technology,* vol. 4, no. 4, pp. 1140-1142, 2017.

[3] A. Kubit, M. Bucior, W. Zielecki and F. Stachowicz, "The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel," *Procedia Structural Integrity,* vol. 2, pp. 3330-3336, 2016.

[4] D. Kumar, S. Idapalapati, W. Wang and S. Narasimalu, "Effect of Surface Mechanical Treatments on the Microstructure-Property-Performance of Engineering Alloys," *Materials*

(Basel), vol. 12, no. 16, p. 2503, 2019.

[5] H. S. Ho, D. L. Li, E. L. Zhang and P. H. Niu, "Shot Peening Effects on Subsurface Layer Properties and Fatigue Performance of Case-Hardened 18CrNiMo7-6 Steel," *Advances in Materials Science and Engineering,* 2018.

[6] D. Cseh, V. Martinger and J. Lukacs, "Residual Stress Behavior in Hardened Shot Peened 42CrMo4 Specimens during Fatigue Load," *Materials Research Proceedings,* vol. 2, pp. 491-496, 2016.

[7] H. D. Bowman, History and Development of the Steel Industry: Thesis, London: Forgotten Books, 2019.

[8] P. C. Angelo and B. Ravisankar, Introduction to Steels: Processing, Properties, and Applications, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2019.

[9] H. Bhadeshia and R. Honeycombe, Steels: Microstructure and Properties, 4th ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

[10] K. Liverman, Alloy Steel: Features and Applications, New York: NY RESEARCH PRESS, 2015.

[11] A. Fadaei and H. Mokhtari, "Finite Element Modeling and Experimental Study of Residual Stresses in Repair Butt Weld of ST-37 Plates," *IJST, Transactionsof Mechanical Engineering,* vol. 39, no. M2, pp. 291-307, 2015.

[12] S. Djebali, S. Larbi and A. Bilek, "Tenacity of Sheet Steel ST37-2 by the Essential Work of Fracture Method," *Procedia Engineering,* vol. 114, pp. 306- 313, 2015.

[13] O. Turcan, O. Dontu, J. L. Ocana Moreno, I. Voiculescu and I. M. Vasile, "Aspects Regarding the Possibility of Increasing Hardness on a Low Carbon Steel ST37-2 by Surface Treatment with CO2 Laser," *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science,* vol. 76, no. 2, 2014.

[14] N. Chhabra and V. Bansal, "A Review of Effect of Shielding Gases Mixture on Welded Joint Properties of Low Carbon Steel in Mig/Mag Welding Process," *International Journal of Scientific Research,* vol. 5, no. 1, pp. 34-36, 2016.

[15] S. Karthick, S. Muralidharan and V. Saraswathy, "Corrosion performance of mild steel and galvanizediron in clay soil environment," *Arabian Journal of Chemistry,* vol. 13, pp. 3301-3318, 2020.

[16] R. Rakhmetov, S. A. Krainov, M. N. Nazarova and A. N. Tsenev, "Research of main gas pipelilne (steels X65, X60, 17G1S) susceptibility to stress corrosion cracking, hydrogen uptake and ST 37-2 steel fatigue testing," *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science,* vol. 194, 2018.

[17] M. I. Mohamed, "Studies of the Properties and Microstructure of Heat Treated 0.27% C and 0.84% Mn Steel," *Engineering, Technology and Applied Science Research (ETASR),* vol. 8, no. 5, pp. 3484-3487, 2018.

[18] M. Yazdani, M. R. Toroghinejad and S. M. Hashemi, "Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of St37 Steel-Ck60 Steel Joints by Explosive Cladding," *Journal of Materials Engineering and Performance,* vol. 24, pp. 4032-4043, 2015.

[19] M. A. Omari, H. M. Mousa, F. M. Al-Oqla and M. Aljarrah, "Enhancing the surface hardness and roughness of engine blades using the shot peening process," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,* vol. 26, no. 8, pp. 999-1004, 2019.

[20] O. Unal, I. Zulcic, R. Varol, I. Karademir and S. Ates, "Novel type shot peening applications on railway axle steel," *Journal of Mineral Metal and Material Engineering,* vol. 2, pp. 1-5, 2016.

[21] A. Ampaiboon, O. U. Lasunon and B. Bubphachot, "Optimization and Prediction of Ultimate Tensile Strength in Metal Active Gas Welding," *The Scientific World Journal,* 2015.

[22] D. Sumardiyanto and S. E. Susilowati, "Effect of WeldingParameters on Mechanical Properties of Low Carbon Steel API 5L Shielded Metal Arc Welds," *American Journal of Materials Science,* vol. 9, no. 1, pp. 15-21, 2019.

[23] M. A. Bodude and I. Momohjimoh, "Studies on Effects of Welding Parameters on the Mechanical Properties of Welded Low-Carbon Steel," *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering,* vol. 3, pp. 142-153, 2015.

[24] O. Turcan, O. Dontu, J. L. Ocana Moreno, I. Voiculescu and I. M. Vasile, "Aspects Regarding the Possibility of Increasing Hardness on a Low Carbon Steel ST37-2 by Surface Treatment with CO2 Laser," *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science,* vol. 76, no. 2, 2014.