



ISSN: 1813-162X (Print) ; 2312-7589 (Online)

Tikrit Journal of Engineering Sciences

available online at: <http://www.tj-es.com>

TJES
Tikrit Journal of
Engineering Sciences

Abtan NS, Yagoob JA, Shukri AM. Study the effect of welding pass number on the mechanical and metallurgical properties of Aluminum type Al 1050 H14 produced by friction stir welding. *Tikrit Journal of Engineering Sciences* 2021; 28(4): 1- 13.

Najeeb Salman Abtan ^{1,*}

Jawdat Ali Yagoob²

Ayshah Mohammed Shukri³

^{1,3} Department of Mechanical Engineering, Tikrit University, Salahuddin, Iraq

²Department of Air Conditioning and Refrigeration, Northern Technical University, Kirkuk, Iraq.

Keywords:

Friction Stir Welding, Aluminum Welding, Al 1050 H14, Three-paths welding, single-side stir welding.

ARTICLE INFO

Article history:

Received	20 Mar. 2021
Accepted	14 June 2020
Available online	01 Oct. 2021

Study the effect of welding pass number on the mechanical and metallurgical properties of Aluminum type Al 1050 H14 produced by friction stir welding

A B S T R A C T

Friction Stir Welding (FSW) is a solid state welding technique with non-fusible rotary welds. Heat is generated by the friction produced between the weld tool and the two opposite surfaces of the two welded parts and the tool works on mechanical mixing with the presence of heat, pressure, and heat generated, reaching approximately (80-90%) of the melting point of the metal to be welded. In this study, Al 1050 H14 aluminum with a thickness of (6mm) was used for the purpose of welding it by means of the friction stir welding process in a butt welding method to obtain similar welding joints. A set with a square stitching tool Made of alloy steel was used by using a milling machine, with fixed (rotational speed of 1008 rpm and linear velocity of 40mm / min), an inclination angle of (2°), and counterclockwise rotation. The efficiency of welded joints was evaluated through static mechanical tests. Tensile tests, microscopic hardness, and visual examination. The results for all welds showed that the mixing zone (NZ) consists of fine grains of equal axes compared to the base metal. When welding on one side and in one path, the microstructure of HAZ was similar to the base metal. TAMZ was a transition region between HAZ and NZ. As for welding on one side, with two paths and three paths, the structure turned into a fine crystalline structure. By increasing the number of paths per side, the welding efficiency of the welded sample increased as the best efficiency was from one side and three paths (76.215%). Through the results, the tensile strength increases with the increase in the number of paths, as the best tensile strength was obtained when conducting the welding process from one side and by three paths, which is (93.653 MPa). It is equivalent to 76.21% of the tensile strength of the base metal. The hardness value in the weld zone (NZ) is higher than the other two zones (HAZ, TMAZ) due to the occurrence of dynamic recrystallization, which results in very fine and equiaxial crystals, but the hardness value in the weld zone remains less than the hardness value of the base metal.

© 2021 TJES, College of Engineering, Tikrit University

DOI: <http://doi.org/10.25130/tjes.28.4.01>

* Corresponding author: E-mail: najeebsalman@tu.edu.iq Department of Mechanical Engineering, Tikrit University, Salahuddin, Iraq

دراسة تأثير عدد الأشواط على الخواص الميكانيكية والميتالورجية للالمنيوم Al1050 H14 بطريقة اللحام الخلط الاحتكاكي

نجيب سلمان عبطان قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة تكريت، صلاح الدين، العراق.
جودت علي يعقوب الكلية التقنية كركوك، الجامعة التقنية الشمالية، كركوك، العراق.

ايشان محمد شكري يونس قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة تكريت، صلاح الدين، العراق.

لحام الخلط الاحتكاكي (Friction Stir Welding (FSW هو تقنية اللحام في الحالة الصلبة يتم بواسطة عدة لحام دوارة غير قابلة للانصهار في ظروف اللحام، تتولد الحرارة عن طريق الاحتكاك الناتج بين عدة اللحام وبين السطحين المتقابلين لجزأي الملحومة وتعمل العدة على الخلط الميكانيكي بوجود الحرارة والضغط. تصل درجة الحرارة المتولدة في منطقة اللحام إلى (80-90%) تقريبا من درجة انصهار المعدن المراد لحامه. تم في هذه الدراسة استخدام صفيحة المنيوم Al 1050 H14 ذات سمك (6mm) لغرض لحامها بواسطة عملية لحام الخلط الاحتكاكي بطريقة تناكبيه (Butt Welding) للحصول على وصلات لحام متشابهة. تم استخدام عدة ذات أداة عرز مربعة الشكل مصنوعة من الفولاذ السبائكي باستخدام ماكينة تفرز عمودية وعند الثوابت (السرعة الدورانية البالغة 1008 rpm والسرعة الخطية 40mm/min) وبزاوية ميلان مقدارها (2°) وبدوران عكس عقرب الساعة. تم تقييم كفاءة الوصلات الملحومة من خلال اجراء اختبري الشد والصلادة المجهريه والفحص البصري. أظهرت النتائج لجميع الملحومات ان منطقة الخلط (NZ) تتكون من حبيبات ناعمة متساوية المحاور مقارنة بالمعدن الأساس. عند اللحام من جهة واحدة وبواقع شوط واحد كانت البنية المجهريه لمنطقة (HAZ) مشابهة للمعدن الأساس. ومنطقة (TAMZ) كانت منطقة انتقالية بين (HAZ) و(NZ). اما عند اللحام من جهة واحدة وبواقع شوطين وثلاثة أشواط تحولت البنية إلى بنية بلورية ناعمة، بزيادة عدد الأشواط للجهة الواحدة تزيد من كفاءة اللحام للعينه الملحومة حيث كانت افضل كفاءة عند اللحام من جهة واحدة وثلاثة أشواط (76.215%). من خلال النتائج تزداد مقاومة الشد بزيادة عدد الأشواط حيث تم الحصول على أفضل مقاومة شد عند اجراء عملية اللحام من جهة واحدة وبواقع ثلاثة أشواط والتي يبلغ مقدارها (93.653 MPa)، وتعادل 76.21% من مقاومة الشد للمعدن الأساس. ارتفاع قيمة الصلادة في منطقة اللحام (NZ) عما سواه في المنطقتين (HAZ, TMAZ) بسبب حدوث إعادة التبلور الديناميكية (Dynamic recrystallization) والتي تنشأ عنها بلورات ناعمة جدا ومتساوية المحاور، ولكن قيمة الصلادة في منطقة اللحام تبقى اقل من قيمة الصلادة للمعدن الأساس.

الكلمات الدالة: لحام الخلط الاحتكاكي، لحام الالمنيوم، Al 1050 H14، لحام بثلاثة أشواط، لحام الخلط من جهة واحدة

1- المقدمة:

الاحتكاكي، حيث استخدم صفائح من السبيكة بسمك (6 mm) وذلك لغرض اعداد وصلات اللحام. استخدمت أداة لحام بأشكال مختلفة وهي مربع ومثلث، وأسطوانى مسنن، وأسطوانى مدبب وارتفاع كل منها (5.7 mm) وبقطر (6 mm) ولكل منها كتف مسطح عرضة (18 mm) وخمسة سرع دورانية (800, 1000, 1200, 1400, 1600 rpm). أجريت عملية اللحام عند سرعة ثابتة مقدارها (1.25 mm/sec) أجريت اختبري الشد والصلادة وفحص البنية المجهريه. استنتج الباحث ان العينات الملحومة باستخدام العدة ذات نتوء الغرز المربع تعطي اعلى قيمة لمقاومة الشد عند سرعة لحام (1200 rpm). العينات الملحومة كذلك اعطت اعلى قيم للصلادة، بغض النظر عن السرعة الدورانية، والعينات الملحومة عند سرعة دورانية (1200 rpm) اعطت اعلى قيمة صلادة لمنطقة الخلط، بغض النظر عن شكل نتوء الغرز. الملحومات التي انتجت باستخدام العدة ذات نتوء الغرز المربع عند السرعة الدورانية (1200 rpm) تمتلك بنية مجهرية ناعمة، وحبيبات منتظمة، وتوزيع منظم للدقائق المترسبة وهذا بالتالي يفسر قيم مقاومة الشد العالية لهذه الملحومات [11].

أجرى الباحثون (Abtan NA, et al.) عام 2018 دراسة نظرية وعملية لحام الخلط الاحتكاكي لسبائك الالمنيوم المتشابهة والمختلفة (AA6061-T4, AA2024-T3) واستخدام سرعات دورانية مختلفة (20, 32, 45, 690, 1130, 2000 rpm) وسرعات خطية مختلفة (20, 32, 45, 69 mm/min) وثلاثة ابعاد لعدة اللحام، وتمت اختبارات ميكانيكية وميتالورجية للملحومات. تم استنتاج بان السرعة الدورانية لعدة اللحام والسرعة الخطية لها تأثير مباشر على الخواص الميكانيكية والميتالورجية وبينت بان اعلى درجة حرارة كانت في منطقة الخلط (NZ) وتزداد بزيادة السرعة الدورانية. مع وجود تقارب كبير بين نتائج التوزيع الحراري المقاسة عمليا ونظريا. اعلى قيمة صلادة كانت عند (NZ) وتزداد بزيادة السرعة الدورانية وان اعلى قيمة صلادة للملحومات كانت عند سرعة دورانية (2000 rpm) ومعدل تغذية (20 mm/min) اعلى من قيمة صلادة المعدن الأساس [12].

درس الباحثان (Albash AM, Shihab GR.) عام 2021 تأثير زمن السفع بالكرات الفولاذية على بعض الخواص الميكانيكية لوصلات لحام الخلط الاحتكاكي (FSW) لسبائك الالمنيوم (T3 – 2024)، يهدف البحث الى دراسة تأثير زمن السفع بالكرات الفولاذية بقطر (3 mm)

لحام الخلط الاحتكاكي (FSW) كطريقة لحام حالة صلبة لوصل صفائح والواح الالمنيوم بدون اسلاك حشو. تشمل المواد التي تم لحامها بنجاح حتى الان بهذه الطريقة جميع سبائك الالمنيوم تقريبا والتي تشمل (1xxx to 8xxx). هذه التقنية موفرة للتكلفة وتعطي خصائص ميكانيكية ممتازة ومقاومة عالية وتشويه منخفض [1]. كما استخدمت هذه التقنية في لحام معادن أخرى، وهي تقنية ربط جيدة وتعد من الطرائق المهمة للحام لسبائك الالمنيوم التي لها قابلية ضعيفة للحام بطريقة اللحام الانصهاري، ان من فوائد لحام الخلط الاحتكاكي (FSW) للالمنيوم مقارنة مع طرق اللحام التقليدية، هو استخدامها في لحام المعادن المختلفة في التركيب الكيميائي (Dissimilar Materials) [2,3,4]. كما يقلل التصدعات والفجوات الهوائية والتشوهات التي تحدث في منطقة اللحام، لان اللحام يتم في درجة حرارة اقل من درجة انصهار المعدن الذي يراد لحامه. بالإضافة الى ذلك عدم استخدام معدن حشو اثناء عملية اللحام وهي من طرق اللحام النظيفة لعدم الحاجة الى استخدام غازات خاملة كغطاء واقى، كذلك لا تستخدم مساعد صهر ولا تنشأ ادخنة او غازات سامة خلال عملية اللحام، بالتالي يعتبر هذا النوع من اللحام صديق للبيئة ويسمى بالتقنية الخضراء (Green Technology) [5,6,7]. ان من اهم خواص الالمنيوم التي شجعت على استخدامه هي خفة وزنه مقارنة بباقي المعادن، وهو كمادة هندسية يلي الفولاذ في اهميته حيث كثافته تقريبا ثلث كثافة الفولاذ، فضلا عن كونه منخفض الكلفة نسبيا فهو من أكثر الفلزات وفرة في القشرة الأرضية، اذ ان ترتيبه الثالث من بين العناصر المتوفرة في الكرة الأرضية بعد عنصرى الأوكسجين والسليكون حيث يشكل نسبة (7.5-8.1%) من وزن سطح الأرض وهو من أكثر المعادن فعالية من الناحية الكيميائية [8]. من خواص الالمنيوم الأخرى هي سهولة تشكيله وكذلك امتلاكه توصيلية عالية للكهرباء والحرارة ومقاومتها الجيدة للتآكل، بسبب الفته العالية للاتحاد بعنصر الأوكسجين وتكوين طبقة سطحية رقيقة غير نافذة من أوكسيد الالمنيوم (Al_2O_3) تتشكل عندما يتعرض الفلز للهواء، تعمل على وقايتها من التآكل فضلا عن تلك الخواص يعتبر الالمنيوم معدن غير سام لذلك يستخدم في صناعة علب حفظ الأغذية والمشروبات الغازية [9,10].

درس الباحث (Elan govan) عام (2008)، تأثير الشكل الهندسي لنتوء الغرز، والسرعة الدورانية لأداة اللحام على الخواص الميكانيكية، لملحومات سبيكة الالمنيوم (AA 6061) المستخدمة بطريقة لحام الخلط

بوساطة ماكينة تفريز، ودراسة تأثير عملية اللحام من جهة واحدة بواقع (شوط واحد، شوطين وثلاثة أشواط) على الخواص الميكانيكية للوصلات الملحومة وذلك بعد اجراء الاختبارات الميكانيكية.

2- مبدأ لحام الخلط الاحتكاكي

ينتج لحام الخلط الاحتكاكي ملحومات باستخدام اداة لحام دوارة غير قابلة للانصهار تستخدم لتليين (Soften) القطعة التي يراد لحامها من خلال الحرارة التي تنتج عن طريق الاحتكاك والتشوه اللدن (Plastic Deformation) مما يسمح للأداة بخلط (Stir) مادتي القطعتين المراد لحامها [14].

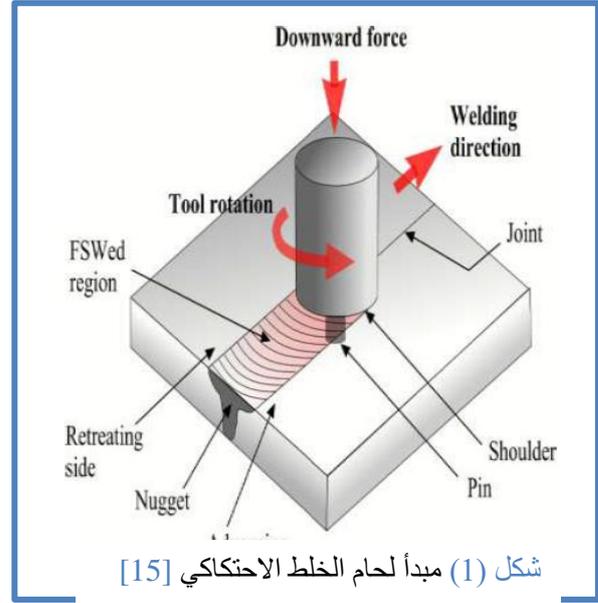
تكون أداة اللحام ذات شكل أسطواني تدعى الكتف (Shoulder)، تحتوي في نهايتها السفلى على نتوء للغرز (Probe or pin)، تغرز بصورة تدريجية في منطقة تلامس الصفائح المراد لحامها وتستمر عملية الغرز لحين الحصول على تلامس تام بين السطح السفلي لمسدند أداة اللحام والسطح العلوي للصفائح المراد لحامها [4]. كما مبين في الشكل (1).

ان الحرارة المتولدة في القطع المراد لحامها ناتجة عن الاحتكاك الحاصل بين نتوء الغرز والمسند لأداة اللحام من جهة والقطع المراد لحامها من جهة أخرى، كذلك ناتجة من التشوه اللدن الحاصل في القطع المراد لحامها وتعمل هذه الحرارة الاحتكاكية المتولدة على تليين المعدن حول نتوء الغرز وبسبب دوران الأداة فأنها تعمل على تحريك المعدن اللين من امام نتوء الغرز الى خلفه مما يؤدي الى ملئ الفراغ او الحفرة التي كونتها أداة اللحام سابقا، بعد اكتمال عملية الغرز والتسخين يتم تحريك الصفائح حركة خطية نسبية الى الأداة الدوارة وهذا يؤدي الى إتمام عملية الربط على طول خط اللحام [4,16].

3- الجانب العملي

استخدم في هذا البحث الالمنيوم النقي نوع (1050) بسمك (6mm)، وبالتركيب الكيميائي المبين في الجدول (1). اما الجدول (2) يبين الخواص الميكانيكية للالمنيوم النقي (1050).

على الخواص الميكانيكية لوصلات لحام تناكبيه لسبيكة الالمنيوم (T3 – 2024) تم لحامها بطريقة الخلط الاحتكاكي (Friction stir welding). اجريت الاختبارات الميكانيكية على وصلات اللحام لمعرفة



مقدار تباين هذه الخواص . بينت نتائج الفحص بأزمان السفع من (5-10) دقيقة تحسن في الخواص الميكانيكية (مقاومة الشد، مقدار الصلادة، مقاومة الكلال)، والتي بينت بأنه كلما زاد زمن السفع تزداد الخواص الميكانيكية الى حد معين ومن ثم يبدأ التأثير بالتباين حيث انه عند زمن سفع 15 دقيقة تنخفض الخواص الميكانيكية لمقاومة الشد والصلادة ومقاومة الكلال وذلك بسبب تركز الاجهادات والتلدين السطحي. تشير نتائج الاختبار الى ان الحصول على افضل خواص ميكانيكية عند زمن سفع 10 دقيقة باستخدام كرات من الفولاذ بقطر وذلك بسبب الاجهادات الانضغاطية العالية التي ولدتها عملية السفع [13].

ان الهدف من هذه الدراسة امكانية لحام الالمنيوم AI 1050 H14 متماثلة وبسمك (6 mm) بطريقة لحام الخلط الاحتكاكي (FSW) الجدول (1) النسب المقاسة للالمنيوم النقي (1050).

Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Min								99.50
Max	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
Results	0.094	0.303	0.005	0.006	0.003	0.023	0.011	99.50

الجدول (2)

الخواص الميكانيكية للالمنيوم النقي (1050).

Elements	Yield stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation A50(%)
Min	85	105	5
Max		145	
Results	110	125	6.0

1-3 عدة اللحام Welding Tool

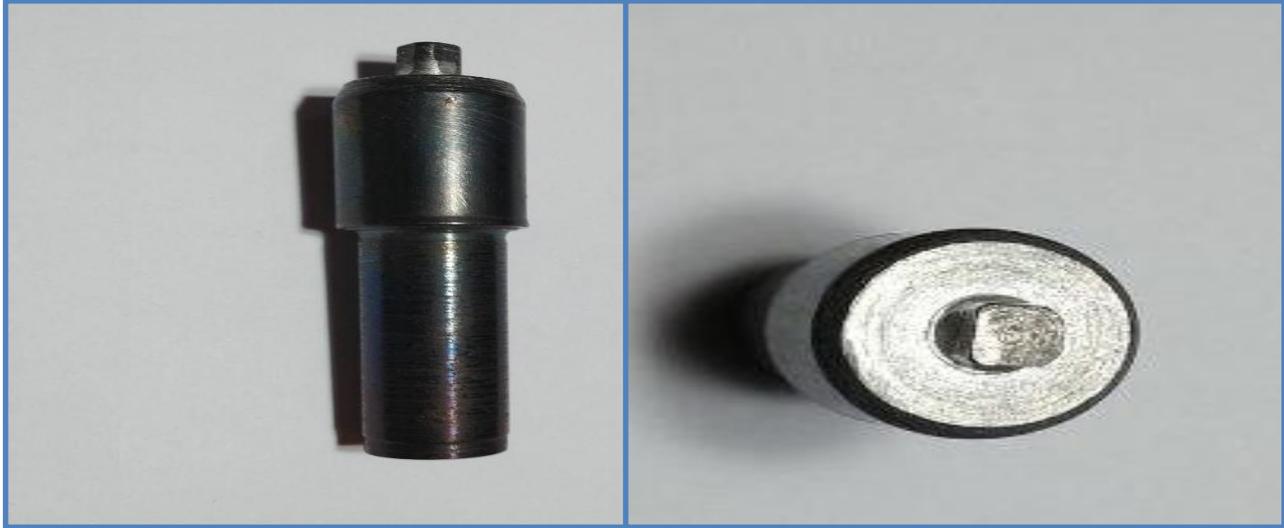
اللحام محليا من الفولاذ السبائكي ذات صلادة عالية بمقدار (581 HV)، الشكل الهندسي للعدة يتألف من أداة غرز مربعة الشكل وكتف غير مقعر وجزء تثبيت في ماكينة التفريز، ابعاد العينة موضحة في الجدول (3). والشكل الهندسي للعدة اللحام مبين في الشكل (2).

لعدم توفر الماكينة الخاصة بعملية لحام الخلط الاحتكاكي فقد أجريت العملية بماكينة تفريز عمودي من نوع (KNUTH) الماني المنشأ الموجودة في الورش الميكانيكية/ الكلية التقنية كركوك. لغرض تهيئة الماكينة لعملية اللحام تم تصنيع عدة لحام تتلاءم مع الماكينة المستعملة وبأبعاد تناسب ماسك العدة في ماكينة التفريز العمودية. تم تصنيع عدة

الجدول (3)

ابعاد عدة اللحام المستخدمة في عملية لحام الخلط الاحتكاكي.

قطر الكتف	طول أداة الغرز	قطر أداة الغرز	عدة اللحام
18 mm	5.4 mm	6 mm	

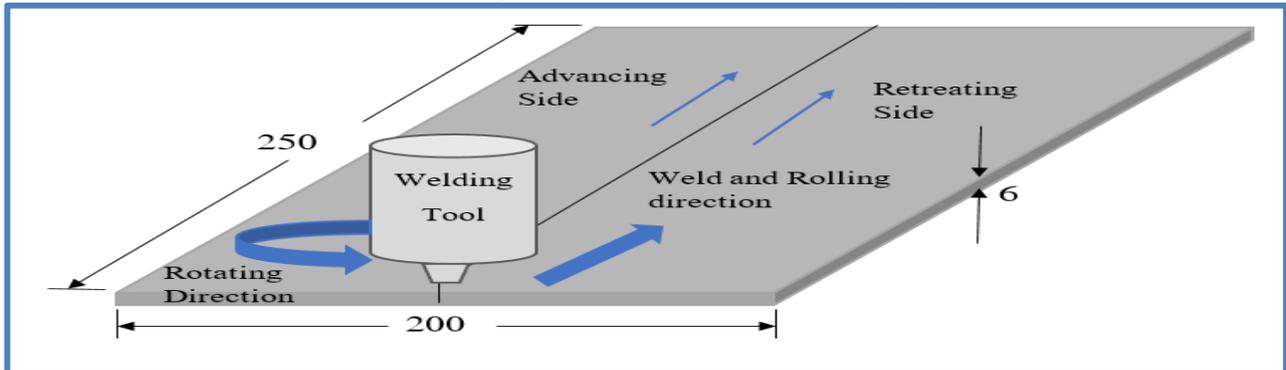


الشكل (2) الشكل الهندسي للعدة المستخدمة

2-3 خطوات عملية لحام الخلط الاحتكاكي FSW Process Procedures

العدة بزواوية مقدارها (2°) على المحور العمودي ومن الجدير بالذكر القيمة المثلى لزواوية الميلان هي بحدود (2-4°) [17]. واختيار الدوران باتجاه عكس عقرب الساعة. تم ادخال متغيرات عملية اللحام باستعمال لوحة التحكم لماكينة التفريز.

استخدم لعملية اللحام ماكينة تفريز نوع (KNUTH) ذو المنشأ الماني الموجودة في الورش الميكانيكية/ الكلية التقنية كركوك، تم تثبيت جزأي الملحومة بشكل تناكبي على اللوحة الحديدية الساندة المثبتة على سطح العربة المتحركة لماكينة التفريز وكما موضح في الشكل (3). تمت امالة

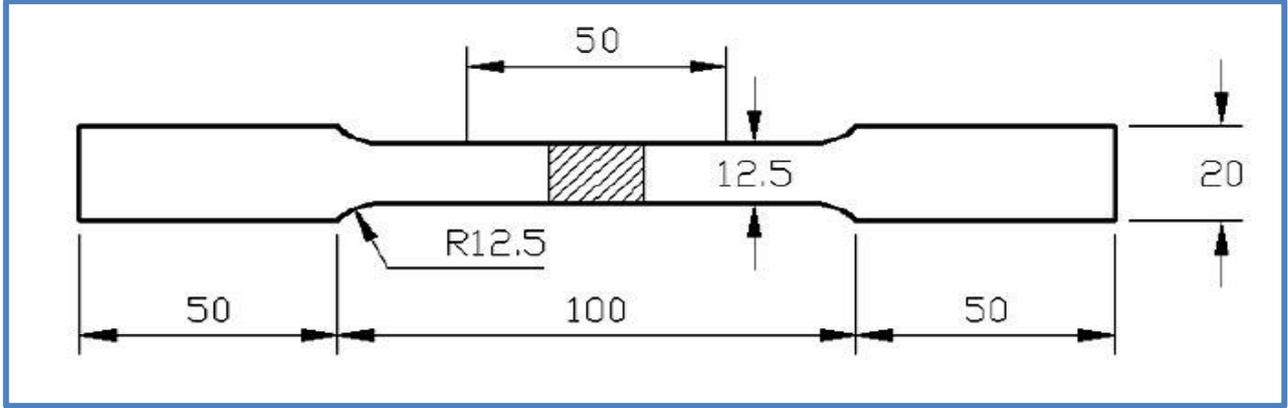


الشكل (3) أبعاد جزأي الملحومة (جميع الأبعاد بالملم)

3-3 اختبار الشد الاستاتيكي Tensile Test

المراد تشغيلها وحسب القياسات المطلوبة، تم تشغيلها بواسطة ماكينة تفريز لعينات اختبار الشد.

تم تحضير العينات الملحومة للحصول على عينات شد قياسية وذلك حسب المعيار العالمي (ASTM B557M) [18] والموضحة ابعادها في الشكل (4). اذ تم عمل عيني اختبار لكل ملحومة، قطعت العينات

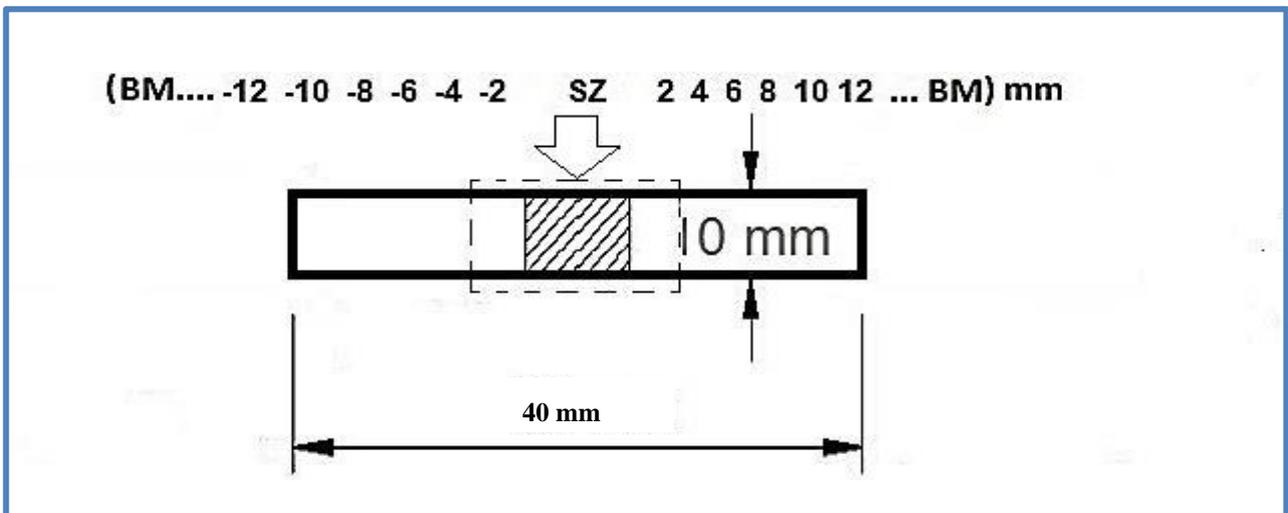


الشكل (4) الابعاد القياسية لعينات اختبار مقاومة الشد بموجب المعيار العالمي (ASTM B557M) (جميع الابعاد بالمليمتر) [18].

أجريت اختبار الصلادة المجهرية للمعدن الأساس والعيّنات الملحومة التي تم لحامها بالخالط الاحتكاكي باعتماد متغيرات محددة. تم تحضير عينات لغرض إعطاء معلومات عن قيم الصلادة في مختلف مناطق اللحام اذ تم اختبار الصلادة على السطح العلوي والجانب للعيّن، كما موضح في الشكل (5). تم اجراء اختبار صلادة فيكرز (Vickers) باستخدام جهاز الصلادة (THV-501E) المبرمج ذو منشأ فرنسي من شركة (METKON)، بتسليط حمل مقداره (500 g) بوساطة أداة الغرز ذات شكل هرمي رباعي القاعدة ولمدة 5 sec بعد ذلك يتم إزالة الحمل وقياس قطر الأثر الناتج من خلال الجهاز عن طريق تحديد قطري الأثر الهرمي.

تم اجراء اختبار مقاومة الشد لجميع الملحومات والمعدن الأساس بدرجة حرارة الغرفة وباستخدام ماكينة الاختبارات (Tostometric) ومنشأ (UK). تم اختبار الشد على الماكينة بتسليط حمل بسرعة (1 mm/min) على العينة لحين حدوث الفشل وقراءة الحمل الأقصى من الشاشة الخاصة بالماكينة، علما ان للماكينة إمكانية حفظ القيمة القصوى للحمل والاستطالة قبل الفشل. تجدر الإشارة الى ان كفاءة اللحام (Weld Efficiency) تم حسابها للوصلات الملحومة من النسبة بين مقاومة الشد القصوى (Ultimate Tensile Strength) لأية ملحومة ومقاومة الشد القصوى للمعدن الأساس.

4-3 اختبار الصلادة المجهرية Microhardness Test



الشكل (5) مواقع اختبار الصلادة لعينة اللحام.

(معجون الماس خشن ومعجون الماس ناعم)، بعد عملية التنعيم والصفق تم اجراء عملية الفحص المجهرى وتم استعمال محلول اظهار (Kellers Etch) خاص بمعدن الالمنيوم وسبائكه والمبينة مكوناتها ونسبها الحجمية في الجدول (4). غمرت العينات كلا على حدة في المحلول لفترة (40 S) بعدها غمرت العينة في الماء المقطر وجففت باستعمال فرن التجفيف. ثم وضعت العينة تحت المجهر عند قوة التكبير المثبتة في الصور علما قد استخدم مجهر نوع (OPTIKA) إيطالي المنشأ.

5-3 الفحص المجهرى Microstructural Examination

تم اجراء الفحص المجهرى لمعرفة البنية المجهرية للمناطق المختلفة للصفائح الملحومة، ولمعرفة مدى نجاح عملية اللحام وكيفية الترابط الحاصل بين جزأى الملحومة. لغرض اجراء الفحص تم اتباع خطوات التحضير، وبداية تم تنعيم العينات على الرطب بوجود الماء وباستعمال أوراق من كربيد السليكون (SiC) متدرج (400 – 3000) على جهاز تنعيم. ثم صقلت العينات باستعمال معجون الماس وعلى مرحلتين (الجدول (4))

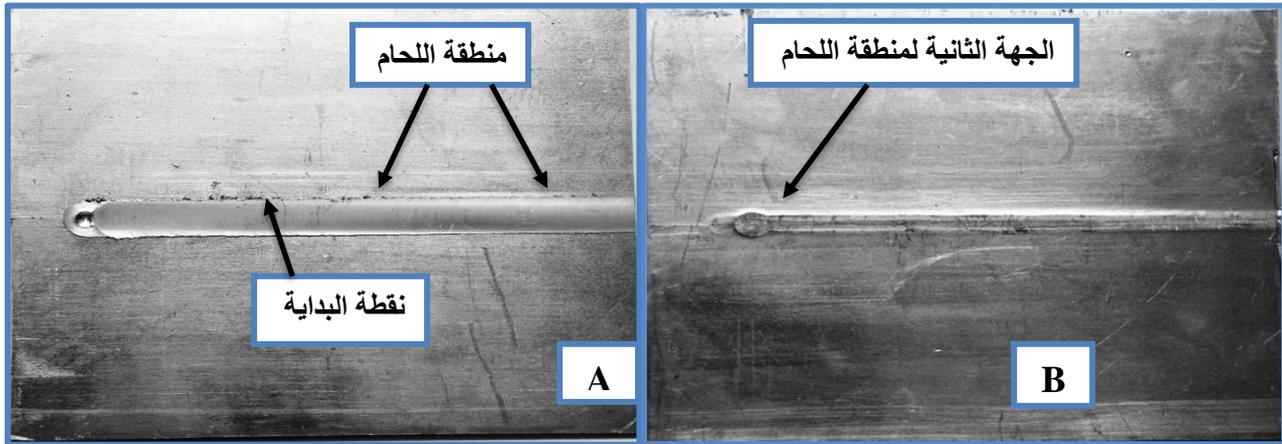
يبين محلول الإظهار (Kellers Etch) للألمنيوم Al 1050 H14.

Etchant	Concentration	Conditions	Comments
Methanol	25 ml	10 – 60	Pure aluminum
Hydrochloric acid	25 ml	Seconds	Aluminum magnesium, and aluminum-magnesium-silicon alloys
Nitric acid	25 ml		
Hydrofluoric acid	1 drop		

4- النتائج والمناقشة Results and Discussions

من خلال الفحص البصري تبين ان افضل ملحومة تم الحصول عليها عند السرعة الدورانية (1008 rpm) والسرعة الخطية (40 mm/min) وعند زاوية الميلان الثابتة (2°). وذلك من خلال خلو النماذج الملحومة عند هذه القيم من متغيرات اللحام من العيوب الظاهرية مثل (الفجوات الطولية، المعدن المزاح، التخشين المفرط، عيب النفق والاختاديد)، اذ نستنتج من ذلك ان أفضل انسياب للمعدن كانت عند هذه المتغيرات كما مبين في الشكل (6).

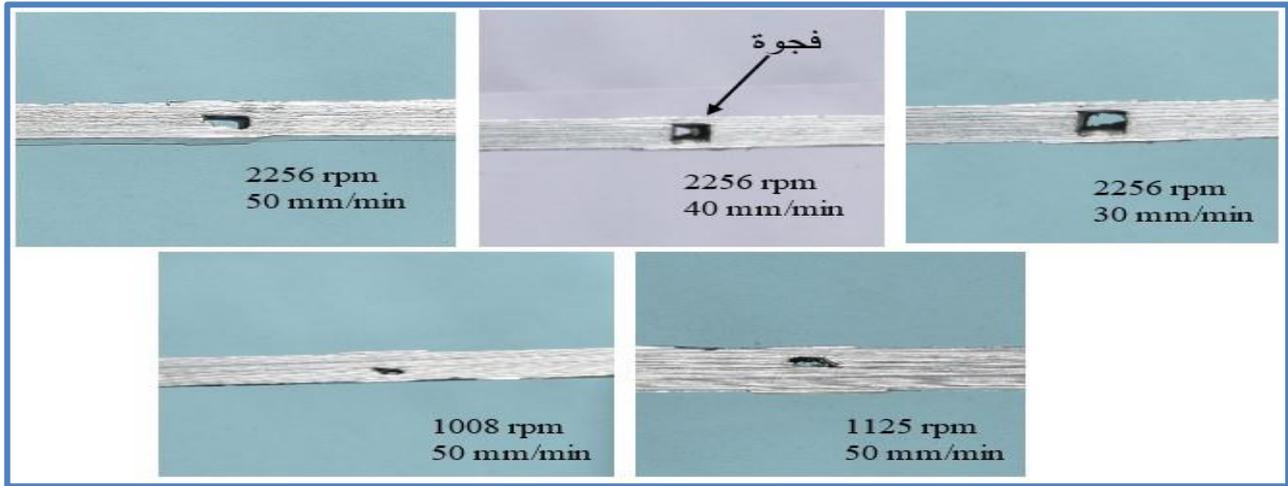
تم اجراء عملية لحام الخلط الاحتكاكي بنجاح لقطعتين من الالمنيوم Al 1050 H14 بعد تثبيت السرعة الدورانية بمقدار 1008 rpm والسرعة الخطية بمقدار 40 mm/min وبزاوية ميلان (2°) لحام من جهة واحدة وبواقع شوط واحد، شوطين وثلاثة أشواط بعد اجراء الفحوصات والاختبارات (فحص الصلادة، مقاومة الشد). للحصول على ملحومات خالية من العيوب ولتثبيت افضل سرعة دورانية وسرعة خطية، فقد تم اجراء عملية لحام الخلط الاحتكاكي (FSW) بالسرع الدورانية (500, 1008, 1125, 2256 rpm) والسرع الخطية (30, 40, 50 mm/min).



الشكل (6) لحام خالي من العيوب البصرية جهة واحدة شوط واحد. A- الجهة الامامية B- الجهة الخلفية

Longitudinal Cavities) على طول خط اللحام لكن بأحجام مختلفة كما مبين في الشكل (7).

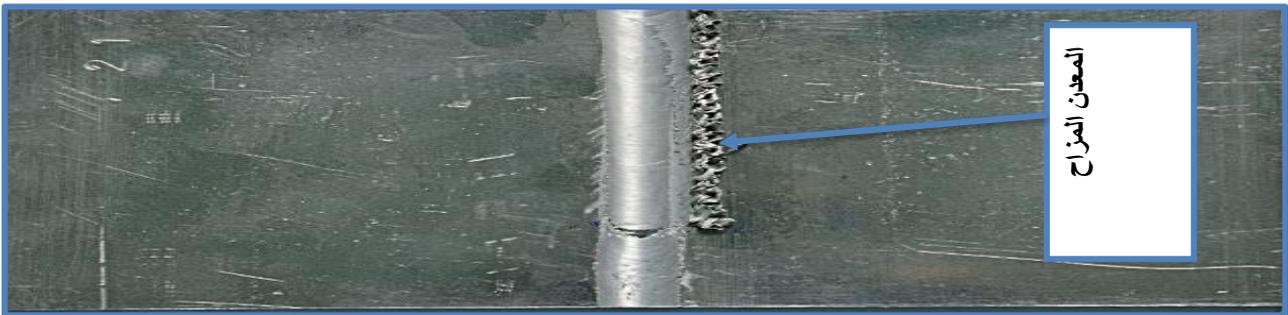
اما عند تغير السرعة الدورانية والسرعة الخطية الى القيم الأخرى المشار اليه أعلاه حيث ظهرت لدينا عيوب عديدة منها الفجوة الطولية



الشكل (7) نوع من أنواع عيوب لحام الخلط الاحتكاكي (فجوات طولية)

معدن قطعتي الملحومة مما أدى الى عدم انتظام في انسياب المعدن وعدم املاء منطقة التلامس بصورة جيدة كما مبين في الشكل (8).

كما حدثت عند السرعة الدورانية (2256 rpm) مع السرعة الخطية (30 mm/min) ظاهرة المعدن المزاح (Flash) وتكون الفجوات (Cavities) بسبب زيادة الحرارة المتولدة من احتكاك عدة اللحام مع



الشكل (8) يوضح ظاهرة المعدن المزاح.

زيادة في نسبة المعدن المملدن وعند عدم اختيار السرعة الدورانية مع السرعة الخطية التي تحقق الكمية الملائمة للحرارة الداخلة في منطقة اللحام مع السرعة الخطية والدورانية الملائمة لعدة اللحام والمعدن الملحوم تؤدي الى ظهور العيوب المختلفة.

اما اللحام عند السرعة الدورانية (1008 rpm) والسرعة الخطية (50 mm/min) أدى أيضا الى عدم انتظام انسياب المعدن، هذا يؤدي الى تكثف المعدن المنساب من الجانب المتقدم الى الجانب المتأخر حيث يؤدي الى تكوين الاخاديد وتخشين سطح اللحام كما في الشكل (9). بصورة عامة زيادة السرعة الدورانية يعني زيادة في الحرارة المتولدة وكذلك



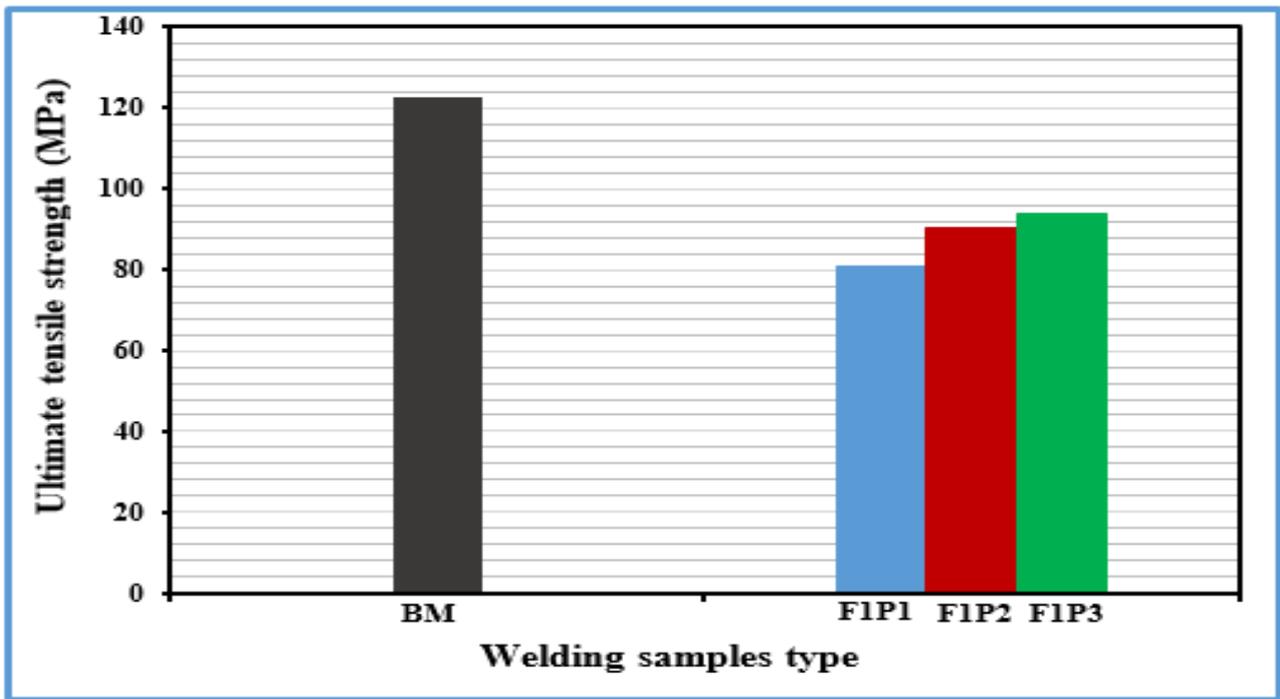
الشكل (9) يبين التكتلات للحام الخلط الاحتكاكي

فقدان تأثير التشكيل اللدن على البارد للألمنيوم نوع AI 1050 H14 قد خضعت لعملية التشكيل اللدن بمقدار (H14) والذي ساهم في رفع مقاومة الشد للمعدن الاساس بمقدار (50%) والذي تم الإشارة إليها في [17].

يتضح أيضا من الجدول (5) ارتفاع قيمة مقاومة الشد بشكل تدريجي عند اللحام من جهة واحدة وبواقع ثلاثة اشواط وصلت أفضل كفاءة لحام عند اللحام من جهة واحدة وثلاثة أشواط الى (76.215%)، حيث تم حساب كفاءة لحام الخلط الاحتكاكي عن طريق المعادلة المبينة ادناه [19].

$$\eta = \frac{\text{مقاومة الشد للملحومة}}{\text{مقاومة الشد للمعدن الاساس}} \times 100$$

بعد اجراء اختبار الشد للمعدن الاساس وللعينات الملحومة، تم الحصول على مقاومة الشد وكفاءة اللحام لمعلومات الألمنيوم (AI 1050 H14) كما موضح في الجدول (5) عند اللحام بسرعة الدورانية (1008 rpm) والسرعة الخطية (40 mm/min) وزاوية ميلان (2°) ومتغيرات اللحام من جهة واحدة وبواقع ثلاثة أشواط. الشكل (10) يوضح مقاومة الشد للمعدن الأساس (AI 1050) وللعينات الملحومة، يتضح من نتائج اختبار الشد الاستاتيكي، ان مقاومة الشد للمعدن الأساس AI 1050 H14 بلغت (122.88 MPa) اعلى من مقاومة الشد لأفضل ملحومة التي كانت عند اللحام من جهة واحدة وثلاثة أشواط وبلغت (93.653MPa) ويعود سبب انخفاض مقاومة الشد للملحومات الى



الشكل (10) تباين مقاومة الشد القصوى للملحومات مقارنة بالمعدن الأساس (AI 1050).

الجدول (5)

يبين مقاومة الشد وكفاءة اللحام للمعدن الأساس AI 1050 H14 ولبقية الملحومات.

الجهة والاشواط	القوة Force N	الطول الأصلي (L ₀) mm	مقدار التغير بالطول الأصلي (ΔL) mm	نسبة الاستطالة (%)
pure	9216	50	8.92	17.84
F1P1	6080	50	5.661	11.322
F1P2	6792	50	11.951	23.902
F1P3	7024	50	12.552	25.104

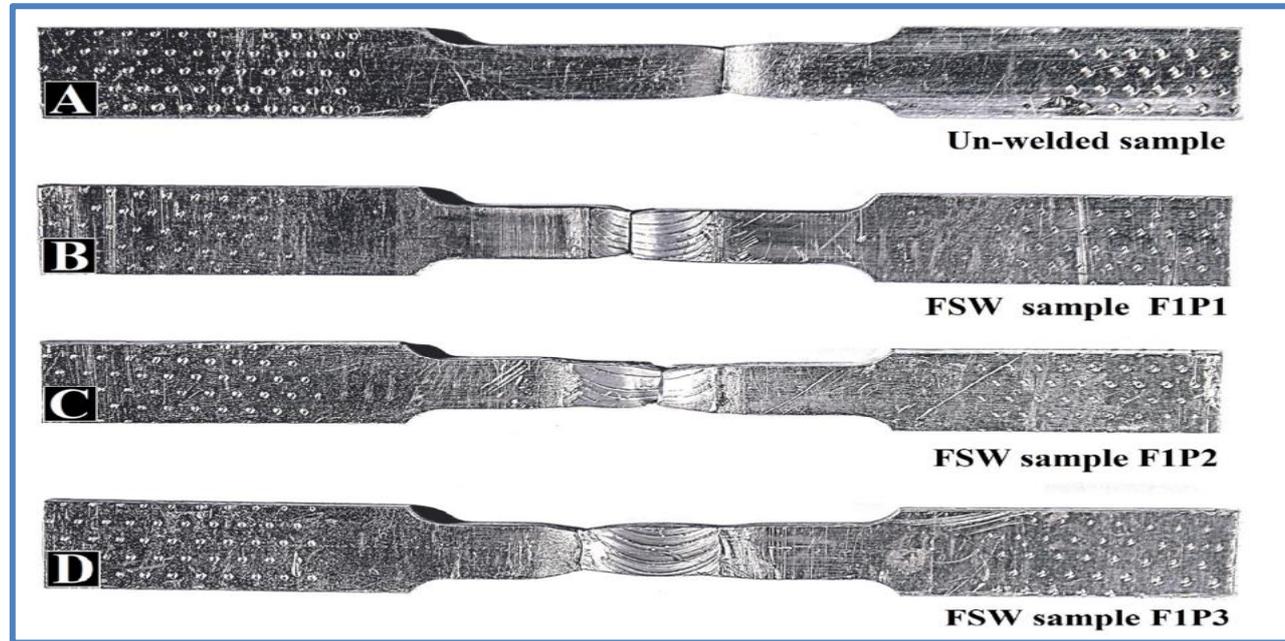
الالمنيوم معدن مطيلي ولين وله صلادة منخفضة، من خلال ملاحظة الجدول (6) تبين بان نسبة الاستطالة للمعدن الأساس Al 1050 هي 17.84%، حيث ان الكسر او الفشل حدث ضمن الطول القياسي المحدد للعينة كما مبين في الشكل (11-A) هذا يعود الى التنظيم في البنية البلورية. بعد اجراء عملية لحام الخلط الاحتكاكي من جهة واحدة وشوط واحد اصبحت نسبة الاستطالة اقل من المعدن الأساس وكانت نسبة 11.32% أي انه شبه مطيلي كما موضح في الشكل (11-B) ويعود ذلك الى ان عملية اللحام من جهة واحدة قد تكون غير كافية وخصوصا عند لحام قطع بسمك كبير نسبيا كما هو الحال في القطعة الملحومة في الدراسة الحالية البالغة سمكها 6 mm فتكونت فجوات او مسامات عند

منطقة اللحام أدت الى كسر العينة في منطقة اللحام وانخفاض مطيليتها. اما عند اجراء عملية اللحام من جهة واحدة وبواقع شوطين كانت نسبة الاستطالة 23.902%، من الشكل (11-C) نلاحظ ان الكسر حدث في منطقة اللحام أيضا لكن بنسبة استطالة اعلى. عند اجراء عملية اللحام من جهة واحدة وبواقع ثلاثة أشواط كانت نسب الاستطالة 25.104% نلاحظ ازدياد نسبة الاستطالة بسبب إعادة تبلور الحبيبات وتحول البنية الى بنية بحبيبات ناعمة، يوضح الشكل (11-D) ان الكسر قد حدث خارج منطقة اللحام وهذا يدل بأن منطقة اللحام أصبحت أكثر مقاومة من المعدن الأساس بسبب التنعيم الأفضل للبلورات وخلوها من العيوب.

الجدول (6)

يبين قيم الاستطالة النسبية للمعدن الأساس والملحومات بأنواعها.

الجهة والأشواط Face and Paths	القوة Force N	مساحة المقطع Area mm ²	الاجهاد σ MPa	قوة الكسر break Forces (N)	كفاءة اللحام Weld Eff. $\eta\%$
Pure	9216	75	122.88	2267.6	—
F1P1	6080	75	81.066	1546.8	65.971
F1P2	6792	75	90.56	1612.4	73.697
F1P3	7024	75	93.653	1775.6	76.215

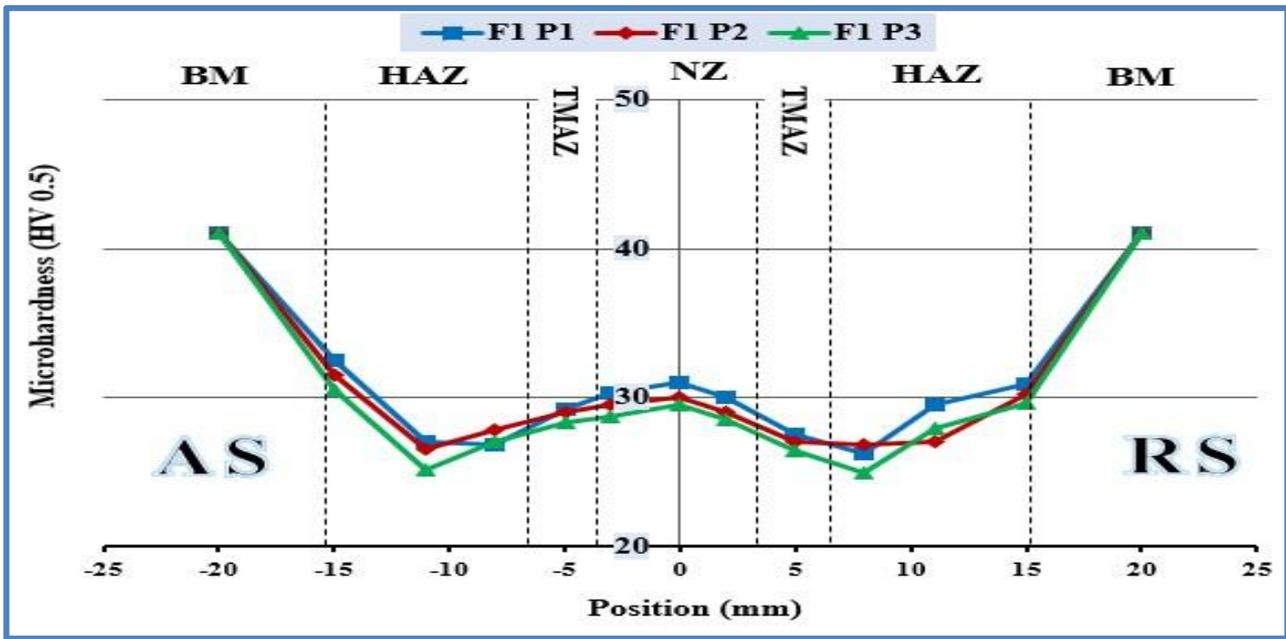


الشكل (11) يبين عينات الشد بعد الكسر للمعدن الأساس والملحومات.

A- المعدن الأساس Al 1050. B- اللحام من جهة واحدة وشوط واحد.
C- اللحام من جهة واحدة وشوطين. D- اللحام من جهة واحدة وثلاثة أشواط.

(NZ). هذا بسبب حدوث تنعيم للحبيبات في منطقة اللحام ومنطقة (TAMZ) هي منطقة بين (HAZ) و (NZ). وحدثت ظاهرة ارتفاع الصلادة في منطقة اللحام عما سواه في المناطق (TAMZ)، (HAZ) هو حدوث إعادة التبلور الديناميكية والتي تنشأ عنها بلورات ناعمة جدا ومتساوية المحاور. لذلك نرى أيضا في منطقة (HAZ) قلت قيم الصلادة فيها عن منطقة المعدن الأساس بتأثير الحرارة التي قللت تأثير التشكيل اللدن عن القيم الأساسية للمعدن الأساس، اما منطقة (TAMZ) قلت قيم الصلادة فيها عن المعدن الأساس والمنطقة المتأثرة بالحرارة (HAZ) بفعل التأثير المزدوج للحرارة والحركة والضغط، ولكن قيم الصلادة فيها اقل من قيمة الصلادة عند (NZ).

يوضح الشكل (12)، صلادة فيكرز (0.5 HV) للمعدن الأساس (BM) وAl 1050 H14 ولمختلف مناطق اللحام (HAZ, TAMZ, NZ) وللجانبيين المتقدم (AS) والمتأخر (RS). من خلال ملاحظة الشكل نلاحظ ان قيم الصلادة اقل من قيمة صلادة المعدن الأساس وهذا يعود الى تغير في البنية المجهرية الناتجة من عملية اللحام إذ تعرض المعدن اثناء عملية اللحام الى الحرارة والضغط والخلط معاً الذي ادى الى فقدان تأثير التشكيل اللدن على البارد المسبق للألمنيوم Al 1050 H14 اذ ان عملية اللحام تؤدي الى تقليل قيمة الصلادة اقل من المعدن الأساس وهذا يتفق مع [20,21]. ونلاحظ من الشكل (9.5) ان الصلادة تقل بشكل تدريجي في منطقة (HAZ) وتبدأ بالزيادة وصولاً الى مركز اللحام



الشكل (12) سلوك الصلادة عند مناطق اللحام (Al 1050) لجهة واحدة (شوط واحد، شوطين وثلاثة أشواط).

يمكن احتسابها من خلال المعادلة الخاصة بحساب درجة حرارة إعادة التبلور وكما مبين في المعادلة ادناه.

$$RT = 0.4 * MT(K)$$

$$RT = 0.4 * (660 + 273.15) = 369.26$$

$$RT = 369.26 - 273.15 = 100.11^{\circ}C$$

عند المنطقة الثانية القريبة من مركز الملحومة التي تعرف بالمنطقة المتأثرة بالحرارة والحركة (TMAZ) اصبحت الحجوم الحبيبية بشكل عام انعم من المنطقة المتأثرة بالحرارة (HAZ) بفعل التأثير المزدوج للحرارة والحركة، علاوة على زيادة الخشونة السطحية بفعل احتكاك كتف عدة اللحام مع السطح والتي ادت الى ظهور بقع بلون داكن نسبياً في البنية والتي تعبر عن وجود انخفاضات في تلك المنطقة من البنية.

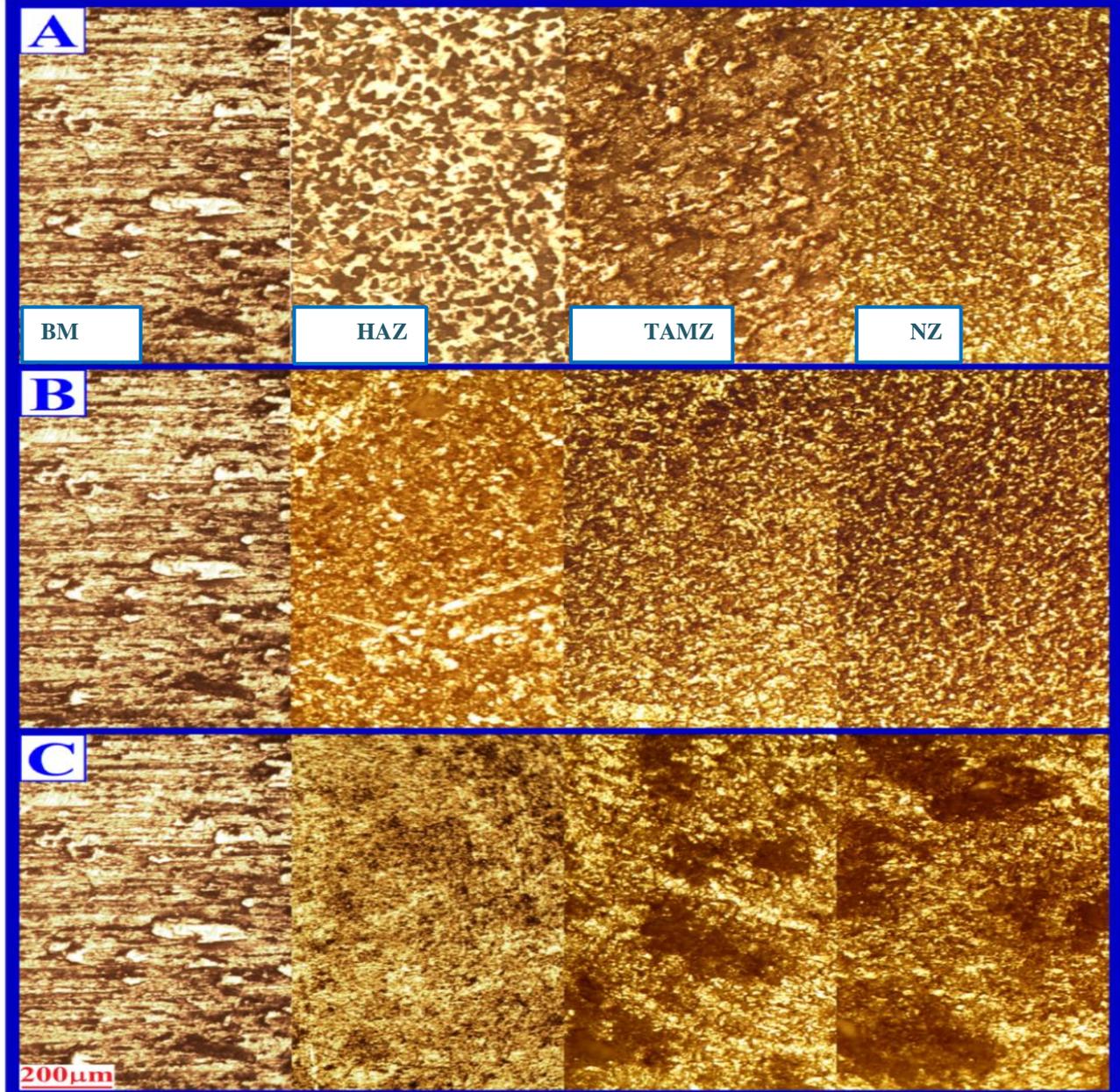
ان تأثير عدد الاشواط وعملية لحام الخلط الاحتكاكي من جهة واحدة على البنية المجهرية مبين في الشكل (13) اذ يوضح الشكل مظهر البنية المجهرية لملاحومات الألمنيوم Al 1050 H14 التي تم اجراء عملية لحام الخلط الاحتكاكي لها من جهة واحدة وبواقع شوط واحد وشوطين وثلاثة اشواط المبينة في كل من (A,B,C) من الشكل (13). إذ يظهر جلياً عند النظر الى الجزء (A) من الشكل تأثير عملية لحام الخلط الاحتكاكي من جهة واحدة وبشوط واحد على البنية المجهرية.

اذ يتضح تغير البنية المجهرية بالحبيبات الطولية للمعدن الأساس المبينة في أقصى اليسار من الشكل الى بنية بحبيبات شبيهة متساوية المحاور وذلك تحديداً عند منطقة (HAZ) والناتج من تأثير كمية الحرارة التي تولدت في الملحومة بفعل الاحتكاك بين عدة اللحام وقطعتي الملحومة. اذ يبين الشكل بان درجة الحرارة المتولدة كانت أكبر من درجة إعادة التبلور للألمنيوم النقي والتي تبلغ تقريبا 100 درجة مئوية والتي

واضح من الشكل (13-B). اما عند اللحام من جهة واحدة وثلاثة أشواط فكان التتعيم الحاصل في البنية المجهرية لمنطقة (HAZ) انعم بقليل نسبيا عن مثيلتها في العينة المبينة للملحومة التي تم لحامها من جهة واحدة وبشوطين، وظهر المناطق الداكنة في (HAZ و TAMZ) بشكل أوضح من اللحام بشوط واحد وشوطين والسبب يعود الى تعاضم تأثير الحرارة والحركة في هاتين المنطقتين ويلاحظ أيضا بداية ظهور هذه البقع في منطقة (HAZ).

عند الانتقال الى المنطقة الرابعة وهي المنطقة المركزية (NZ) منطقة الخلط التي تعرضت الى التأثير الاكبر والمباشر للتحريك والاحتكاك بين غارز عدة اللحام وقطعتي الملحومة، حيث تكونت البنية من بلورات انعم في هذه المنطقة.

عند اجراء عملية اللحام من جهة واحدة وبواقع شوطين كانت التغيرات الحاصلة في البنية المجهرية قريبة لسابقتها الا ان التتعيم الحاصل في منطقتي (HAZ) و (TAMZ) كانت أكبر نسبيا وهذا



الشكل (13) البنية المجهرية لمناطق اللحام.
(A) منطقة لحام من جهة واحدة شوط واحد.
(B) منطقة لحام من جهة واحدة وشوطين.
(C) منطقة لحام من جهة واحدة وثلاثة أشواط.

استطالة عند اجراء عملية اللحام من جهة واحدة وثلاثة أشواط
25.104%
4- ارتفاع قيمة الصلادة في منطقة اللحام (NZ) عما سواه في المنطقتين
(HAZ, TMAZ) بسبب حدوث إعادة التبلور الديناميكية (Dynamic
recrystallization) والتي تنشأ عنها بلورات ناعمة جدا ومتساوية
المحاور، ولكن قيمة الصلادة في منطقة اللحام تبقى اقل من قيمة الصلادة
للمعدن الأساس.
5- زيادة عدد الأشواط عند اللحام من جهة واحدة تزيد من كفاءة اللحام
للعينة الملحومة حيث كانت الكفاءة من جهة واحدة وثلاثة أشواط
(76.215%).

5- الاستنتاجات Conclusions

من خلال هذا البحث تم استنتاج ما يلي:
1- إمكانية لحام الألمنيوم النقي بنسبة 99.5% والذي يحتوي على نسبة
0.5% من الشوائب بنجاح والحصول على خواص ميكانيكية
وميتالورجية مقبولة.
2- تم الحصول على أفضل مقاومة شد عند اجراء عملية اللحام من جهة
واحدة وبواقع ثلاثة أشواط والتي يبلغ مقدارها (93.653 MPa).
وتعادل 76.21% من مقاومة الشد للمعدن الأساس.
3- الحصول على نسبة استطالة عالية كلما زاد عدد الأشواط بسبب إعادة
تبلور الحبيبات وتحول البنية الى بنية بحبيبات ناعمة، وكانت اعلى نسبة

6- المصادر Reference

1. Oliphant, A. H. (2004). *Numerical modeling of friction stir welding: a comparison of alogra and forge3*. Brigham Young University.
2. Mulapeer MM. (2009). Metallurgical and Mechanical properties for Friction Stir Welding Aluminum Alloy [AA2011, AA7020, AA7075]. University of Salahalddin –Erbil.
3. Mahoney, M. W., & Mishra, R. S. (2007). *Friction stir welding and processing*. ASM International.
4. علي مزهر & نوال عزت عبد اللطيف. (2010). Friction Stir Welding Of Porous Al-Si Alloy. *Engineering and Technology Journal*, 28(6).
5. Cavaliere, P., Squillace, A., & Panella, F. (2008). Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding. *Journal of materials processing technology*, 200(1-3), 364-372.
6. Sakthivel, T., Sengar, G. S., & Mukhopadhyay, J. (2009). Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded aluminum. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(5), 468-473.
7. Blondeau, R. (2008). *Metallurgy and Mechanical of Welding*, 111 River Street Hoboken, NJ 07030 USA.
8. ف. بيبي، "مبادئ هندسة المعادن والمواد"، ترجمة د. حسين باقر رحمة الله، مطبعة جامعة الموصل، 1985.
9. د. ج. ديفيز ، ل. ا. اوليمان، "المعادن- بنيتها وخواصها ومعاملاتها الحرارية"، ترجمة د. جعفر طاهر الحيدري والسيد عنان نعمة، الجامعة التكنولوجية، 1989، الطبعة الأولى.
10. Akula, D. R. (2007). *Characterization of mechanical properties and study of microstructures of friction stir welded joints fabricated from similar and dissimilar alloys of aluminum* (Doctoral dissertation, University of Missouri--Columbia).
11. Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminum alloy. *Materials & Design*, 29(2), 362-373.
12. Abtan NS, Jassim AH, Al-Janabi MSM .Tensile Strength, Micro-hardness and Microstructure of Friction-Stir-Welding AA6061-T4 Joints. *Tikrit Journal of Engineering Sciences* 2018; 25 (4): 51-56.
13. Albash AM, Shihab GR . Effect of Steel shot peening Time on some Mechanical Properties of Friction stir Welds for Aluminum Alloy (2024-T3). *Tikrit Journal of Engineering Sciences* 2021.
14. Saad, A. K., & Shibayanagi, T. (2007). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded similar and dissimilar joints of Al and Mg alloys. *Transactions of JWRI*, 36(1), 21-34.
15. Shivaraj, M. K., Dinakaran, V., & Mahadevan, V. (2010, April). Notice of Retraction: Frictional stir welding on aluminum alloys AA2024-T4 and AA7075-T6. In *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology* (Vol. 5, pp. V5-1).
16. Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials science and engineering: R: Reports*, 50(1-2), 1-78.

17. Gitter, R. (2008). Design of aluminum structures: selection of structural alloys. *EUROCODES-Background and Applications*.
18. Standard, A. S. T. M. (2013). E8/E8M-11. *Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM book of standards*.
19. Hussein HA, "Study the Effect of Some Friction Stir welding variants on The Mechanical Properties of Aluminum -Copper alloy 2024 -T3," Mechanical Engineering of Tikrit University, 2020.
20. Liu, H. J., Fujii, H., Maeda, M., & Nogi, K. (2003). Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050–H24 aluminum alloy. *Science and technology of welding and joining*, 8(6), 450-454.
21. Liu, L., Nakayama, H., Fukumoto, S., Yamamoto, A., & Tsubakino, H. (2004). Microstructural evolution in friction stir welded 1050 aluminum and 6061 aluminum alloy. *Materials transactions*, 45(8), 2665-2668.