

دراسة تأثير هندسة الأداة على سلوك تدفق المادة في عملية لحام الدمج الاحتكاكي لسبيكة التيتانيوم Ti6Al4 باستخدام البرنامج الهندسي CATIA V5

د. علي محمد هترة*

(تاريخ الإيداع 10 / 5 / 2021. قُبِلَ للنشر في 6 / 9 / 2021)

□ ملخص □

من أجل تحسين سلوك تدفق المادة أثناء لحام الدمج الاحتكاكي وتجنب ثبات التدفق أثناء اللحام تم اقتراح استخدام أداة مخددة بشكل كامل وأداة نصف مخددة وقد تم في هذا البحث دراسة تأثير هندسة تخديد مسمار الأداة على سرعة تدفق المادة وذلك باستخدام برنامج CATIA V5. وقد أظهرت نتائج النمذجة الرقمية بأن السرعة الكبرى للتدفق المعدني تظهر عند العمود الدوار وسرعة التدفق هذه تتناقص بشكل سريع مع زيادة المسافة أو البعد عن محور دوران الأداة. وقد ظهرت سرعة التدفق المعدني العظمى عند استخدام مسمار الأداة المخددة بشكل كامل عند بداية موقع التخديد وهذه السرعة تتناقص مع زيادة طول التخديد. ومن وجهة نظر زيادة سرعة تدفق المادة بالقرب من قاع قطعة العمل أو في منتصف قطعة العمل فقد تبين أن الأداة نصف المخددة والأداة المخددة بشكل كامل كلاهما أفضل من الأداة التقليدية المستخدمة في لحام الدمج الاحتكاكي.

الكلمات المفتاحية: طريقة العناصر المنتهية - اللحام الاحتكاكي - النمذجة و المحاكاة

*أستاذ مساعد - قسم هندسة التصميم و الإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
AliHitrah@gmail.com

Study the Effect of Tool Geometry on Material Flow Behavior in Ti6AL4 Titanium Alloy Friction Welding Process Using CATIA V5

Dr. Ali Mohamad Hatra *

(Received 10 / 5 / 2021. Accepted 6 / 9 / 2021)

□ ABSTRACT □

In order to improve material flow behavior during friction stir welding and avoid root flows of weld, a tool with a half-screw pin and a tool with a tapered-flute pin are suggested. The effect of flute geometry in tool pins on material flow velocity is investigated by the software CATIA V5. Numerical simulation results show that high material flow velocity appears near the rotational tool and material flow velocity rapidly decreases with the increase of distance away from the axis of the tool. Maximum material flow velocity by the tool with the tapered-flute pin appears at the beginning position of flute and the velocity decreases with the increase of flow length in flute. From the view of increasing the flow velocity of material near the bottom of the workpiece or in the middle of workpiece, the tool with the half-screw pin and the tool with the tapered-flute pin are both better than the conventional tool.

Keywords:(FSW) Friction Stir Welding, Finite Element Method, Modeling and Simulation.

* Associate Professor – Design and Production Engineering Department - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University – Lattakia-Syria. AliHitrah@gmail.com

مقدمة:

يعرف اللحام ببساطة على أنه ربط المواد بتسخينها حتى الانصهار ومن ثم دمجها معاً . ولكن هذا التعريف يجب تغييره بتقدم تقنيات اللحام وبشكل عام هناك نوعين أساسيين من اللحام هما اللحام الانصهاري واللحام اللانصهاري. إن طرق اللحام الحديثة لا تعتمد كلها على الانصهار لربط القطعتين، وهنا يظهر اللحام الاحتكاكي، الذي يعتمد على الضغط والحرارة لتحقيق الربط بين القطعتين.

يعرف على أنه عملية تقنية لوصل المعادن في الحالة اللدنة (الصلبة)، وهذا لا يعني الوصول إلى درجة حرارة الانصهار، كما يحدث في عمليات اللحام التقليدية وهذه هي إحدى أهم ميزات اللحام الاحتكاكي حيث أن أعلى درجة قد يصل إليها المعدن هي 0.8 من درجة حرارة الانصهار

يعتبر لحام الدمج الاحتكاكي، أحد أهم الانجازات المتحققة للحام الألمنيوم في العقد الأخير من القرن العشرين . اخترع هذا النوع من اللحام مجموعة من الباحثين في شركة TWI في جامعة كامبردج عام 1991. هذا النوع من اللحام يتم دون صهر المعدن أو استخدام مواد مائنة (حشوة)، وهو غالباً ما يستخدم في التطبيقات الحرجة مثل وصل القطع الهيكلية المصنوعة من الألمنيوم وسبائكها، وفي التطبيقات التي يجب أن تبقى فيها الخصائص المعدنية الأصلية دون أي تغيير وذلك قدر الإمكان، بما في ذلك الطيران والسيارات والسكك الحديدية والصناعات البحرية [1-3]. بالمقارنة مع اللحام بالانصهار التقليدي، تتمتع FSW بالعديد من المزايا على سبيل المثال ، الإجهاد المتبقي المنخفض، مدخلات الطاقة المنخفضة، عدم التلوث، الجودة العالية، [4]. سبائك التيتانيوم من أهم المعادن المستخدمة في مجال صناعة الطائرات والمركبات الفضائية وفي العديد من الصناعات الدقيقة والمتطورة والأسلحة . تم اكتشاف التيتانيوم عام 1791 م وتمت تسميته عام 1795م وتم تحضير التيتانيوم سنة 1887م ، ولم يحصل عليه على صورة معدن نقي 99.9% لغاية سنة 1910 م ووجوده كان مقتصر في المختبرات لغاية سنة 1946 وبعدها أصبح بالإمكان استخلاص التيتانيوم تجارياً عن طريق استخدام المغنيزيوم لاخترال رباعي كلوريد التيتانيوم . أشهر سبائك التيتانيوم

Ti-6Al-4V هي الأكثر استخداماً حيث تتمتع بصلابة عالية وتستخدم بشكل واسع في صناعات الفضاء والطب، في مجال الاستعاضة الصناعية كما تستخدم أيضاً في مجال صناعة السيارات والصناعات الكيماوية والبحرية، التحكم والتحسين في مورفولوجيا طور الفا هو أحد الأشياء التي تؤخذ في الاعتبار عند استخدام السبيكة، والمعالجة الحرارية طريقة مفيدة لتحسين التركيب المجهرى والتحكم في حجم وهيئة الصفائح في طور الفا، والتشكيل الحراري للسبيكة في طور بيتا تتسبب بشكل كبير في حبيبات كبيرة في طور بيتا، سبيكة التيتانيوم التجارية - 4Zr - 2Sn - 6Al - Ti هي إحدى أكثر السبائك استخداماً في حالات الحرارة العالية حيث تتمتع بتركيبية من اجهاد الشد العالي والصلابة والقوة والثبات في درجات الحرارة العالية، حيث تصل أحياناً إلى 4250 درجة مئوية لفترات طويلة، السبيكة Ti - 8Al - 2Mo - 4Zr - 6Sn - 2Fe هامة جداً في صناعة محركات الصواريخ والمكوك الفضائي لما لها من خواص مناسبة لمثل هذا النوع من الصناعات حيث تتمتع بصلابة عالية ومقاومة للحرارة والضغط، السبيكة Ti - 8Al - 1Mo - 4V تستخدم في صناعة التوربينات الغازية وخاصة في صناعة شفرات الكمبريسورات والطارات، السبيكة Ti - 10V - 3Al تستخدم أيضاً في صناعات الفضاء

الدراسات المرجعية

يعد سلوك تدفق المواد أحد أهم العوامل الرئيسية التي تؤثر على جودة اللحام FSW، الأمر الذي أدى بالعديد من الباحثين للتحقيق في تدفق المواد عن طريق الأساليب التجريبية، أو طرق المحاكاة العددية.

درس الباحث [1]M.K.Bilici في عام 2012 تأثير هندسة الأداة على لحام الدمج الاحتكاكي لصفائح البروبيلين ، ومن أجل إنجاز الدراسة تم استخدام أربع أدوات لحام مختلفة، من حيث هندسة المسمار (اسطواني مستقيم ، اسطواني مستدق ، اسطواني ملولب ، مربع) ، وقد تمت عملية اللحام عند قيم مختلفة لكل من (طول المسار ، زاوية المسمار ، قطر الكتف ، زاوية الكتف) وذلك عند درجة حرارة الغرفة . وتم إجراء اختبارات شد القص المتراكب (lap shear tensile) على العينات الملحومة من أجل تحديد مقاومة اللحام (weld strength)

درس Biswajit Parida وباحثون آخرون [7] في عام 2014، تأثير هندسة الأداة على الخصائص الميكانيكية، والتركيب المجهرية لسبائك الألمنيوم الملحومة بلحام الدمج الاحتكاكي . ومن أجل هذه الدراسة تم استخدام أداة اسطوانية مستقيمة SC (straight cylindrical)، وأداة اسطوانية مستدقة الطرف TC (tapered cylindrical) . وقد تم إجراء اختبار الشد على العينات الملحومة بكلتا الأداةين السابقتين وعند مقارنة النتائج مع اختبار الشد لمعدن الأساس تبين أن خاصية الشد في اللحام تحسنت إلى حد بعيد ، وقد أظهرت الوصلات الملحومة، باستخدام الأداة (SC)، خصائص شد أفضل من الوصلات الملحومة باستخدام الأداة (TC) ، وذلك بسبب الخط المنتظم للمواد في حال استخدام الأداة (SC) في عملية اللحام، وكذلك فإن قابلية الطرق ازدادت بشكل كبير عند استخدام الأداة (SC)

هدف R.K.Kesharwani وباحثون آخرون [9] في عام 2014 إلى اختيار الظروف المثلى لعملية لحام الدمج الاحتكاكي لسببكتين رقيقتين مختلفتين من الألمنيوم (AA5052-H32) و (AA5754-H22) بسماكة 2mm وذلك باستخدام نظرية Taguchi grey . وقد تمت عمليات اللحام عند قيم مختلفة لكل من (سرعة دوران الأداة ، سرعة انتقال قطعة العمل ، قطر كتف الأداة) وكذلك باستخدام أدوات مختلفة من حيث هندسة مسمار الأداة ، وقد تم إجراء اختبار الشد على العينات الملحومة وذلك من أجل تحديد متانة الوصلة اللحامية والاستطالة المثوية.

هدف البحث المقدم من قبل Umasankar Das وباحثون آخرون [10] في عام 2015 إلى دراسة تأثير بارامترات عملية اللحام على الخصائص الميكانيكية لوصلات سبائك الألمنيوم المتشابهة (AA6101T6 to AA6101T6) ، وسبائك الألمنيوم المختلفة (AA6101T6 to AA6351T6) الملحومة بلحام الدمج الاحتكاكي ، وقد ركزت الدراسة على تحديد بارامترات العملية المطلوبة لإنتاج لحام دمج احتكاكي فعال في كل من الحالتين السابقتين ومن أجل ذلك فقد تم استخدام ثلاث أدوات لحام بأقطار مختلفة كالتالي (20,25,30) mm مع ثلاث سرعات دورانية مختلفة لأداة اللحام كالتالي (600,800,1200) rpm ، و قد تم إجراء اختبارات الشد والتركيب المجهرية للوصلات الملحومة

Sediel وآخرون [11] درسوا سلوك تدفق المواد تجريبياً في FSW باستخدام تقنية المادة العالمة وقدموا توصيفاً دقيقاً لهذا السلوك في منطقة اللحام

Jie وآخرون [12] في دراستهم أظهروا باستخدام برنامج FLUENT أن الأداة ذات الكتف ذو السن الحلزوني أفضل من الأداة التي تحتوي على كتف متحدة المركز

قام Umanath K وآخرون [13] في عام 2015 بدراسة تأثير بارامترات عملية اللحام الاحتكاكي على خواص الشد لسبيكة ASS304L . حيث قاموا بدراسة طريقة جديدة في اللحام الاحتكاكي حيث أدت هذه الطريقة إلى تحسين الخواص الميكانيكية وتقليل التشوه للسبيكة . وقد تبين أن سرعة الدوران تملك أكبر تأثير على مقاومة الشد في الوصلات يليها ضغط الاحتكاك وضغط التشكيل . وقد تبين أيضاً أن ضغط الاحتكاك أكثر تأثيراً مقارنة بالبارامترات الأخرى مثل سرعة الدوران وسرعة التشكيل

Pourahmad و اخرون [14] في دراستهم أظهرت صور الأشعة السينية أن تدفق المواد في الطلقة الفولاذية المزروعة في الجانب المتقدم أكبر من تلك الموجودة في الجانب المتراجع في عملية اللحام الاحتكاكي تعتبر عيوب الجذر هي العيوب الأكثر شيوعاً التي قد تظهر بالقرب من أسفل اللحام وهي سيئة لجودة اللحام

Grujicic و اخرون [15] درسوا باستخدام طريقة Eulerian / Lagrangian تأثيرات درجة اللحام وزاوية إمالة الأداة وحجم رأس الأداة على تدفق المواد أثناء عملية FSW.

مشكلة البحث: عدم وجود توصيف كافي من خلال الدراسات المرجعية لعلاقة هندسة أداة اللحام بسرعة تدفق المادة في اللحام الاحتكاكي

أهمية البحث وأهدافه:

هدف البحث: إيجاد توصيف دقيق للعلاقة بين سرعة تدفق المادة في اللحام الاحتكاكي وهندسة أداة اللحام من خلال النمذجة والمحاكاة باستخدام برنامج CATIA V5 لتلافي عيوب اللحام

أهمية البحث: اختيار هندسة أداة اللحام الأفضل التي تعطي تدفق مادة أفضل وبالتالي خواص ميكانيكية جيدة تؤدي الى تلافي عيوب اللحام

1. محاكاة عملية اللحام

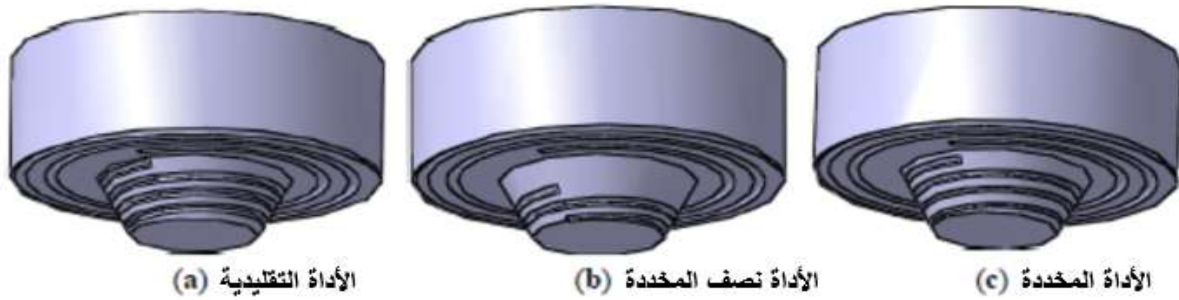
تم رسم و تصميم ونمذجة الاداة الدورانية ،المستخدمة خلال عملية لحام الدمج الاحتكاكي، حيث تكون مادة اللحام في الحالة اللدنة، يجب أن تنشط المادة ومن ثم تختلط بشكل كافي من أجل الحصول على لحام دمج احتكاكي سليم ، وبالتالي فمن الضروري أن تمر المادة بتدفق شديد.

يوجد العديد من العيوب في لحام الدمج الاحتكاكي المتعلقة بتدفق المادة مثل التجويف وعيوب الجذر وهكذا . تتكون أداة الدوران من الكتف والمسمار الدوار . خلال عملية لحام الدمج الاحتكاكي يكون رأس المسمار الدوار داخل مادة اللحام، لكي نتجنب الاحتكاك بين الأداة و صفيحة الدعم، وبالتالي نتجنب الأضرار في الأداة أو في صفيحة الدعم ، ويشكل عام تكون المسافة بين رأس المسمار وأسفل قطعة اللحام بحدود (0.1-0.2)mm.

على أية حال المسافة العملية بين رأس المسمار وأسفل قطعة العمل تكون أكبر أو أصغر من (0.1-0.2)mm، وهذا يؤدي إلى التغيير في سماكات قطعة العمل أو التغيير في عمق تغلغل الأداة . قد تؤدي المسافة الأطول إلى ظهور عيوب الجذر بسبب الضعف في تدفق المادة الكافي . من هنا يجب الاهتمام بكيفية تحسين سلوك تدفق المادة.

ان هندسة تحديد الأداة هي أكثر العوامل أهمية في التصميم .وفي هذه البحث سنقترح ثلاث تصاميم للأداة الدورانية كما هو موضح في الشكل 1. حيث يوجد تصميمان للأداة الدوارة تم انجازهما من أجل تحسين سرعة تدفق المادة بين رأس الأداة وأسفل قطعة اللحام وهذا موضح في الشكل 1b و 1c.

في كل من الأدوات الدورانية الثلاثة المبينة في الشكل 1 تكون أبعاد الكتف وأقطار قاع المسمار وأقطار

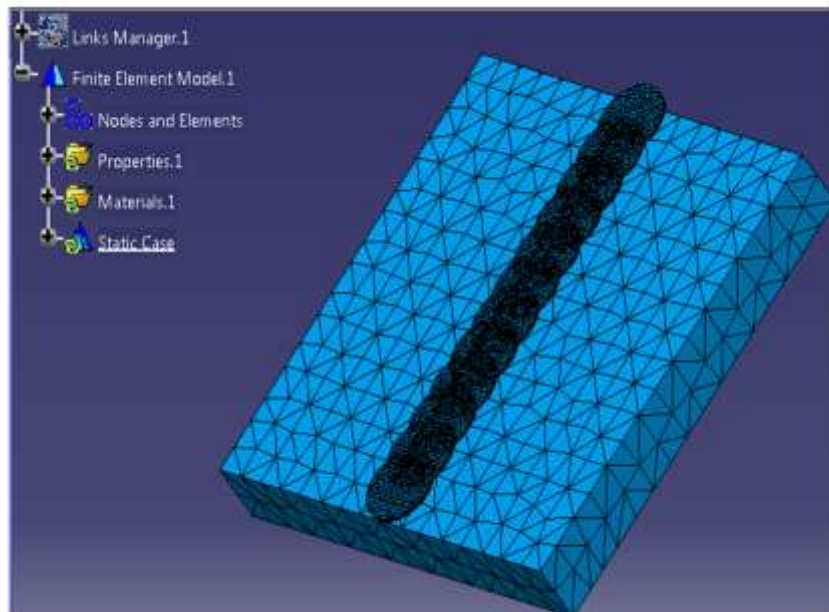


الشكل (1) التصاميم المقترحة للأداة المستخدمة في النمذجة الرقمية

رأس المسمار وأطوال المسمار متساوية في كل من الأدوات الثلاثة. بينما الأداة في الشكل 1a تسمى بالأداة التقليدية حيث يكون عرض التخذيد ثابت (غير متغير) أما الأداة في الشكل 1b تسمى بالأداة نصف المخددة ويكون موقع بداية التخذيد في منتصف طول المسمار أما الأداة في الشكل 1c تسمى الأداة المخددة بشكل كامل ويكون فيها عرض التخذيد متغير. في الشكل 1a يكون قطر الكتف 17mm وعرض التخذيد في الكتف بمقدار 0.5mm وطول مسمار الدوران 2.8mm وقطر المسمار يتناقص من 9mm في قاع المسمار إلى 6mm عند رأس المسمار وعرض التخذيد يكون 0.4mm. في الشكل 1b يكون عرض التخذيد 0.4mm ، وفي الشكل 1c يكون العرض الأعظمي للتخذيد في المسمار 0.4mm بينما العرض الأصغري 0.2mm.

شبكة العناصر المنتهية المولدة

يظهر الشكل 2 شبكة العناصر المنتهية المولدة لقطعة العمل المستخدمة في النمذجة وحيث أن الأداة المقابلة هي الأداة في الشكل 1c. وكما هو معروف بأن المادة قرب أداة الدوران تتدفق بشدة أثناء عملية لحام الدمج الاحتكاكي لذا نكون قادرين على استعمال أبعاد الشبكة بالقرب من أداة الدوران لكي نشرح سلوك تدفق المادة بالتفصيل.



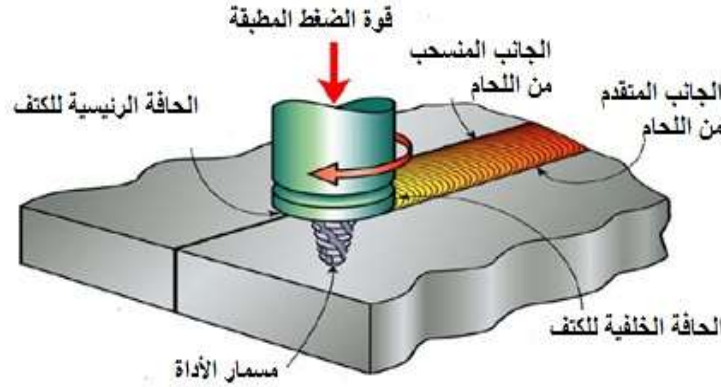
الشكل(2) شبكة العناصر المنتهية المولدة في قطعة العمل

بارامترات المادة والتركيب الكيميائي للسبيكة

تم استخدام سبيكة التيتانيوم Ti6AL4v في هذه الدراسة ، حيث أن الحرارة النوعية 979J/Kg.K والموصلية الحرارية 15.91W/m.K وكثافة هذه السبيكة 4.45g/cm^3 وتم ادخال هذه البارامترات الي بيئة البرنامج باستخدام تعليمة Apply Material ويفترض بأن المادة ستصبح سائل منصهر ولزوجة السبيكة ثابتة وقيمتها 5.3mpa.s ودرجة حرارة الانصهار 1678C°

الشروط الحدية أثناء عملية النمذجة

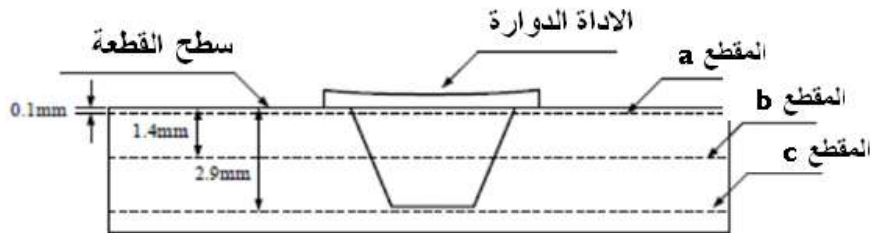
يتم اعتبار المادة للذنة أثناء عملية النمذجة الرقمية كمنفذ يتدفق إلى المنطقة المحسوبة، من خلال فتحة الدخول، ويتدفق للخارج عن طريق فتحة الخروج، ويتم اعتبار كل من سطح قطعة العمل ، قاع قطعة العمل ، الجانب المتقدم ، الجانب المنسحب ، جانب الدخول وجانب الخروج كما في الشكل 3 كالجدران المؤثرة، إن سرعة الجدار المتحرك مساوية لسرعة اللحام المساوية ل $75(\text{mm/min})$ واتجاه الحركة مشابه لاتجاه اللحام . العناصر المستخدمة مثل الأداة الدورانية، يتم اعتبارها كالجدار الدوار بينما السرعة الدورانية مساوية ل 250RPM ، وكل من اتجاهات الدوران مشابه لاتجاهات دوران الأداة ، علاوة على ذلك، فإن شرط الحد المانع للانزلاق، يستخدم لوصف العلاقة بين المادة المتصلة بالأداة والأداة الدورانية



الشكل (3) توصيف اللحام الاحتكاكي

النتائج والمناقشة:

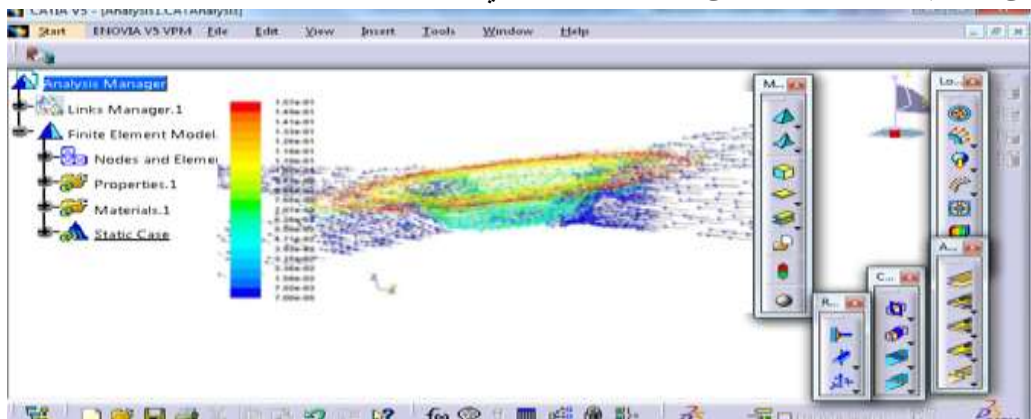
لكي تتم دراسة متجه تدفق المادة أثناء لحام الدمج الاحتكاكي، تم اختيار المواقع التالية كما يظهر في الشكل (3) بالقرب من سطح قطعة العمل a، في منتصف قطعة العمل b والمنطقة بين مقدمة المسمار وقاع قطعة العمل c. ويظهر الشكل (4) المقاطع الثلاثة المختارة والموازية لسطح قطعة العمل وهي على التوالي a ، b ، c .



الشكل (4) المقاطع الثلاثة المختارة والموازية لسطح قطعة العمل

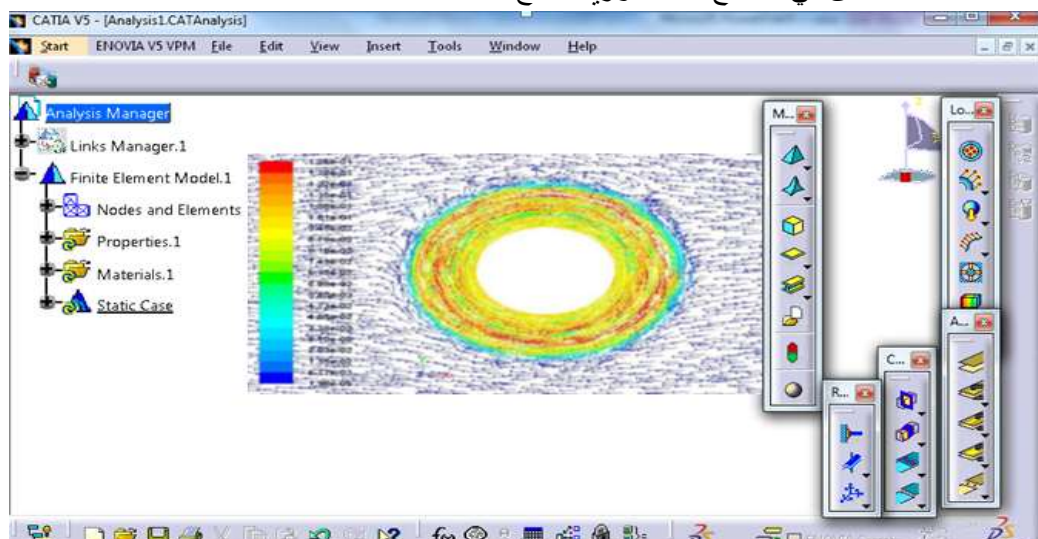
سلوك تدفق المادة في الأداة المخددة بشكل كامل أثناء لحام الدمج الاحتكاكي

الشكل 5 يظهر متجه حقل تدفق المادة ثلاثي الأبعاد (3D)، باستخدام الأداة المخددة بشكل كامل في لحام الدمج الاحتكاكي، والشكل 6 يظهر متجه التدفق في المقاطع الأفقية المختلفة، يلاحظ بأن سرعة تدفق المادة في منطقة التماس مع الأداة مساوية للسرعة الخطية في موقع الاتصال مع الأداة، ويلاحظ بأن سرعة التدفق في جوار المادة في منطقة الاتصال أبداً من سرعة تدفق المادة في منطقة التماس مع الأداة وذلك بسبب تأثير لزوجة المادة، ولذلك فإن سرعة تدفق المادة تتناقص مع زيادة المسافة أو البعد عن محور الدوران (الشكل 5 و 6). واتجاه تدفق المادة في منطقة الاتصال مع الكنف هو بنفس اتجاه دوران الأداة، أما اتجاه تدفق المادة في منطقة الاتصال مع المسمار يمكن أن ينقسم إلى جزئين: أحدهما مشابه تماماً لاتجاه دوران الأداة والآخر منحدر في الاتجاه العمودي. علاوة على ذلك فإنه من أجل المادة على طول الاتجاه العمودي،



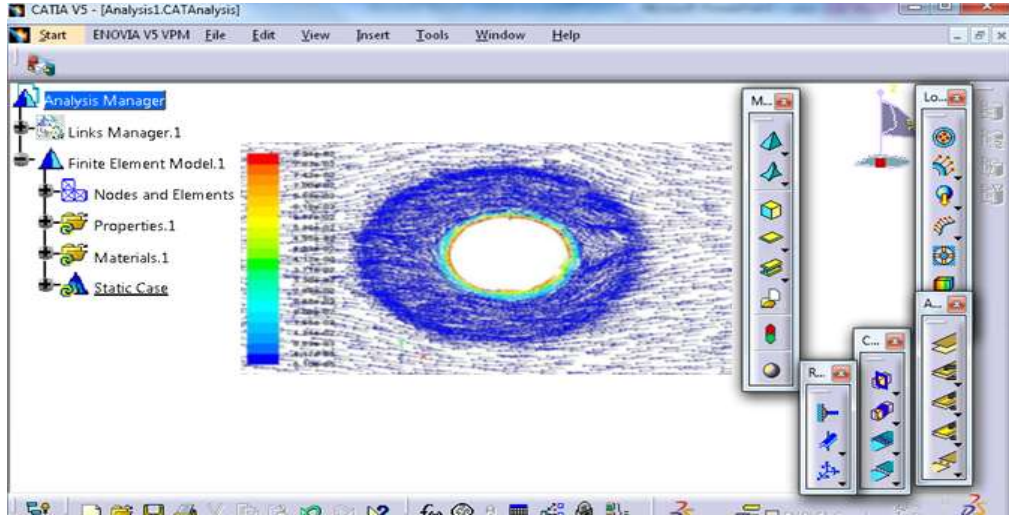
الشكل (5) متجه تدفق المادة ثلاثي الأبعاد باستخدام الأداة المخددة بشكل كامل

فإن سرعة التدفق وكذلك في المنطقة التي تكون فيها سرعة التدفق العليا، كلاهما يتناقص مع زيادة مسافة البعد عن سطح قطعة العمل، وهذا ينتج عن تغيير قطر مسمار الدوران، وسرعة تدفق المادة في المنطقة بين مقدمة المسمار وقاع قطعة العمل تكون صغيرة نسبياً وهذا قد ينتج عن عيوب الجذر. يوضح الشكل 6 متجه التدفق في المقطع a، الموازي لسطح قطعة العمل.



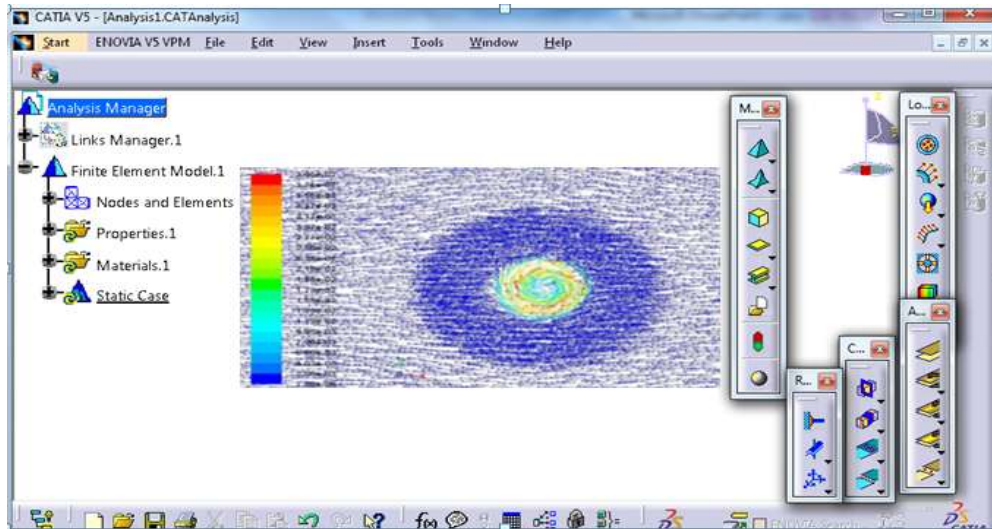
الشكل (6) متجه التدفق في المقطع a الموازي لسطح قطعة

يوضح الشكل 7 متجه التدفق في المقطع b



الشكل (7) متجه التدفق في المقطع b

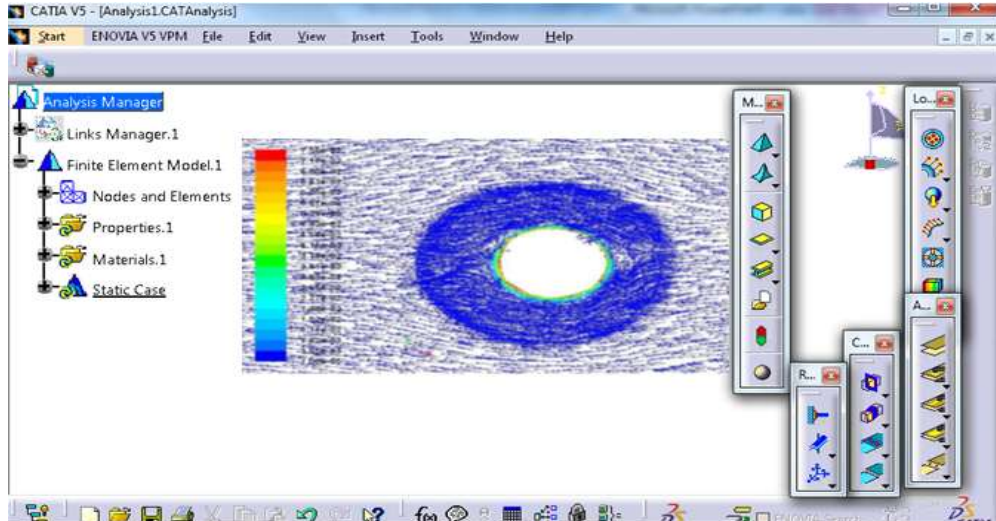
يوضح الشكل 8 متجه التدفق في المقطع c



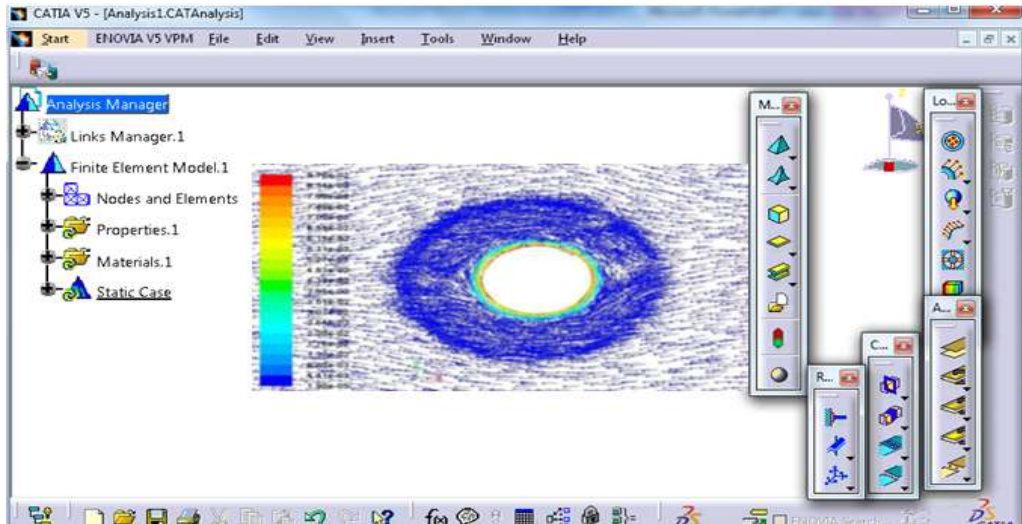
الشكل (8) متجه التدفق في المقطع c

تأثير هندسة التخليد على تدفق المادة

يظهر الشكلان (9 و 10) على التوالي متجه سرعة تدفق المادة باستخدام الأداة التقليدية والأداة نصف المخددة وذلك في المقطع b

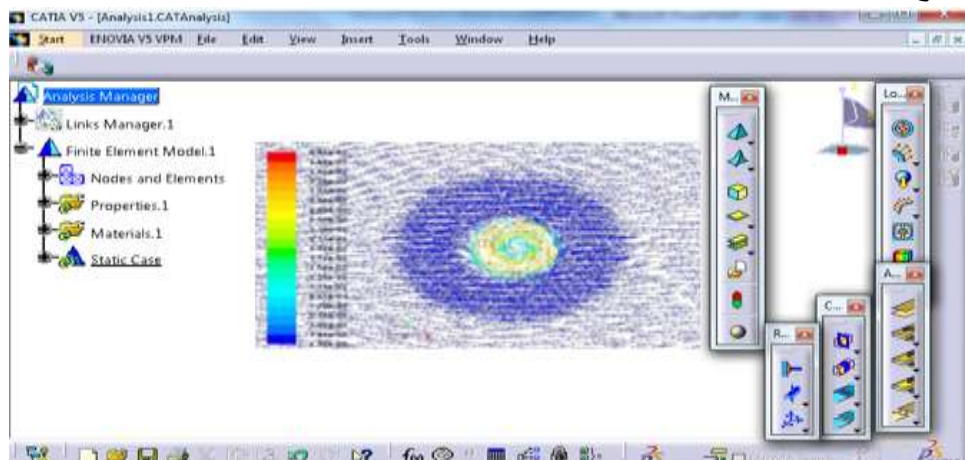


الشكل (9) متجه التدفق في المقطع b باستخدام الأداة التقليدية



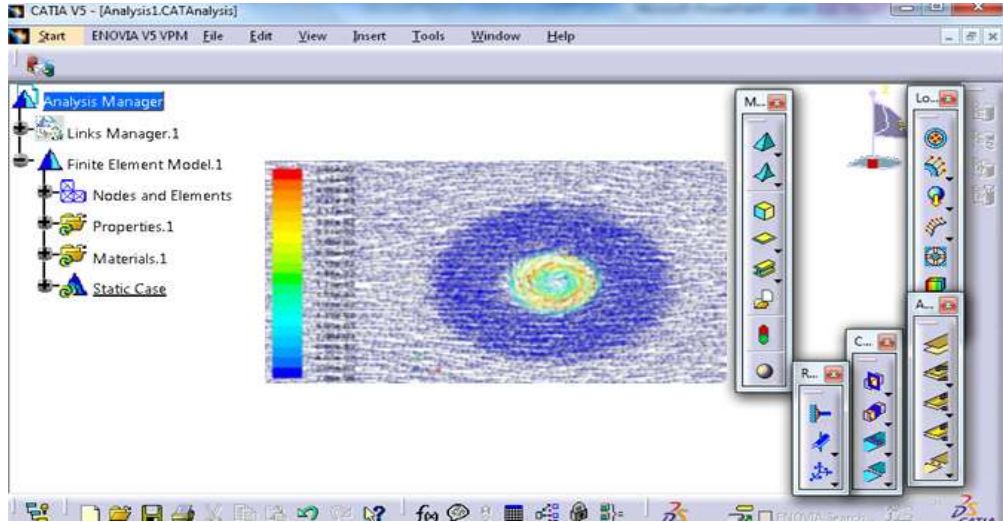
الشكل (10) متجه التدفق في المقطع b باستخدام الأداة نصف المخددة

الشكلان (11 و 12) على التوالي يظهران متجه سرعة تدفق المادة باستخدام الأداة التقليدية والأداة نصف المخددة وذلك في المقطع c



الشكل (11) متجه التدفق في المقطع c باستخدام الأداة التقليدية

نلاحظ من الأشكال 5 و 6 و 7 و 8 بأن تخديد الأداة يمكن أن يزيد كثيراً من سرعة تدفق المادة لذلك فإن التصميم المناسب لهندسة تخديد أداة الدوران في لحام الدمج الاحتكاكي هام جداً . ويلاحظ بأن سرعة تدفق المادة تتناقص مع زيادة طول التخديد لذلك فإن تخديد مسمار الأداة لمسافة قصيرة هو أفضل من حالة تخديد مسمار الأداة لمسافة طويلة وذلك من وجهة نظر زيادة سرعة تدفق المادة ، وهذا هو السبب وراء تصميم مسمار الأداة نصف المخدد من أجل تجنب ثبات التدفق.



الشكل (12) متجه التدفق في المقطع C باستخدام الأداة نصف المخددة

يلاحظ من الأشكال 9 و 10 و 11 و 12 بأن الأداة نصف المخددة يمكن أن تحسن من سرعة تدفق المادة ليس فقط في قاع قطعة العمل وإنما أيضاً في منتصف قطعة العمل . علاوة على ذلك فإنه يلاحظ من الأشكال 11 و 12 و 8 بأن سرعة تدفق المادة في الجانب المنسحب أكبر من سرعتها في الجانب المتقدم . كما هو معروف بأن المادة في عملية لحام الدمج الاحتكاكي يمكن اعتبارها كسائل غير قابل للانضغاط وسلوك تدفقه يمكن أن يحسب كمايلي: $V_1 A_1 = V_2 A_2 = \text{Constant}$ حيث أن V هي سرعة تدفق المادة ، و A هي مساحة المقطع العرضي ، والرموز 1 و 2 تعني المقطع العرضي 1 والمقطع العرضي 2 على التوالي . من المعادلة السابقة نلاحظ بأن سرعة تدفق المادة أثناء عملية لحام الدمج الاحتكاكي متناسبة عكسياً مع مساحة التخديد ، لذلك فإن عرض التخديد الصغير يكون مفيد من أجل زيادة سرعة تدفق المادة ولذلك فإن سرعة تدفق المادة في المقطع C باستخدام الأداة المخددة بشكل كامل (الشكلين 7 ، 8) هي أفضل من حال استخدام الأداة التقليدية (الشكلين 9 ، 11) .

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- إن هندسة تخديد أداة الدوران خلال عملية لحام الدمج الاحتكاكي تؤثر كثيراً على سلوك تدفق المادة .
- إن الأداة نصف المخددة والأداة المخددة بشكل كامل كلاهما حقق زيادة واضحة في سرعة تدفق المادة بالقرب من الجزء السفلي من قطعة العمل
- الأداة نصف المخددة والأداة المخددة بشكل كامل لهما دور كبير في تجنب عيوب الجذر

التوصيات:

- رسم وتصميم اونمذجة الادوات المقترحة الثلاثة على برنامج اخر للتأكد من وثوقية النتائج و البرنامج CATIA V5
- التحقق من النتائج الحاسوبية باجراء تجارب عملية مخبرية ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من البرنامج مع النتائج المخبرية

References:

- [1] BILICI. M. K "Effect of Tool Geometry on Friction Stir Spot Welding of Polypropylene Sheets" (2012).805-813
- [2] Fonda, R.W.; Knipling, K.E.; Bingert, J.F. " Microstructural evolution ahead of the tool in aluminum friction stir welds". *Scr. Mater.* 2007, 58, 343–348.
- [3] JI. S, XING. J, YUE. Y "Design of Friction Stir Welding Tool for Avoiding Root Flows" (2013).5870-5877
- [4] Mishra, R.S.; Ma, Z.Y. "Friction stir welding and processing". *Mater. Sci. Eng. R* 2005, 50, 1–78.
- [5] JI. S, JIN. Y, YUE. Y "The Effect of Tool Geometry on Material Flow Behavior of Friction Stir Welding of Titanium Alloy" (2013).107-113
- [6] Nandan, R.; Debroy, T.; Bhadeshia, H.K.D.H. "Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties". *Prog. Mater. Sci.* 2008, 53, 980–1023.
- [7] PARIDA. B, MOHAPATRA. M, BISWAS. P "Effect of Tool Geometry on Mechanical and Micro-Structural Properties of Friction Stir Welding of AL-Alloy" (2014)
- [8] Afrin, N.; Chen, D.L.; Cao, X.; Jahazi, M. "Microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy". *Mater. Sci. Eng. A* 2008, 472, 179–186.
- [9] KESHARWANI. R. K, PANDA. S. K, PAL. S. K "Multi Objective Optimization of Friction Stir Welding Parameters for Joining of Two Dissimilar Thin Aluminum Sheets" (2014).178-187
- [10] DAS. U, DR. TOPPO. V "Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joint of Two Similar&Dissimilar AL-Alloys" (2015)20-27
- [11] Seidel, T.U.; Reynolds, A.P. "Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique". *Metall. Mater. Trans.* 2001, 32A, 2879–2884.
- [12] Ji, S.D.; Shi, Q.Y.; Zhang, L.G.; Zou, A.L.; Gao, S.S.; Zan, L.V. "Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry". *Comput. Mater. Sci.* 2012, 63, 218–226.
- [13] UMANATH. K, PALANIKUMAR. K, SELVAMANI. ST "Sensitivity Analysis of Friction Welding Process Parameters on Tensile Properties of ASS304L Alloy" (2015).757-764
- [14] Pourahmad, P.; Abbasi, M. "Materials flow and phase transformation in friction stir welding of Al 6013/Mg". *Trans. Nonferr. Met. Soc. China* 2012, 23, 1253–1261.
- [15] Grujicic, M.; Arakere, G.; Pandurangan, B.; Ochterbeck, J.M.; Yen, C.-F.; Cheeseman, B.A.; Reynolds, A.P.; Sutton, M.A. "Computational analysis of material flow during friction stir welding of AA5059 aluminum alloys". *J. Mater. Eng. Perform.* 2012, 21, 1824–1840.