

دراسة محاكاة الاجهاد والتشوه الحراري لوصلة تناكبية من الصلب نوع (HSLA)

خالد إبراهيم العرابي

مصطفى علي احمد

عبدالرؤوف فضل

حسن غيث لامة

الملخص Abstract

إن محاكاة اللحام تمت بتحليل الاجهادات المتبقية والتشوهات الحرارية لوصلة لحم تناكبية منفذة على الصلب عالي المتانة منخفض التسابك، والتي تم لحامها بتقنية القوس الكهربائي والغاز الخامل باستخدام سلك معدني (GMAW)، وتم استخدام محاكاة وصلة اللحام التناكبية باستخدام برنامج (Solidworks)، وذلك بتحليل للإجهادات المتبقية والتشوهات الحرارية باستخدام العناصر (Elements) والنقاط (Nodes).

من عملية التحليل للعناصر والنقاط لوصلة اللحام التناكبية والتي تم الحصول على نتائج للإجهادات المتبقية والتشوهات الحرارية، وهذا بسبب حرارة اللحام الغير منتظمة، إن حرارة اللحام الغير منتظمة تؤدي الى حدوث تمدد وانكماش في وصلة اللحام، اي يحدث ضغط على خط اللحام محور (X) والذي بدوره يؤدي الى زيادة الاجهادات المتبقية على خط اللحام محور (X)، وهذا بدوره ادى الى تكون تشوه حراري (تشوه زاوي)، يمكن التحكم في حرارة قوس اللحام وذلك بالتقليل من قيمة التيار، وهذا بدوره يقلل من كمية الحرارة الداخلة لمنطقة انصهار اللحام، ومنها يمكن ملاحظة تركيز الاجهادات المتبقية حول خط اللحام محور (X) وهذا أدى الى التشوه الحراري.

في هذه الورقة تم استخدام محاكاة اللحام والتنبؤ بفعل الاجهادات المتبقية في اللحام التناكبي للصلب نوع (HSLA)، يشمل هذا التحليل تحريك مصدر الحرارة للحام.

الكلمات الدالة Key Words

محاكاة اللحام، الاجهادات المتبقية، التشوهات الحرارية، صلب نوع (HSLA).

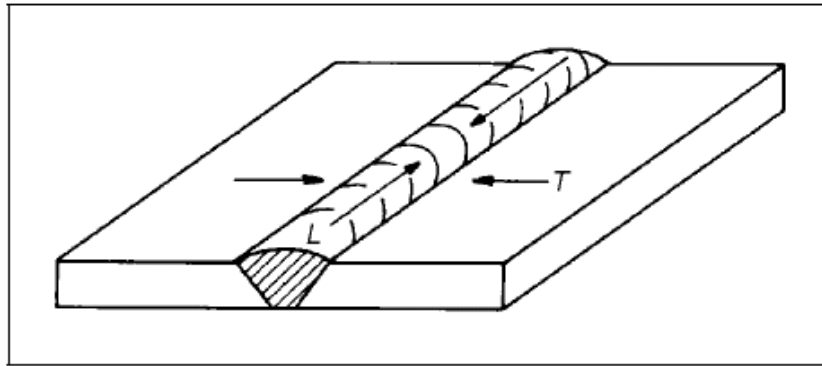
1. المقدمة Introduction

يستخدم الحام على نطاق واسع في صناعة السيارات وفي تجميع المنتجات المختلفة، ومن المعروف أن عملية اللحام تعتمد على كمية الدخل الحراري والتي تميل إلى توليد اجهادات متبقية غير مرغوب فيها و التشوه في الوصلة الملحومة، خاصة في حالة الوصلات ذات السمك الصغير، لذلك يجب اعتبار حجم تشوه اللحام وتوصيفه من الشروط الضرورية، مع برامج المحاكاة الحديثة التي أصبحت تقنية العناصر المحدودة (FE) طريقة فعالة للتنبؤ وتقييم اللحام من حيث الإجهاد المتبقي والتشوهات الحرارية، ومع ذلك تختلف التشوهات باختلافات نوع المعدن الاساس ونوع عملية اللحام، لذلك يعتبر التنبؤ بسرعة وبدقة للتشوه الناتج عن عملية اللحام للتطبيقات الهندسية الحقيقية أكثر صعوبة، في العديد من تطبيقات درجات الحرارة العالية من الضروري ربط المكونات معاً مثل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والتركيب الكيميائي، ويجب أن تُلبي الوصلات الملحومة القوة وتكون وفق المتطلبات واحتمالات تكوين خلل يتم تقديرها ومراقبتها، علاوة على ذلك إن الاجهادات المتبقية قد توجد في أي وصلة ملحومة وقد يكون الاجهاد المتبقي معقد للغاية ويكون توزيعه معقد ويصعب التنبؤ به. [1-2]

تحدث الإجهادات المتبقية في الوصلات الملحومة ولها أنماط توزيع خاصة بها ومعقدة للغاية، ونظرًا لأن التشوه في عمليات اللحام يعد عاملاً مهمًا في صلاحيتها للخدمة، ولذلك يتم الفحص بمختلفة الإجراءات المستخدمة لتقليل أو التحكم في الإجهاد المتبقي والتشوه في الوصلات الملحومة، وتخضع مناطق اللحام للتسخين الموضعي للوصلة الملحومة خلال معظم عمليات اللحام، لذلك فإن التوزيع الحراري غير منتظم، ويحدث ذلك تغيرات في التركيب وتغيرات ميتالورجية مع تقدم اللحام على طول الوصلة،

ويكون معدن اللحام والمنطقة المتأثرة بالحرارة (HAZ) في درجات حرارة أعلى إلى حد كبير من المعدن الأساس، وعند بداية التجمد لبركة اللحام (Welding pool) تكون ساخنة وضعيفة نسبياً، ويحدث انكماش لاحق والذي بدوره يبدأ بتطبيق الإجهاد على المناطق المحيطة بالمناطق المتأثرة بالحرارة.[3]

وعندما تبرد منطقة اللحام إلى درجة الحرارة المحيطة فإن الإجهاد في منطقة اللحام تزيد وتؤدي في النهاية إلى الوصول لنقطة الخضوع (Yield point) للمعدن الأساس والمنطقة المتأثرة بالحرارة، لذلك عندما يتم تنفيذ عملية اللحام تدريجياً، فإن الجزء الملحوم يتجمد ويعزز من مقاومة الانكماش للجزء البعيد من بركة اللحام، وبالتالي فإن الأجزاء الملحومة أولاً يحدث لها انفعال وشد في الاتجاه الطولي مع خط اللحام، ويكون في أسفل على طول خط اللحام، في حالة الوصلات التناكبية يبدأ في ممارسة الضغط ويُسمح بحركة صغيرة للحام في الاتجاه العرضي بسبب تحضير وصلة اللحام وتأثير التقوية لخطوط اللحام الأساسية، يكون إجهاد الانكماش شديداً طويلاً مع طول وعرض خط اللحام، يمكن أن يكون للإجهاد المتبقي في عمليات اللحام عاملان رئيسيان، أي يمكن أن ينتج عنه تشوه أو يسبب فشلاً مبكراً أو كليهما، ويحدث التشوه عندما تتجمد منطقة اللحام الساخنة بشكل غير منتظم، مما يتسبب في انكماش في جزء واحد من منطقة اللحام وممارسة قوى غير مركزية على المقطع العرضي لخط اللحام، يتأثر اللحام بشكل مرن بالإجهادات، يحدث تشوه يمكن اكتشافه نتيجة لهذه التغيرات غير المنتظمة، كما هو موضح في الشكل [5.4.3].(1)



الشكل (1).

2. خطوات العمل

تم تطبيق محاكاة وصلة اللحام التناكبية لدراسة الاجهادات والتشوه الحراري.

1.2 التركيب الكيميائي

التركيب الكيميائي للصلب عالي المتانة منخفض السبانكة (High Strength Low Alloys - HSLA) نوع (ASTM A709) (Steel, grade 50) وفقاً للجمعية الأمريكية لاختبار المواد (ASTM).

الجدول (1) بين قيم النسبة المئوية للتركيب الكيميائي للصلب عالي المتانة منخفض السبك (HSLA) نوع (ASTM-A709) (Steel, grade 50).

العنصر	Fe	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
النسبة %	Balance	0.22	0.60 - 0.90	0.10	0.080 - 0.15	0.050	0.50 - 0.50	- 0.40 0.75

2.2. الخواص الفيزيائية والميكانيكية

الخواص الفيزيائية والميكانيكية للصلب عالي المتانة منخفض السبك (HSLA) نوع (ASTM-A709 Steel, grade 50) وفقا للجمعية الامريكية لاختبار المواد (ASTM)، موضحة في الجدول التالي.

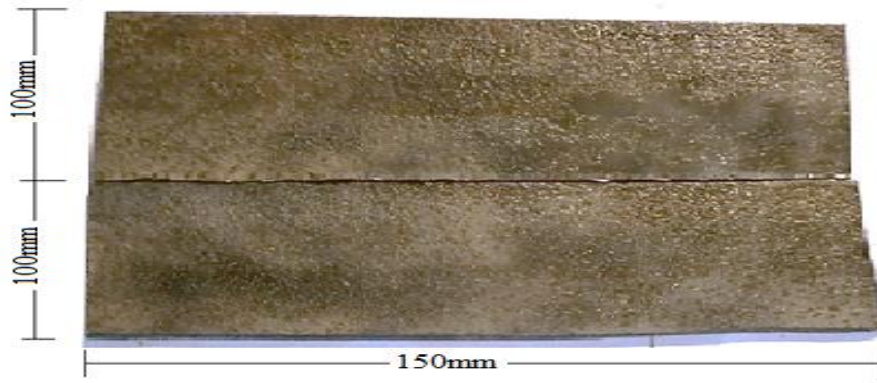
الجدول (2) يبين قيم الخواص الفيزيائية والميكانيكية للصلب عالي المتانة منخفض السبك (HSLA) نوع (ASTM-A709) [6]. (Steel, grade 50)

Physical Properties		الخواص الفيزيائية	
Thermal Conductivity λ (W/m.°C)	51 W/m.K	التوصيل الحراري	
Specific Temperature $C\rho$	470 J/kg.K	الحرارة النوعية	
Density (g / cm ³)	7.9 g/cm ³	الكثافة	
Thermal Expansion (J/kg.°C)	13 μ m/m.K	التمدد الحراري	
Melting Point T_m (°C)	1420 °C	درجة الانصهار	
Thermal Diffusion	14 mm ² /s	الانتشار الحراري	
Mechanical Properties		الخواص الميكانيكية	
Tensile Strength at Break	483 MPa	مقاومة الشد عند الكسر	
Yield Strength	345 MPa	مقاومة الخضوع	
Elongation at Break	18 %	استطالة الكسر	
Modulus of Elasticity	205 GPa	معامل المرونة	
Poisson's Ratio	0.28	نسبة بويسون	
Shear Modulus	80.0 GPa	معامل القص	
Brinell Hardness	150	صلادة برينل	
Fatigue Strength	230 MPa	مقاومة الكلال	
Shear Strength	310 MPa	مقاومة القص	

3.2. عملية اللحام

1.3.2. ابعاد العينة

تم تجهيز عينات اللحام من الصلب عالي المتانة منخفض السبك (HSLA)، وكانت الابعاد (الطول 150mm، العرض 100mm، السُمك 4mm)، كما في الشكل (2).



الشكل (2). يبين العينة قبل عملية اللحام.

2.4.2. تطبيق اللحام

تم تطبيق عملية اللحام على وصلة لحام تناكبية (Butt Joint)، باستخدام تقنية القوس الكهربائي باستخدام الغاز الخامل وسلك معدني (GMAW)، وضعية اللحام افقية (Flat Position)، وكان خط لحام واحد، وصلة اللحام كما في الشكل (3)، كما يوضح الجدول (3) معطيات اللحام.



الشكل (3). يبين وصلة بعد عملية اللحام.

الجدول (3) يبين معطيات عملية اللحام.

المعطيات	التيار	فرق الجهد	زمن اللحام	نوع الغاز	تدفق الغاز	سرعة اللحام	قطر سلك اللحام
العينة	160A	24V	59 sec	ارجون	8L/m	2.54mm/sec	2.5 mm

3. التحليل الحراري Thermal Analysis

1.3. حساب كمية الحرارة المتولد أثناء عملية اللحام (Heat Input)

يتم حساب كمية الحرارة المتولد أثناء عملية اللحام وفقا للمعادلة التالية:

$$H_{net} = \frac{v.A.60}{s} = \frac{J}{mm} \quad [6]$$

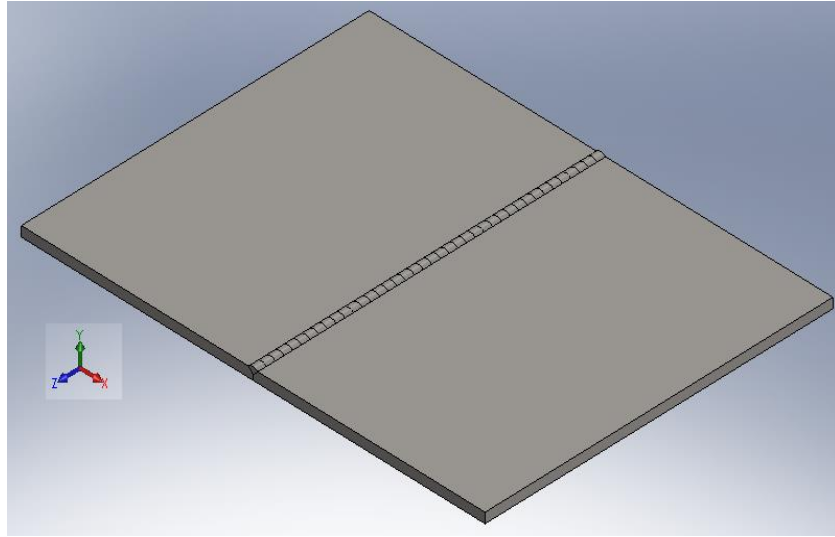
H_{net} - كمية الحرارة المتولدة أثناء عملية اللحام (Heat Input)، V - فرق الجهد (Volte)، A - تيار اللحام (Ampere)، S - سرعة اللحام (Welding Speed) (mm/sec).

$$H_{net} = 90.708 \text{ J/mm}$$

2.3. محاكاة الوصلة الملحومة Simulation of Welded Joint

1.2.3. الشكل الهندسي Geometrical Shape

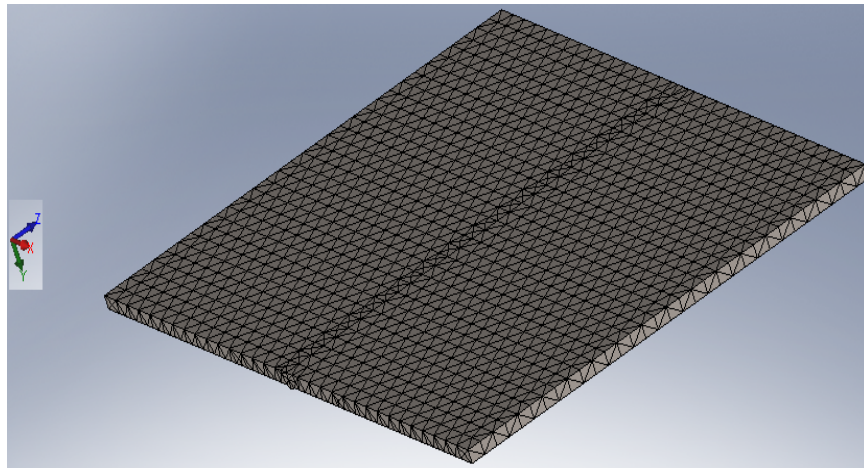
الشكل (4) يوضح الشكل الهندسي لوصلة اللحام كما هو موضح في برنامج المحاكاة.



الشكل (4). يوضح الشكل الهندسي لوصلة اللحام.

3. الشبكة Mesh

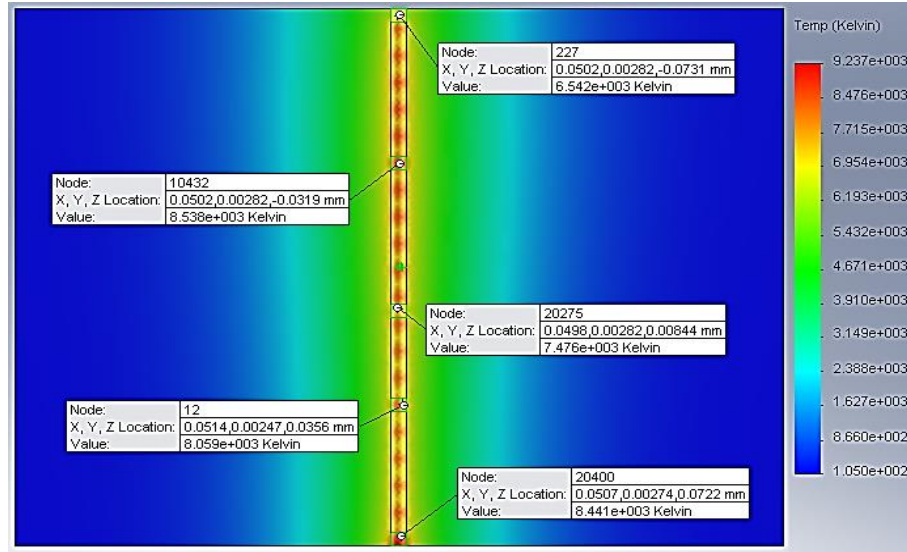
الشبكة وهو تقسيم وصلة اللحام إلى عقيدات وعناصر، العقيدات (4872) والعناصر (2761)، كما هي في الشكل (5).



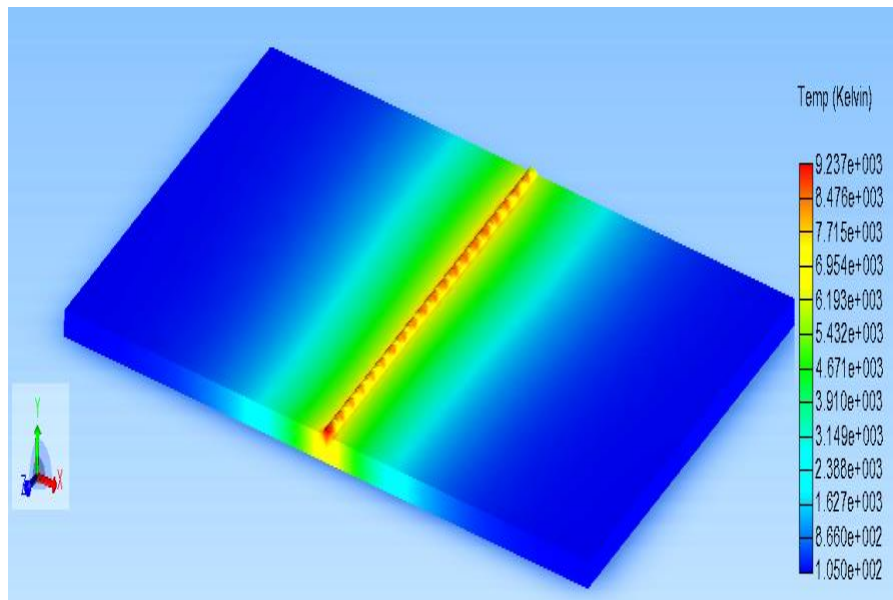
الشكل (5). يوضح شبكة العقيدات والعناصر لوصلة اللحام.

4.3. التوزيع الحراري Thermal Disturbotion

ولحساب التوزيع الحراري للحام والذي يعتبر بكونه توزيع حراري غير منتظم، ومن هذا تم وضع (5) نقاط على طول خط اللحام (محور X) تبدأ النقطة (1) عند بداية خط اللحام وتكون النقطة (5) عند نهاية خط اللحام مع نهاية زمن اللحام، وتكون درجة الحرارة فيها درجة حرارة الانصهار، وذلك لحساب درجات حرارة هذه النقاط لمصدر حرارة ثابت أي عند الانتهاء مباشرة من عملية اللحام، وهي كما موضحة في الشكل (6) والشكل (7).



الشكل (6). يوضح النقاط الخمسة لحساب التوزيع الحراري.

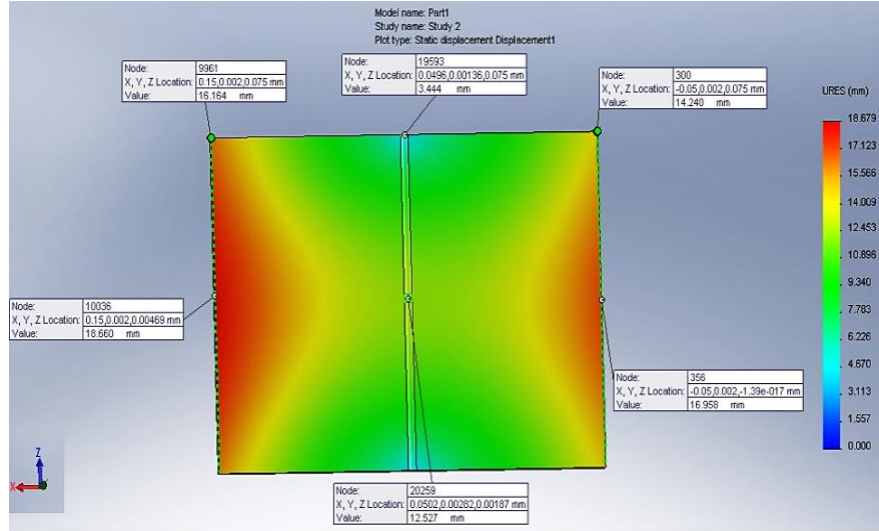


الشكل (7). يوضح التوزيع الحراري.

5.3. الاجهادات المتبقية Residual Stresses

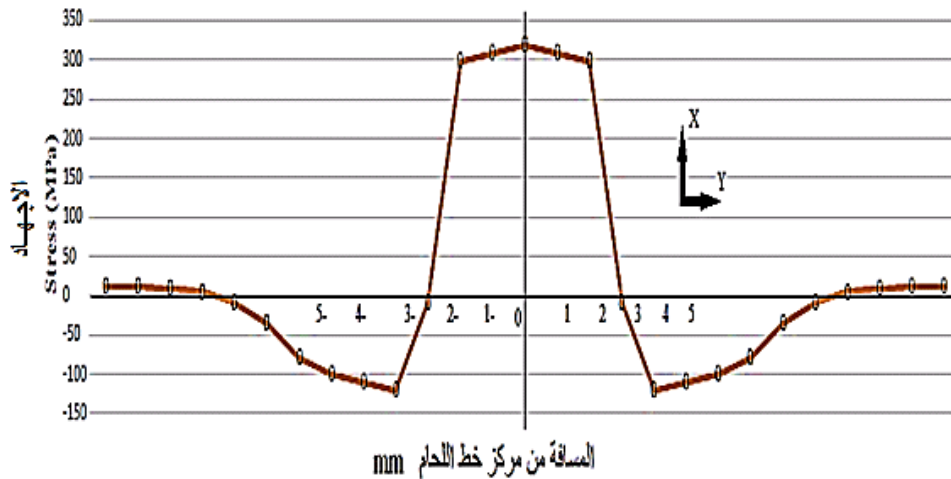
تم محاكاة الاجهادات الحرارية المتبقية باستخدام تحليل العناصر والعقد (FEA)، وبمحاكاة الإجهاد المتبقية من عملية اللحام.

إن من المعلوم تولد الاجهاد عن طريقة التوزيع الحراري الغير منتظم، وهذا يؤدي الى تمدد وانكماش أي يحدث ضغط على خط اللحام في الوصلات التناكبية، ويتلاشى هذا الضغط كلما زادت المسافة من خط اللحام، والشكل (8) يوضح تركز الاجهادات في الوصلة الملحومة. [6]



الشكل (8). يوضح تركز الاجهادات في وصلة اللحام التناكبية.

ومن الشكل (8) الذي يوضح تركز الاجهادات يمكن تطبيق بعض النقاط على المحور (Y) مع خط اللحام محور (X) والحصول على المنحنى الموضح بالشكل (9).

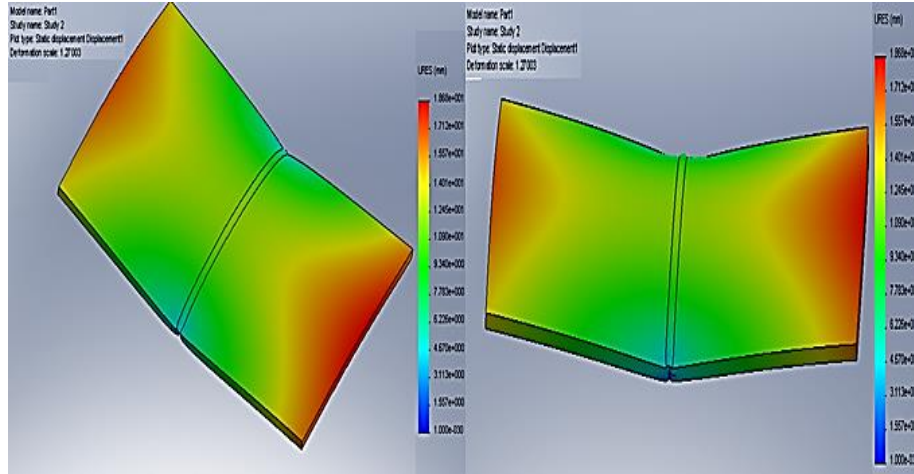


الشكل (9). يوضح منحنى تركز الاجهادات في وصلة اللحام التناكبية.

من المنحنى الموضح بالشكل (9)، نلاحظ ان تركيز الاجهادات المتبقية يزداد بالقرب من خط اللحام وهذا بسبب الضغط الذي حدث على خط اللحام، ويقل كلما ابتعدنا من خط اللحام.

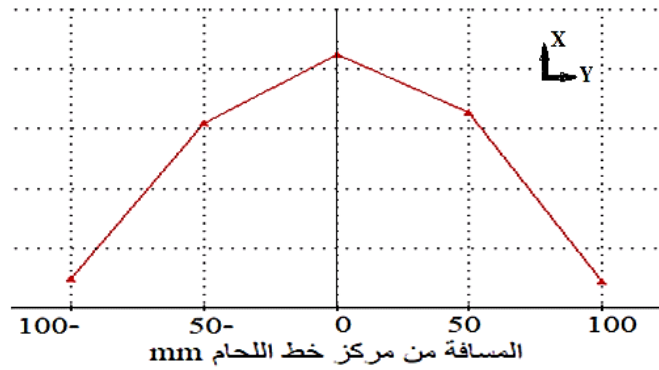
6.3. التشوه الحراري Thermal Distortion

يحدث التشوه الحراري بسبب التوزيع الحراري الغير منتظم، وايضاً بسبب الإجهادات المتبقية، ومن المعروف ان الإجهادات المتبقية دائماً تخلف تشوه في وصلة اللحام، ويحدث التشوه لوصلة اللحام اثناء عملية اللحام وهو الموضح بالشكل (10)، هذا النوع من التشوه الحراري لوصلة اللحام يسمى التشوه الزاوي (Angular Distortion). [8.7.5]



الشكل (10). يوضح التشوه الحراري لوصلة اللحام التناكبية.

ومن الشكل (8) الذي يوضح تمركز الاجهادات يمكن تطبيق بعض النقاط على المحور (Y) مع خط اللحام محور (X) والحصول على المنحنى الموضح بالشكل (11).



الشكل (11). يوضح تركيز التشوه الزاوي لوصلة اللحام التناكبية.

من المنحنى الموضح بالشكل (11)، نلاحظ ان التشوه يكون أعلى على خط اللحام محور (X) وهذا بسبب الضغط الذي حدث على خط اللحام، ويقل كلما ابتعدنا من خط اللحام، وهذا أدى الى انحراف وصلة اللحام التشوه الزاوي، كما في الشكل (12).



الشكل (12). يوضح التشوه الزاوي في وصلة اللحام التناكبية .

4. النتائج Results

في مجمل الدراسة البحثية المنجزة حول محاكاة اللحام حول محاكاة الاجهاد والتشوه الحراري لوصلة تناكيبية من الصلب نوع (HSLA) تم الحصول على النتائج التالية:-

- 1- استخدام محاكاة اللحام فعال وذو نتائج متوافقة مع تحليل الاجهادات المتبقية والتشوهات الحرارية.
- 2- الحصول على نتائج جيدة متوافقة مع العينة الاصلية الملحومة.
- 3- درجات حرارة مختلفة للنقاط 1، 2، 3، 4، 5 للوصلة الملحومة كما في الشكل (6).
- 4- حدوث تشوه في طرفي وصلة اللحام.
- 5- تركيز الاجهادات على خط اللحام محور (X) مما أدى الى حدوث تشوه زاوي.
- 6- حدوث تشوه زاوي للوصلة الملحومة.

5. المناقشة Discussion

من الدراسة باستخدام المحاكاة والتي تم أخذها في الاعتبار في دراسة العقيدات والعناصر (FEA) كما في الشكل (5)، والحصول على توزيع حراري غير منتظم كما في الشكل (7،6)، والتي أدت إلى الحصول على نتائج دقيقة لتحليل الاجهادات المتبقية كما في الشكل (8)، والحصول على نتائج للتشوه الحراري متوافقة مع العينة الاصلية الملحومة كما في الشكل (10). وحدث تغير في درجات الحرارة كلما ابتعدنا من خط اللحام وأيضاً من نقطة الانصهار في خط اللحام، مما أدى الى تشوه طرفي وصلة اللحام كما في الشكل (8)، وهي موضحة في المنحنى (9)، تم الحصول على تركيز للاجهادات بجانب خط اللحام، ونقل هذه الاجهادات كلما ابتعدنا من خط اللحام، وهذا حدث بسبب الضغط الحراري الذي حدث على جانبي خط اللحام وذلك بسبب التوزيع الحراري الغير منتظم، وهذا أدى الى حدوث تشوه حراري زاوي للوصلة الملحومة كما في الشكل (10) وهي موضحة في المنحنى الموضح في الشكل (11)، وهي متطابقة مع وصلة اللحام الملحومة فعلياً الموضحة في الشكل (12).

6. التوصيات Recommendations

في مجمل النتائج النهائية تم الحصول على من هذه الورقة البحثية ويمكن اجمالها في التوصيات التالية:-

1. نوصي باستخدام المعالجة الحرارية التسخين المسبق لوصلة اللحام، لأنها تحسن كثيراً من الخواص الميكانيكية.
2. نوصي باستخدام المعالجة الحرارية بعد عملية اللحام في حالة عدم استخدام التسخين المسبق.
3. التوصية بالتقليل من قيمة تيار اللحام بحيث تكون متوافقة مع عملية الانصهار وذلك للتحكم في كمية الحرارة الداخلة.
4. تقليل الحرارة الداخلة يقلل من الاجهادات المتبقية والتشوهات الحرارية.
5. يجب مراعاة تثبيت وصلة اللحام جيداً لتجنب حدوث حالة تشوه حراري حرج عالية.
6. يحتاج لحماية جيدة بالغاز الخامل لمنطقة الانصهار وذلك لتجنب حدوث المسامية.
7. لا ينصح باستخدام التبريد السريع، وذلك لتجنب تكون طور المارتنسايت.

7. المراجع Refrences

- 1- Medvedev. S.V., Computer modeling of residual welding strains in technological design of welded structures, Welding International Journal. - 2002, Vol.16(1), USA.
- 2- Murthy, Y.V.L.N, Rao,G.V., Iyer, P.K.: Numerical simulation of welding and quenching processes using transient thermal and thermo-elasto-plastic formulations, Comput. Struct., 1996.
- 3- AWS, Welding Handbook – Welding Processes. Part 1. Vol 2 9th ed. USA.

- 4- AWS - Handbook, Residual Stress and Distortion. Vol 1. 9th ed. 2001.
- 5- J. F. Lancaster. Metallurgy of Welding. 6th ed. Abington Publishing, 1999. England.
- 6- AMS, Welding Brazing and Soldering. Vol 6. 2004. USA.
- 7- Sindo Kou, Welding Metallurgy. John Willey. 2nd ed. 2003. USA.
- 8- Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. Kenneth Easterling – Butterworth-Heinemann – 1992.