دراسة تأثير بعض المتغيرات المؤثرة على مقاومة لحام النقطة لوصلة لحام صلب منخفض الكربون باستخدام تقنية تاقوشي

* نبيل أحمد العالم ** رضا البهلول عريبي *** حميد ندا الزوبعي

الملخص:

يتضمن هذا البحث دراسة تأثير بعض المتغيرات المؤثرة على مقاومة القص لوصلة لحام عينة من الصلب منخفض الكربون (Mild Steel) باستخدام طريقة لحام المقاومة الكهربائية «لحام النقطة». تم إجراء الدراسات التجريبية تحت تأثير التغير في قيم تيار اللحام (WC)، قوة اللحام/الضغط (WF)، زمن اللحام (WT) وزمن التثبيت "التبريد" (HT)، أجريت هذه الدراسة اعتمادا على تقنيات تاقوشي (Taguchi Techniques) والتي بناء عليها تم استخدام مصفوفة التعامد (L9) لتحديد وتحليل المتوسطات بغرض دراسة وتحديد تأثير مستويات المتغيرات المختارة، ومعادلات تحليل المتغيرات "ANOVA" واختبار (F) لمعرفة المتغيرات ذات التأثير الأهم والأكبر في مقاومة القص (Tensile shear strength) لنقاط اللحام. لقد أظهرت النتائج أن لكل من قوة اللحام/ الضغط (W.F) وزمن اللحام (W.T) تأثيراً مهماً على مقاومة وصلة اللحام لإجهاد القص، وإن أفضل مستوى لقوة اللحام/ الضغط والذي يعطي أعلى مقاومة قص هو المستوى الأول (2) كيلو نيوتن وأن أفضل مستوى لزمن اللحام هو المستوى الثالث (11) دورة.

*عضو هيئة تدريس/ كلية الهندسة. جامعة طرابلس
**عضو هيئة تدريس/ كلية الهندسة. جامعة طرابلس
***عضو هيئة تدريس / كلية الهندسة. جامعة طرابلس

1. المقدمة:

لحام النقط هو أحد أنواع لحام المقاومة الكهربائية المهمة والذي يستخدم بشكل كبير وفعال في العديد من المجالات الصناعية بسبب آلية وسرعة العملية وانخفاض تكلفتها ومناسبتها لأنواع مختلفة من المعادن، كما إنها من العمليات المستخدمة على نطاق واسع في الإنتاج الكمي الضخم والتي تكون فيها العمليات التصنيعية تتم بشكل متكرر وتحت ظروف تشغيل ثابتة . وعلى الرغم من أن لحام النقطة يدخل في العديد من الصناعات كالحواسيب والطائرات والأجهزة الالكترونية وغيرها إلا أنه يعتبر من الخيارات الأساسية والمحبذة بشكل خاص في الصناعات التجميعية للسيارات [1، 2].

تعتمد آلية لحام النقط على المزج مابين الحرارة والضغط والزمن، حيث يستغل تحت هذه الظروف مقاومة المادة الواقعة تحت ضغط الكترودين لانسياب التيار الكهربي مما يسبب إنتاج حرارة موضعية تتركز مابين الأجزاء المراد لحامها. قوة التثبيت أو الضغط تطبق دائما قبل وإثناء وبعد مرور التيار وذلك لمنع انحناء الأسطح المتصلة وما جاورها خلال مرحلة اللحام والتبريد اللاحقة [3]. تستمر العملية خلال دورة زمنية معينة مع حدوث انصهار بمنطقة اللحام ونتيجة لذلك تحدث تغيرات هامة على مستوى الخواص الميكانيكية والميتالورجية بمنطقة اللحام وكذلك بالمناطق المجاورة والمتأثرة بالحرارة (HAZ).

من المهم أن تتوفر لوصلات اللحام مقاومة قص عالية عند تعرضها إلى ظروف تحميل كبيرة بغض النظر عن طبيعة هذا التحميل أحادي أو ثنائي الاتجاه أو قصي [4]، وذلك يعتمد بشكل كبير على كفاءة العملية وجودة وصلة اللحام. هناك العديد من العوامل التي تتحكم في العملية كالتيار، الزمن، قوة التثبيت والضغط، خصائص مادة الالكترود، مادة الصفيحة المستخدمة، حالة السطح ...الخ، بالتالي فإن التحكم في تأثير تغيير مدخلات العملية (input parameters) ودراسة سوف يكون له دور مميز في تحديد جودة ومقاومة وصلة اللحام كما أوضحته بعض الأبحاث السابقة [5،6] والتي أظهرت الارتباط الكبير مابين العديد من الخصائص الميكانيكية ومتغيرات اللحام. معظم الأبحاث السابقة ركزت على دراسة متغيرات لحام النقطة على سبائك من الصلب العالي الكربون حيث إن استخدامها مع لحام النقطة يكون أقل صعوبة ومشاكل من تلك السبائك ذات القوة المنخفضة في سلسلة سبائك الصلب [6].

في هذا البحث سيكون التركيز بشكل أساسي على دراسة تجريبية وتحليلية لتأثير بعض المتغيرات الأساسية بلحام النقطة على مقاومة القص للصلب منخفض الكربون باستخدام تقنية تاقوشي وذلك بهدف الوصول إلى أفضل توليفة لمتغيرات اللحام والتي نضمن من خلالها الحصول على أفضل مقاومة قص لوصلة اللحام.

1. المواد والجانب العملي:

أجريت هذه الدراسة على سبيكة من الصلب منخفض الكربون نوع (AISI 1020) والمعروف بقابليته الجيدة للحام، والمستخدمة بشكل كبير في العديد من التطبيقات الصناعية نظرا لسهولة تشكيله ومقاومته الجيدة وعدم انكساره بسهولة، بمقارنته بالصلب عالي الكربون المرتفع الصلادة نجد أن الصلب منخفض الكربون عند تعرضه للصدم يحدث به في الغالب إما ثني أو طي بمعنى أنه يتشكل بشكل مطيلي الأمر الذي يساعد وبشكل كبير على امتصاص طاقة الصدمة.

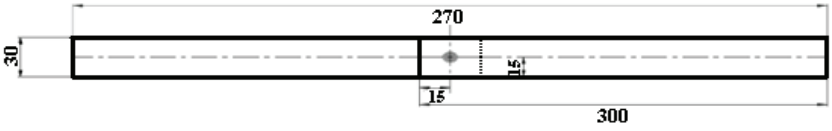
معدن الاختبار تم الحصول عليه على شكل صفيحة بسمك (1) مم، والجدول رقم (1) يوضح عناصر التركيب الكيميائي المقاسة باستخدام جهاز التحليل الطيفي. حيث تم تجهيز(36) قطعة حسب الأبعاد الموضحة بالشكل (1) لتكوين (18) من عينات اللحام المطلوبة. وبغرض التعرف على الخصائص الميكانيكية للمعدن وقبل الشروع في عمليات اللحام تم إجراء بعض تجارب الشد على بعض العينات والجدول رقم (2) يوضح تلك النتائج. وبعد القيام بعملية التنظيف اللازمة للتخلص من الأكاسيد والزيوت والشحوم تم تجهيز هذه القطع للحام بتكوين وصلة لحام تراكبية مكونة من قطعة فوق الأخرى لمسافة (30) مم، وبعد إجراء عمليات اللحام النقطي المطلوبة ووفقا لمتغيرات اللحام المختارة لهذه الدراسة، أجريت اختبارات الشد على هذه العينات المصنعة من المعدن الأساس ووصلة اللحام بغرض تحديد أقصى إجهاد قصي في كل حالة.

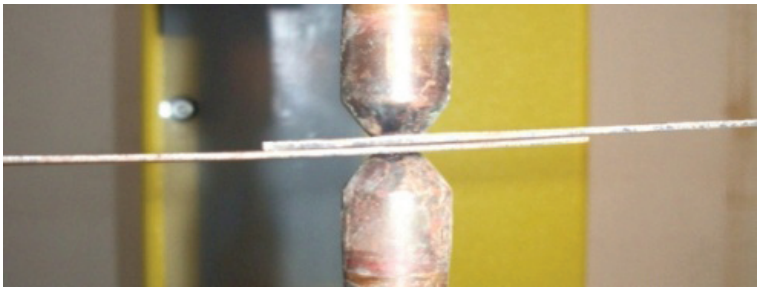
C	Si	P	Mn	S	Ni	Cr	Mo	V
0.2	0.019	0.04	0.25	0.04	0.028	0.005	0.005	0.001

جدول (1) التركيب الكيميائي للصلب المستخدم (٪).

اجهاد الخضوع	295 N/mm^2
مقاومة الشد	420 N/mm^2
الاستطالة الكلية	36 %

كل عمليات اللحام أجريت باستخدام آلة لحام المقاومة النقطي (RSW - TECNA 4625N) والمزودة بوحدة تحكم إلكترونية وباستخدام الكترودات نحاسية بقطر (6) مم. أما في ما يتعلق بتجارب الشد فقد تم إنجازها على آلة شد من نوع (Zwick/SP1000)، وقد تم التأكيد على أن تكون جميع تجارب الشد أجريت في نفس الظروف وبنفس سرعة الشد.





شكل (1) أبعاد عينة الاختبار المستخدمة (مم) والكترودات اللحام

2. تصميم التجارب:

إن مصطلح الجودة في عملية لحام النقطة هو مصطلح فضفاض وعادة ما تقاس الجودة بناء على ملاءمة وصلة اللحام لمتطلبات الاستخدام وهي إما أن تكون كمية أو نوعية. بصفة عامة تكون متطلبات الاستخدام إما استاتيكية "مقاومة إجهادات الشد والضغط – مقاومة قص المقطع – قوة القشرة" أو ديناميكية "الصدم – الكلل"، ومن ناحية عملية فإن اختبارات الشد والقص هي أكثر الاختبارات استعمالا لتحديد جودة اللحام [7]، وفي هذا البحث تم اختيار قوة تحمل لحام العينات لإجهاد القص كمعيار أساسي لتحديد جودة اللحام .

إن كل متغير من متغيرات لحام النقطة له تأثيره وأهميته الخاصة فأي تغيير طفيف

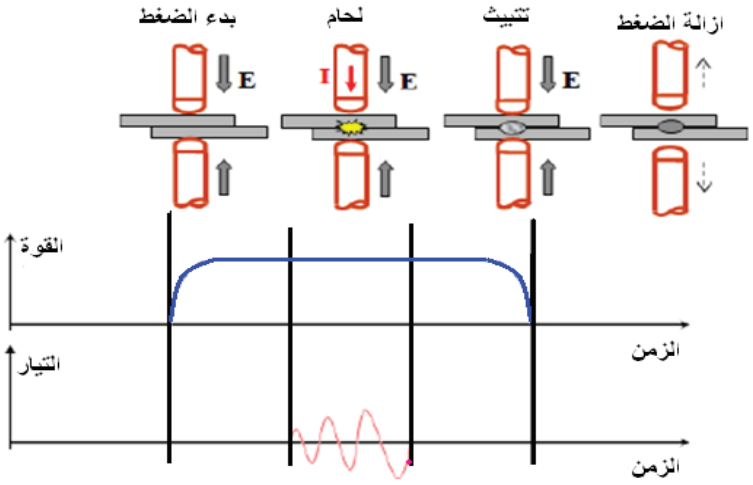
في إحداها سوف يكون له تأثيره الواضح على باقي المتغيرات [5،6،8] بالتالي فإن التحكم في التوليفة الصحيحة وحسن اختيار لهذه المتغيرات سوف ينعكس وبكل تأكيد على جودة اللحام والحصول على وصلة لحام قوية. هناك العديد من المتغيرات المؤثرة كالتيار، الزمن، قوة اللحام، قطر الكترود المستخدم، سمك الصفيحة والفولتية وغيرها، ولكن بالنظر إلى مراحل عملية لحام النقطة نفسها والتي تتكون كما هو موضح بالشكل رقم (2) من أربع مراحل رئيسية فلعل من أهم هذه المتغيرات والتي سوف تكون موضوع هذه الدراسة:

1 - شدة تيار اللحام (W.C).

2 - قوة اللحام/الضغط (W.F).

3 - زمن اللحام (W.T).

4 - زمن التثبيت "التبريد" (H.T).



غالبا ما يتم اختيار وحساب متغيرات عمليات اللحام اعتماداً على التجارب العملية أو بعض المراجع (handbooks) ذات العلاقة، ولكن هذا لا يعطي تأكيداً بأن المتغيرات المختارة سوف ينتج عنها وصلة اللحام المثلى، وبالتالي وللتغلب على هذه المشكلة يتم اللجوء إلى طرق تحديد الأمثلية (optimization methods) والتي يمكن من خلالها إيجاد علاقات سواء كانت رياضية إحصائية أو تجريبية تحدد العلاقات مابين المتغيرات الداخلة والخارجة.

ولدراسة تأثير المتغيرات المختارة أعلاه على قوة تحمل لحام العينات لإجهاد القص

تم الاعتماد على تقنية تاقوشي والتي تعتبر من الطرق الهامة التي تستخدم الأدوات الإحصائية لدمج المفاهيم التجريبية والتحليلية لإدارة الجودة الشاملة لأنظمة ذات جودة عالية وتكلفة منخفضة، كما وأن استخدام مثل هذه التقنيات تؤدي بشكل كبير إلى تقليل الوقت اللازم لإجراء التجارب العملية التحققية.

1.3. تحديد المتغيرات ومستوياتها:

وفقا لمنهجية تقنيات تاقوشي وبعد أن حددت مدخلات ومخرجات الدراسة فإن الخطوة الأولى تتمثل في تحديد المتغيرات والمستويات. لقد تم إجراء التجارب النهائية المشار إليها أعلاه بعد تحديد المتغيرات التي سيتم دراستها وتحديد (3) مستويات لكل متغير للحصول على أفضل مستوى يعطي أفضل لحام، وقد تم اختيار مستويات المتغيرات بناء على جدول رقم (3) والذي تم اختيار القيم الموجودة فيه كمستوى ثانٍ ثم تم إنقاصها لعمل المستوى الأول وزيادتها لعمل المستوى الثالث، وبعد البحث والتشاور مع بعض مختصي اللحام فإن القيم المستخدمة ستكون كالتالي:

العامل/المستويات	المستوى الأول (1)	المستوى الثاني (2)	المستوى الثالث (3)
شدة تيار اللحام (WC) "Amp"	9300	9500	9700
قوة اللحام/الضغط (WF) " KN"	2	2.5	3
زمن اللحام (WT) " Cycle"	9	10	11
زمن التثبيت "التبريد" (HT) " Cycle"	1	2	3

جدول (3) المتغيرات ومستويات اللحام المختارة للتجربة

2.3. اختيار مصفوفة التعامد:

احد نقاط القوة في هذه التقنية هي أنها أحد الأساليب المفضلة الاستخدام لتقليل عدد التجارب المعملية من خلال اختيار مصفوفة التعامد المناسبة والتي من خلالها يتم تصميم خطة تنفيذية توضح ترتيب وعدد التجارب المطلوب إجراؤها مما يسمح بدراسة شاملة لكل المتغيرات المؤثرة على استجابة النظام بإجراء عدد بسيط من التجارب بدلا من مراجعة كل متغير على حدة بالإضافة إلى دراسة التداخل بين هذه المتغيرات. إن اختيار المصفوفة المناسبة يعتمد على درجة الحرية الكلية (DOF) وفقا للمعادلة التالية [9]:

$$DOF = \{(number\,of\,levels-1)\,for\,each\,factor\}+ \quad (1)$$
$$\{(number\,of\,levels-1)\times(number\,of\,levels-1)\,for\,each\,\text{int}eraction+1\}$$

بالتالي وفقا لطريقة تاقوشي فإن مصفوفة التعامد المستخدمة لعدد أربع متغيرات وثلاث مستويات لكل متغير موضحة بالجدول رقم (4). (18) عملية لحام أجريت بمتغيرات لحام مختلفة وفقا للتصميم المعطى بمصفوفة التعامد. ولغرض زيادة حساسية التجربة تم إنتاج عينتين لكل تجربة شد، ومرفق أيضا بالجدول رقم (4) نتائج قيم مقاومة القص للعينات الملحومة. هذا وقد تمت كافة تجارب اللحام بمركز تقنيات اللحام بمنطقة تاجوراء أما تجارب الشد فقد أجريت في فرع تقنيات السباكة التابعين للمكتب الوطني للبحث والتطوير.

3. تحليل ومناقشة النتائج:

لتحليل نتائج التجارب تم تصميم منظومة باستخدام برنامج "Matlab". حيث تم برمجة المعادلات الخاصة بالنسبة (S/N) لتحليل المتوسطات "ANOM" من أجل تحديد تأثير مستويات المتغيرات المختارة، ومعادلات تحليل المتغيرات "ANOVA" واختبار (F) لمعرفة العوامل المؤثرة في مقاومة إجهاد القص لنقاط اللحام.

العامل/التجربة	W C	W F	W T	H T	T-S Strength (N/mm^2)		T-S Strength (N/mm^2) (mean)
					Sample 1	sample 2	
1	1	1	1	1	221.52	220.3	220.91
2	1	2	2	2	211.92	224.24	218.08
3	1	3	3	3	221.43	230.29	225.86
4	2	1	2	3	228.74	221.81	225.275
5	2	2	3	1	227.38	225.53	226.455
6	2	3	1	2	219.48	211.06	215.27
7	3	1	3	2	234.98	227.63	231.305
8	3	2	1	3	209.47	218.61	214.04
9	3	3	2	1	210.13	214.42	212.275

جدول (4) مصفوفة التعامد (L9) ونتائج قيم اجهاد مقاومة القص (N/mm2)

1.4. **نتائج تحليل المتوسطات** " S/N - Signal to Noise ratio"

تحليـل المتوسطات يستخدم لدراسة تأثير مستويات المتغيرات على العملية وذلك بأخذ المتوسط لكل مستوى من هذه المستويات وتمثيله بيانياً وذلك لتمكين المحلل من التعرف على تأثير مستويات المتغيرات بوضوح حيث إن تأثير المتغير في هذا التحليل هو الانحراف الذي يسببه المستوى عن المتوسط الكلي، وباستخدامه وجد أن المتوسط الكلي لمستويات متغيرات العملية ككل هو (N/mm2 221.05)، ولدراسة مقدار التأثير لكل مستوى من مستويات المتغيرات المستهدفة بالدراسة على مقاومة اللحام لإجهاد القص ثم حساب متوسطات المستويات لكل متغير من المتغيرات الثلاثة باستخدام النسبة (S/N Signal to Noise -). غالبا هناك ثلاث فئات من خصائص الجودة عند استخدام تحليل النسبة (S/N) وهي الأقل هو الأفضل أو المحددة هي الأفضل وأخيرا الأعلى هو الأفضل. وعلى اعتبار أن مقياس جودة اللحام في حالتنا هذه هو مقاومة القص فإن عمليات التحليل ستكون مبنية على الأعلى هو الأفضل، بناء عليه فان المستوى الأمثل لمتغيرات العملية هي تلك التي تناظر أعلى قيم النسبة (S/N) والذي يتحصل عليه تبعا للمعادلة التالية:

$$S/N = -10\,Log\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{y^2}\right) \qquad (2)$$

حيث (N) عدد التجارب لكل مستوى و(y) تمثل نتيجة التجربة.

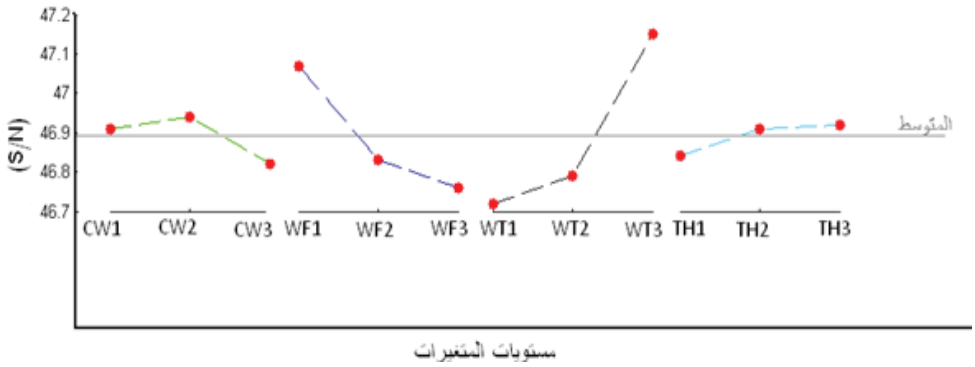
عمليات تحليل البيانات التالية والمعتمدة على استخدام العلاقة السابقة تأخذ في الاعتبار التجارب الداخل فيها كل مستوى على حدة كما هو مبين بالجدول (5) والذي من خلاله يمكن ملاحظة أن هناك قيمة عالية للنسبة (S/N) بكل مستوى وبالتالي هذا يقودنا إلى التوليفة المثلى لمتغيرات اللحام والمتمثلة في (WC_2, WF_1, WT_3, HT_3).

وبتمثيل النتائج بيانياً يمكن توضيح تأثير متوسطات مستويات المتغيرات بشكل أوضح لمعرفة أيها أكثر تأثيراً على مقاومة لحام العينة للقص، فالمتغيرات ذات الفارق الكبير عن المتوسط الكلي تعطي دلالة كبيرة لمدى تأثيرها نتيجة لحدوث التغيير في مستوياتها، ومن خلال الشكل (3) الذي يوضح العلاقة بين متوسطات مستويات المتغيرات للعينات ونتائج تحليل (S/N) وذلك بالمقارنة مع المتوسط الكلي لمستويات العوامل (S/N)، نلاحظ أن زمن اللحام ومستوياته هو الأكبر في حين نجد أن مستويات زمن التثبيت الأقل تأثيرا

جدول (5) نتائج تحليل المتوسطات للنسبة (S/N) لمستويات المتغيرات المستهدفة بالدراسة علي مقاومة اللحام للقص

العامل/المستويات	التجارب الداخل فيها المستوى الأول	التجارب الداخل فيها المستوى الثاني	التجارب الداخل فيها المستوى الثالث	المتوسط
شدة تيار اللحام (W C) "Amp"	(1,2,3) 46.91	(4,5,6) 46.94	(7,8,9) 46.82	46.89
قوة اللحام/الضغط (W F) "N/mm^2"	(1,4,7) 47.07	(2,5,8) 46.83	(3,6,9) 46.76	
زمن اللحام (W T) "Cycle"	(1,6,8) 46.72	(2,4,9) 46.79	(3,5,7) 47.15	
زمن التثبيت "التبريد" (H T) "Cycle"	(1,5,9) 46.84	(2,6,7) 46.91	(3,4,8) 46.92	

على مقاومة القص.



2.4. نتائج تحليل المتغيرات "ANOVA":

تهدف دراسة (ANOVA) بشكل أساسي إلى التحقق من المتغيرات المصممة بحيث تبين أي من هذه المتغيرات ذات أهمية وتأثير كبير على مخرجات العملية. هذا التحليل يكون مقترنا دائما باختبار(F) وهي طريقة إحصائية تستخدم لاختبار الفروق بين تباين العينة "Sample Variance"، وبناء عليه يتم معرفة أهمية تأثير المتغير من عدمه «Significant / Insignificant"، ويتم ذلك بحساب قيمة «F" للمتغير وذلك بقسمة متوسط مجموع مربعاته على متوسط مربعات الخطأ ومقارنة الناتج مع قيمة "F_{table}" والتي يتم الحصول عليها من جداول "F" والتي لها درجات ثقة (90 ٪، 95 ٪، 99 ٪)، "الثقة بالمفهوم

الإحصائي تعني نسبة الثقة في عدم وجود خطأ في النتائج" [9]، بواسطة درجات الحرية للمتغير «صف» ودرجات الحرية للخطأ «عمود».

بعد استخدام معادلات تحليل المتغيرات «ANOVA" لحساب درجات الحرية «D.O.F" ومجموع مربعات المتغيرات «SS_F" ومتوسط مجموع مربعات المتغيرات «M.S.Q"، تم حساب "F_{cal}" ومقارنتها بـ"F_{table}"والتي تم الحصول عليها من جدول «F" بدرجة ثقة (90 ٪) [10]، وذلك باستخدام درجة الحرية للمتغير ودرجة الحرية للخطأ، كما تم أيضاً حساب نسبة مشاركة كل متغير في العملية «٪ P" كما موضح بالجدول (6). من خلال تحليل (ANOVA)، من بين المتغيرات الأربعة التي تتحكم في قيم مقاومة القص نجد أن زمن اللحام وقوة اللحام هما المتغيران ذات التأثير المهم حيث إن نسبة مشاركتهما تصل الى (68.2 ٪) مع الأولوية في التأثير الأكبر لزمن اللحام حيث يصنف أولا، في حين تتضاءل وتقل أهمية كل من التيار وزمن التثبيت.

من الممكن أن نعزو أهمية زمن اللحام للعلاقة الوطيدة بكمية الحرارة الكلية الناتجة من العملية فزمن اللحام الغير كافي يقلل من إمكانية تولد الحرارة الناتجة، مما يؤدي إلى عدم انصهار منطقة وصلة اللحام بالشكل الكافي والنتيجة مقاومة قص ضعيفة للوصلة، والعكس عند زيادة الزمن عن المطلوب يسبب في لحام سيء نتيجة لاحتراق السطحين نتيجة للحرارة العالية والتي قد تؤدي أيضا إلى تطاير المادة المنصهرة مما يقلل من المساحة المقطعية لوصلة اللحام كما وأن المناطق المتأثرة بالحرارة تتمدد بالمعدن لمساحات أكبر. أما بالنسبة لقوة اللحام والمتولدة من ضغط رؤوس الالكترودات على منطقة اللحام، فترتبط بشكل كبير بمعدل التيار المار خلال نقطة اللحام ولها تأثير كبير في تداخل جزيئات معدن اللحام عند نقط اللحام بالتالي كلما زاد التداخل زادت مقاومة الوصلة للقص. ولكن القوة العالية قد تؤدي إلى متطلبات زائدة للتيار وتشوه لراس الالكترود وزيادة الفجوات على السطح، أما القوة الغير كافية فيعني بالتأكيد وصلة ضعيفة حيث إن مساحة وصلة اللحام ستقل [8]. إذا الوصول إلى القيم المثلى لهذين المتغيرين يعتبر أمرا جوهريا لتحسين مقاومة القص بشكل أساسي.

«جدول (6) نتائج تحليل المتغيرات «ANOVA

% P	Influence	F_{table}	F_{cal}	M.S.Q	SS	D.O.F	العامل
3.42	غير مؤثر	3.11	0.5	16.10	32.20	2	WC
22.74	مؤثر	3.11	3.36	107.18	214.35	2	WF
45.46	مؤثر	3.11	6.72	214.25	428.50	2	WT
1.32	غير مؤثر	3.11	0.20	6.23	12.46	2	HT
				31.88	255.04	8	الخطاء
				375.64	942.55		المجموع

3.4. التجارب التحققية:

بمقارنة التوليفة المثلى لمتغيرات اللحام والمتمثلة في ($WC_2 WF_1 WT_3 HT_3$) بمصفوفة التعامد الموضحة بالجدول رقم (4)، ففي حالة ما إذا كانت هناك قيم مناظرة بالجدول لا نحتاج عند ذلك إلى أي تجارب تحققية ولكن في حالتنا هذه ونظرا لعدم وجود هذا الانطباق، فان الأمر يتطلب اجراء بعض التجارب التحققية باستخدام مستويات اللحام المتحصل عليها عن طريق تحليل المتوسطات (S/N) لمستويات العوامل.

الخطوة الأخيرة الآن تتعلق بالتنبؤ والتحقق من التحسن في خصائص الأداء. النسبة (S/N) المتوقعة والتي منها تحسب مقاومة القص المتوقع الحصول عليها، باستخدام مستويات متغيرات اللحام المثلى يتحصل عليه باستخدام العلاقة التالية [6]:

$$(S/N)_{predicted} = (S/N)_m + \sum_{i=1}^{N}\left((S/N)_i - (S/N)_m\right) \qquad (3)$$

حيث $(S/N)_m$ هي المتوسط الكلي للنسبة (S/N) ، اما $(S/N)_i$ فهي متوسط النسبة (S/N) عند المستوى الأمثل، و(N) عدد متغيرات اللحام المؤثرة في الأداء.

ولإجراء التحقق المطلوب، أجريت تجارب عملية جديدة باستخدام مستويات متغيرات اللحام المثلى المتحصل عليها ($WC_2 WF_1 WT_3 HT_3$) بغرض قياس مقاومة القص الحقيقية عند هذه المستويات. الجدول رقم (7) يوضح المقارنة بين النتائج المتحصل عليها لمقاومة القص المتوقعة وتلك الحقيقية المتحصل عليها باستخدام المتغيرات المثلى، ويلاحظ

من الجدول الفارق الصغير مابين القيم الحقيقية المتحصل عليها عمليا وتلك المتوقعة حيث إن الفارق لا يتعدى (1.4 ٪) وهذا يوضح التحسن الكبير في مقاومة القص عند الاعتماد على تقنية تاقوشي في إيجاد المستويات المثلى للمتغيرات قيد الدراسة.

جدول (7) نتائج التجارب التحققية

	المتغيرات المثلى للعملية		النسبة المئوية للتحسن في مقاومة القص
	المتوقعة	التجربة العملية	
المستوى	$WC_2WF_1WT_3HT_3$	$WC_2WF_1WT_3HT_3$	
مقاومة القص	234.69	237.90	1.4
النسبة S/N	47.41	-	

4. الخلاصة:

ركز هذا البحث على دراسة تأثير بعض متغيرات لحام النقطة على مقاومة القص الناتجة للمعدن الملحوم بهدف الوصول إلى تحسين ظروف عملية اللحام الأمر الذي ينعكس بالتالي على جودة وصلة اللحام الناتجة. اعتمدت في هذه الدراسة تقنية تاقوشي والتي بناء عليها تم تقسيم المتغيرات قيد الدراسة إلى مستويات أجريت لها وفقا لهذه التقنية وحسب منهجية محددة التجارب العملية وعمليات التحليل اللاحقة.

مستوى مشاركة وأهمية متغيرات اللحام على مقاومة القص تم تحديده باستخدام (ANOVA) والتي من خلاله تبين أن المتغيرات الأكثر تأثيرا على مقاومة القص هما على التوالي زمن اللحام وقوة اللحام، في حين أن كلاً من التيار وزمن التثبيت/التبريد تعتبر متغيرات أقل فاعلية. بل إن النتائج بينت أن أهمية تأثير زمن اللحام على مقاومة القص تصل إلى ضعف تأثير المتغير الثاني في الترتيب ألا وهو قوة اللحام.

التوليفة المثلى لمتغيرات اللحام المختارة والمتحصل عليها من تحليل النسبة (signal - to - noise (S/N)) والتي تعطي أعلى مقاومة قص لوصلة اللحام هي ($WC_2WF_1WT_3HT_3$) وبقيم :

شدة تيار اللحام (W. C = 9500 .Amp)

قوة اللحام/الضغط (W. F = 9 N/mm^2)

زمن اللحام (W. T = 11 Cycle)

زمن التثبيت "التبريد"= Cycle 3.

النتائج التجريبية المجراة تبعا للمتغيرات المختارة وفقا لطريقة تاقوشى تبين مدى صحة النتائج المتحصل عليها ومدى قدرة هذه التقنية على تعزيز وتحسين جودة اللحام وتحقيق الاستفادة المثلى من متغيرات اللحام في عمليات لحام النقطة.

المراجع:

[1] Aslanlar، S.، et al. «Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding.» Materials & Design 29.7 (2008): 1427 - 1431.

[2] Cary، H.B.، «Modern Welding Technology». 3rd ed. Prentice - Hall، Upper Saddle River، NJ (1994).

[3] Miller. «Handbook For Resistance Spot Welding». 003 335D، (2012).

[4] Lin، S - H.، et al. "A general failure criterion for spot welds under combined loading conditions." Inter. J. of Solids and Structures 40.21 (2003): 5539 - 5564.

[5] Majid H. A. «Modeling of Arc Metal Welding Process of Low Carbon Steel (304)». Eng. & Tech. Journal ،32.3، (2014). Part (A): 643 - 652.

[6] Manoj R. and Vishal A. "Optimization Of Spot Welding Process Parameteres For Maximum Tensile Strength"، Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.3.4، (2014). 506 - 517.

[7] Zhou، M.، H. Zhang، and S. J. Hu. "Relationships between quality and attributes of spot welds." WELDING JOURNAL - NEW YORK - 82.4 (2003).72 - S.

[8] Bračun D et aL. «Application of Contemporary Non - Destructive Testing in Engineering». The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non - Destructive Testing September 1 - 3، (2005). Portoroغ، Slovenia.

[9] Ross P. J. "Taguchi Techniques for Quality Engineering". 2nd Ed. Tata McGraw Hill. (2005).