لحام المونة للكرافيت / كرافيت
بأستخدام سبيكة الحشو الفعالة نحاس-تيتانيوم

د.فاضل عباس هاشم جلال عزيز يوسف رائد كاظم سالم
جامعة ذي قار / كلية الهندسة المعهد التقني /كركوك الكلية التقنية / بغداد
قسم الهندسة الميكانيكية

الخلاصة:
تم أجراء أكثر من خمسة عشر تجربة لحام مونة (Brazing) لوصلة تناكبية (Butt Joint) للكرافيت / كرافيت بأستخدام سبيكة حشو فعالة (Active Brazing Alloy) (ABA) مكونة من النحاس Cu والتيتانيوم Ti وبنسب وزنية للتيتانيوم من (2wt % إلى 50wt %) . حيث تم التأكد من حدوث عملية اللحام عن طريق الفحص المجهري لمنطقة الربط وكذلك أطوار الربط عند الحد الفاصل (Interface Region) بين المونه الفعالة والكرافيت بأستخدام حيود الأشعة السينية XRD (X-Ray Diffraction) وأخيرا تم أجراء الفحص الميكانيكي للوصلات ثنائية التناكب (Double Brazed Joints) وباستخدام جميع أنواع سبائك الحشو عن طريق أجراء تجارب القص المزدوج لتلك العينات (Double –Brazed Shear Test) DBST حيث اتضح لنا أن العينات الملحومة بسبيكة حشو ذات نسبة وزنية من التيتانيوم مساوية إلى اقل من 20wt% لا تعطي متانة ربط ملائمة بينما العينات الملحومة بسبيكة حشو ذات نسبة وزنية من التيتانيوم بحدود 40 wt % فأنها تعطي أعلى أجهاد قص (Shear Stress) بحدود 14MPa .

المقدمة

تم أجراء هذا البحث على أساس مفاده انه هنالك نقص في المعلومات حول عملية ربط ولحام الكرافيت / الكرافيت بطرائق اللحام المختلفة [١،٢،٣] حيث اعتمدت تلك البحوث عند التطرق إلى لحام الكرافيت على الباحثين دونلي وسلوتر [٤] وفوكس – سلوتر [٥] والتي بدأت جهودهم منذ عام ١٩٦٢ ولغاية العام ١٩٦٤ . حيث بينت هذه البحوث في نشرها للمعلومات فقط صور عامة لعينات الربط وجداول توضح متانة الربط ولم تتطرق إلى آلية الربط من حيث الصور المجهرية والأطوار المسؤولة عن عملية الربط . ولكن بدأت أول نظرية لعملية الربط للكرافيت بالمونة Brazing من خلال دونلي – فوكس – سلوتر واصطلح على تلك النظرية بنظرية الربط للكرافيت بطريقة اللحام بالمونة باستخدام سبائك حشو فعالة (Active Filler- Metal Alloys Theory) . وبقيت هذه النظرية الوحيدة الى أن نشر اوهومورا- يوشيدا [٦] في العام ١٩٨٠بحثا حيث اعتمدت نظريتهما على انحلال وترسيب عنصر معين كالكاربون بين جانبي وصلة اللحام وقد بدأت في ذلك العام في ربط الفولاذ المختلف ولكنهم في عام ١٩٩٤ [٧] نشرا الباحثين اوهومورا و يوشيدا –كاو شيري ويوشيموتو بحثا استخدم النظرية الثانية في ربط الكرافيت وذلك بوضع شريحة (ذات سمك قليل جداً 0.15 ملم) من الفولاذ الواطئ الكاربون في وسط الحشو بحيث يحيط بجانبي الشريحة النحاس ثم يقوم ذلك الحشو بربط جانبي الكرافيت. حيث يعد النحاس الوسط لنمو ومرور الأعمدة columnarالممتدة من الحديد إلى الكرافيت وتكوينها مركبات معدنية كاربيدية تؤدي بالنهاية إلى تكوين الرابطة. ثم أعيد هذا العمل ولكن بظروف

مغايرة من قبل الباحث حيدر [٨] وقد وصل إلى أجهاد قص لتلك الوصلة بحدود (11MPa.) . من هنا بدأنا بالبحث لأجراء عمليات ربط للكرافيت باستعمال النظرية الأولى أي نظرية المونة الفعالة .

المواد وطرق العمل

١. **المعدن الأساس Base Metal**

استخدم في هذا البحث قطع مكعبة من الكرافيت (10*14*14) ملم نوعه (Aller-12 Allcatel) من شركة الكتيل الفرنسية فيه نسبة من النحاس .

٢. **سبائك الحشو الفعالة ABA(Active Brazing Alloy)**

لصعوبة تصنيع سبائك الحشو الفعالة (المحتوية على التيتانيوم Ti) وذلك لفعاليتها مع الأوكسجين . لذلك يلجأ الباحثون إلى استخدام الحشو الفعال على شكل عجينة (Paste) حيث يتم مزج مسحوق من النحاس الذي يعد الأساس ومسحوق من التيتانيوم وحسب النسب الوزنية وبدقة عالية (دقة الوزن ٠.٠٠١ غرام) مع وجود مادة لزجة (الكليسرين) لتكوين عجينة من تلك المساحيق (Paste Filler Metal) وزن هذه العجينة بدون المادة اللزجة يساوي ٠.٢ غرام . مواصفات هذه المساحيق مبينة في الجدول رقم ١ . أما الجدول رقم ٢ فيتضمن الأنواع المختلفة من عجينة تلك المساحيق المستخدمة كحشو في هذا البحث .

٣. **وصلات اللحام Welding Joints**

تم تقطيع الكرافيت وصولاً إلى شبه مكعب (سهولة تقطيع الكرافيت) ثم يتم تنعيم الحافات بأستخدام المبارد وأوراق التنعيم وصولاً إلى الأبعاد الملائمة (10*14*14 ملم) وبدقة± ٠.١ ملم وتكون الأسطح المراد لحامه بنعومه(N4). اما وصلات اللحام المطلوبة فهي كما في الشكل ١ ، حيث أن الشكل (١- أ) تمثل وصلة لحام تناكبية أحادية لدراسة التركيب المجهري اما الشكل (١- ب) فأنها تستخدم لدراسة المواصفات الميكانيكية لوصلة اللحام وذلك بحساب أجهاد القص للمساحتين (١٤*١٤) ملم حيث يقسم الإجهاد عليهما .

الجدول ١: مواصفات المساحيق المستخدمة في الحشوة

نوع مادة المسحوق	الكثافة النظرية g/cm^3	درجة الانصهار ^0c	حجم الجسيمات التقريبي	المصدر
النحاس	٨.٩٣	١٠٨٤.٣	< ٦٣	Merck Company
التيتانيوم	٤.٥٠	١٨٠٠	< ١٥٠	Fluka Company

الجدول ٢: أنواع الحشوات الفعالة المستخدمة في هذا البحث

نوع الحشوة	النسبة الوزنية من النحاس	النسبة الوزنية من التيتانيوم	درجة حرارة اللحام
ABA1	98 %	2 %	١١٠٠
ABA2	95 %	5 %	١١٠٠
ABA3	90 %	10 %	1050
ABA4	85 %	15 %	1050
ABA5	80 %	20 %	1050
ABA6	75 %	25 %	1000
ABA7	70 %	30 %	1000
ABA8	60 %	40 %	1000
ABA9	50 %	50 %	1000

٤. **الفرن المستخدم Furnace**

تم استخدام فرن المعاملات الحرارية (MuffleFurnace) في عمليات اللحام حيث وضعت العينات والتي هي على نوعين كما موضح في الشكل (١) داخل حاوية من الفولاذ المقاوم للصداء كما في الشكل (٢) ، وتكون هذه الحاوية محكمة الغلق وفيها فتحتان ملحومتان بأنبوبين من نفس المعدن احدهما لدخول الغاز الخامل والثانية لخروج ذلك الغاز لخارج الفرن ، وبهذا النظام يتم غمر العينات المجمعة بالغاز الخامل (الاركون ذو نقاوة بحدود ٩٩%). تستخدم مثبتات لغرض المحافظة على أبعاد وصلة اللحام مجمعة مع الحشوات وكما في الشكل (٣) .

اما الدورة الحرارية فهي كما يأتي : تم رفع درجة حرارة الفرن مع الحاوية التي بداخلها العينات المجمعة مع المثبتات إلى درجة حرارة تقريباً ٣٠٠٠c وعندها تم ضخ غاز الاركون واستمر الضخ مع رفع درجة الحرارة وصولاً إلى درجة حرارة اللحام . ثم البقاء عند هذه الدرجة بحدود عشرة دقائق ، ثم خفضت درجة الحرارة الى أن وصلت إلى ٣٠٠٠c تم عندها قطع ضخ الاركون . وبقيت العينات مجمعه داخل الحاوية إلى إن يبرد الفرن إلى درجة حرارة الغرفة وعندها تم فتح الفرن والحاوية وإخراج العينات الملحومة، يوضح الشكل (٤) الفرن المستخدم في هذا البحث.

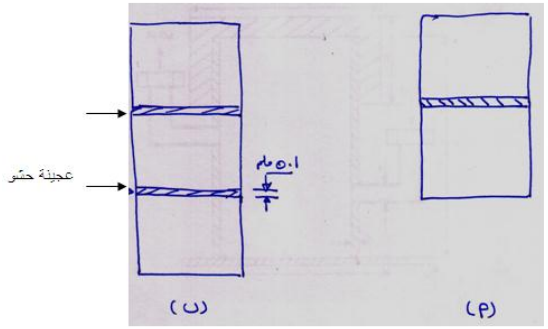
٥. تجارب اللحام Welding Experiments

تم أجراء أكثر من خمسة عشر تجربة لحام لمختلف أنواع المونة (الحشو الفعال) المستخدمة. انظر الجدول (٣) حيث تم تثبيت المتغيرات المهمة في جميع تلك التجارب وهي كالاتي :

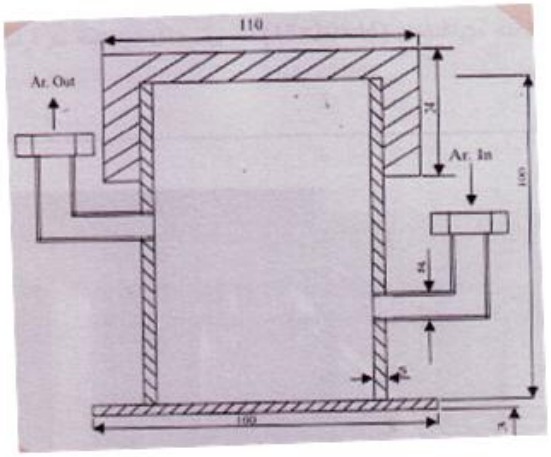
a. زمن اللحام عشرة دقائق

b. وزن عجينة الحشوة بحدود ٠.٢ غرام .

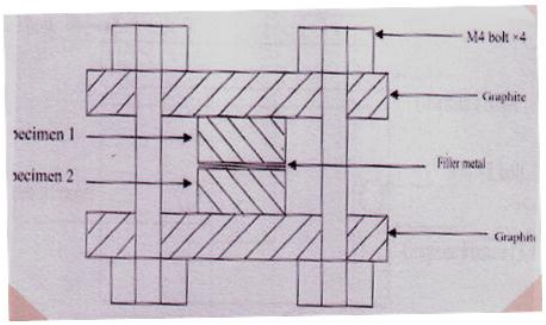
c. الوزن المستخدم في تجميع مثبت اللحام بحدود خمسون غرام (بواسطة براغي التثبيت).



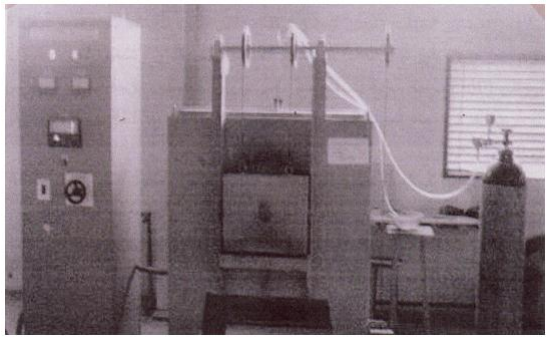
الشكل (١) : أ: وصلة لحام تناكبية (Butt Joint) تستخدم لدراسة التركيب المجهري لوصلة اللحام .
ب: وصلة لحام تناكبية ثنائية (Double Butt Joint) تستخدم لدراسة أجهاد القص لوصلة اللحام



الشكل رقم (٢) : حاوية من الفولاذ المقاوم توضع داخلها العينات الملحومة



شكل رقم (٣): المثبت المستخدم في عمليات اللحام



شكل رقم (٤) : منظومة الفرن المستخدم في البحث

الجدول ٣ : عدد التجارب التي تم إجرائها لمختلف أنواع الحشوات

رقم التجربة	نوع الحشوة	عدد التجارب
١	ABA1	١
٢	ABA2	١
٣	ABA3	١
٤	ABA4	٢
٥	ABA5	٢
٦	ABA6	٢
٧	ABA7	٢
٨	ABA8	٢
٩	ABA9	٢

فحوصات البنية المجهرية Microstructural Examinations

في الفحص المجهري للعينات التناكبية الأحادية جرت عمليات التنعيم (Grinding) بأستخدام ورق تنعيم بدرجة (١٢٠٠) ثم تمت بعدها عملية الصقل (Polishing) بأستخدام مسحوق الالومينا بحجم حبيبي (٠.٣) مايكرون mm وبعدها يتم تنظيف العينة بالماء وتجفيفها بالهواء الساخن ثم تم أجراء عملية الإظهار باستخدام المحلول (٣٠ ml HCl, 10ml FeCl3,120ml methanol) لدراسة التراكيب والأطوار التي من الممكن ملاحظتها من خلال خط اللحام حيث استخدم ثلاث تكابير (X500,X250,X100) في التكبير الأول تم مراقبة جودة خط اللحام من ناحية تبلل واتساع المونة (Wetting and Spreading) . اما التكبير الثاني فقد استخدم لمراقبة تغلل الأطوار على الخط الفاصل بين منطقة الربط والكرافيت . اما التكبير الأخير فقد استخدم في تبيان منطقة الربط وتراكيبها .

أختبار حيود الاشعة السينية X-ray Diffraction Test

بأستخدام جهاز فحص حيود الأشعة السينية XRD نوع (Philips-Pw1050 X-Ray Diffrectometer) حيث يتم فحص العينات للسطوح المكسورة في منطقة الربط بعد أن تمت تهيئة السطوح برفع الحافات الحادة وصولاً إلى خط الربط حتى تم الحصول على الأطوار التي أدت إلى حصول عملية الربط .

أختبار مقاومة القص للوصلات اللحامية المزدوجة Double Brazed Shear Test

اجري هذا الفحص لملحومات ثنائية التناكب شكل (١-ب) و للحشوات (ABA1-ABA9) وحسب الجدول (٣) تتم عملية الفحص بأستخدام ماكنة الكبس (Shematzo Universal Compression Machine,25 Tons) بأستخدام قالب مخصص لذلك كما في الشكل (٥) .

النتائج والمناقشة Result and Discussion

١. نتائج الفحص المجهري

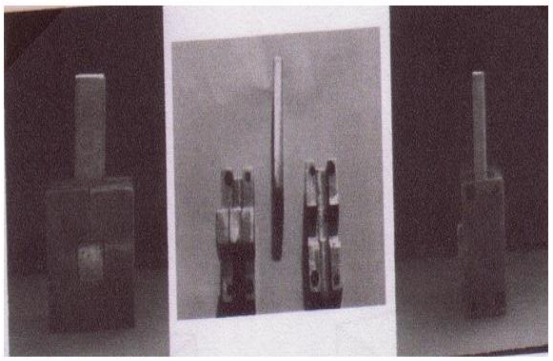
Microstructural Testing Results

في بداية العمل كان من المؤمل أجراء تجارب ناجحة لحشوات مونة فعالة ذات نسب وزنية للتيتانيوم اقل من ١٠% وذلك لتغطية الجزء الذي لم يعمل به الباحثون دونلي – فوكس – سلاوتر . حيث أنهم استخدموا مونه فعالة ١٠٠% ، اما في هذا البحث فان الحشوات المستخدمة ذات أساس غير فعال (نحاس) وكان الأساس عندهم (Moاو CrاوTi او Zr). كذلك تم في هذا البحث معرفة تأثير النسبة الوزنية للعنصر الفعال والتي هي اقل من ١٠% من على اجراء وصلة لحام جيدة (كما اشار الباحثون ميزوهورا و جماعته [٩]) .

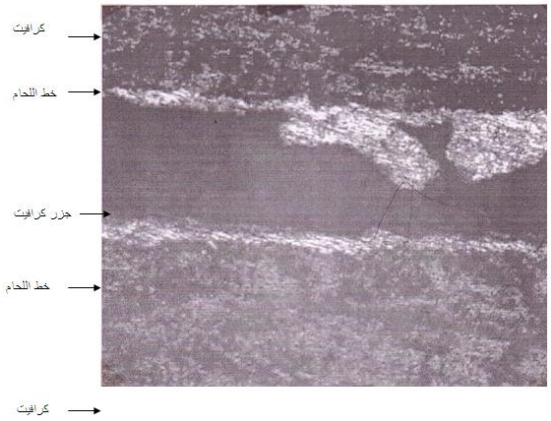
لكن بعد أجراء العديد من التجارب الأولية أتضح لنا عدم استجابة الكرافيت إلى الحشوات ذات محتوى وزني للتيتانيوم اقل من ١٠% بعدها أخذنا القرار بزيادة نسبة التيتانيوم وصولاً إلى ٥٠% كحد أقصى.

عند اجراء تجربة لحام فيها نسبة التيتانيوم الوزنية ١٥% بدأت تتضح معالم حصول خط لحام عند نطقة التلاقي (حشوة / كرافيت) كما هو واضح في الشكل (٦).

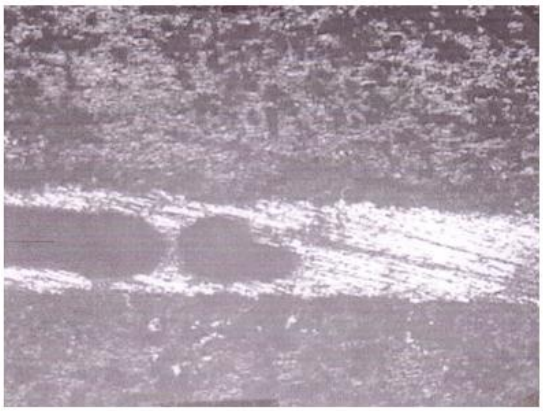
من هذا الشكل بدأت تتشكل منطقة الربط بين المونة والكرافيت وعلى جانبي وصلة اللحام . وفي حالة زيادة نسبة التيتانيوم إلى ٢٥% فأن منطقة ربط متكاملة نحصل عليها كما هو واضح من الشكل (٧)، حيث تظهر لنا تعرجات منطقة التداخل بين المونة والكرافيت على الخط الفاصل ولا توجد جزر من الكرافيت كما في الشكل السابق والناتجة عن تكسر الكرافيت في درجات الحرارة العالية (أكثر من ١٠٠٠ مئوية) ودخولها ضمن منطقة الربط كذلك تتكون منطقة الربط بشكل أكثر وضوح في حالة زيادة نسبة التيتانيوم ٣٠% -٤٠% و ٥٠% كما في الأشكال (٨)،(٩) و(١٠).



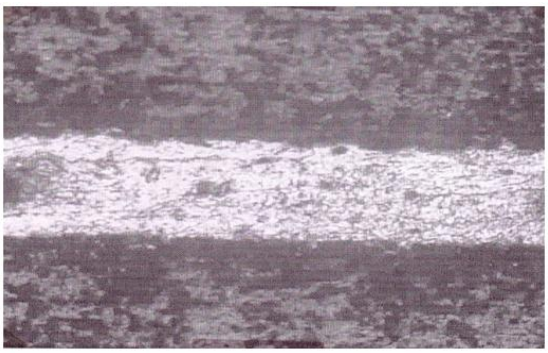
شكل (٥) : القالب المستخدم في فحص القص للملحومات ثنائية التناكب (Double Bult Joints)



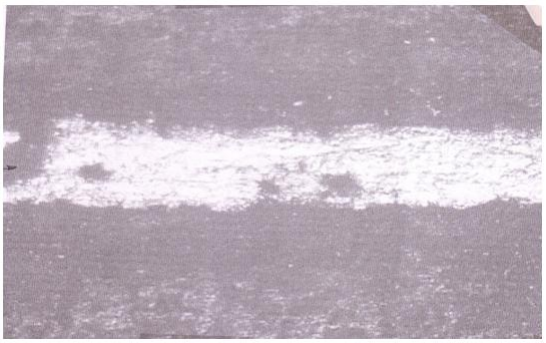
شكل (٦) : وصلة لحام كرافيت/ كرافيت مستخدم فيها حشو النسبة الوزنية للتيتانيوم ١٥% أي (٨٥ Cu15 Ti) . X150



الشكل (٧) : وصلة لحام كرافيت/ كرافيت مستخدم فيها مونة (Cu25 Ti٧٥) . ويظهر خط اللحام مع تواجد جزء من الكرافيت X 150 .



الشكل (٨) : وصلة لحام كرافيت/ كرافيت مستخدم فيها مونة (Cu30 Ti٧٠) . ويظهرفيها خط اللحام شبه متكامل مع وجود نقاط من الكرافيت X 150 .



الشكل (٩) : وصلة لحام كرافيت/ كرافيت مستخدم فيها مونة (Cu40Ti٦٠) . ويظهر فيها مناطق فيها جزر من الكرافيت X 150

الشكل (١٠) : وصلة لحام كرافيت/ كرافيت مستخدم فيها مونة (Cu50Ti٥٠) . ويظهر فيها مناطق فيها جزر من الكرافيت X 150 .

٢. آلية الربط Bonding Mechanism

أن اغلب آليات الربط في لحام المونة الفعالة (ABAW) تكون ضمن آلية موحدة وكما في الشكل (١١) . والتي تمثل تكون طورين : الطور الأول I يكون المسؤول عن عملية الربط (Bonding Phase) حيث في تلك المنطقة يتم استقطاب العنصر الفعال للتجمع وتكوين الرابطة المسؤولة عن اللحام في تلك المنطقة وبذلك فان الطور I يكون غني بالعنصر الفعال التيتانيوم .

بينما الطور II والذي يمثل ماتبقى من الحشوة الفعالة وتكون فقيرة من العنصر الفعال لذلك يطلق عليها فضلات المونة الفعالة (Lacework Phase).

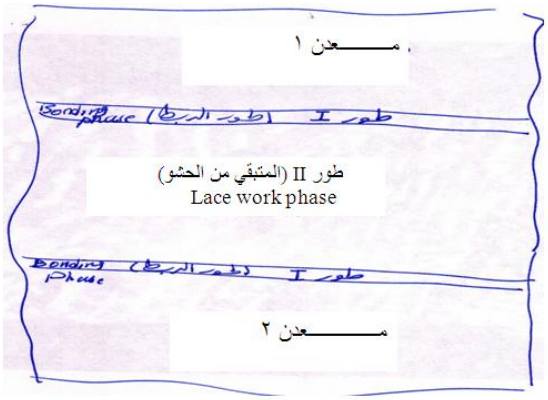
أما ماحصلنا عليه في هذا البحث وعند زيادة النسبة الوزنية للتيتانيوم فان آلية الربط مختلفة تماماً عن ماسبق ، حيث ظهر لنا طور واحد يستمر بين جانبي وصلة اللحام كرافيت / كرافيت . أي بمعنى آخر أن الحشوة تصبح كلها طور واحد مسؤول عن الربط كما هو واضح من الشكل (١٢) .

وهنا يتضح لنا عدم مغادرة العنصر الفعال إلى منطقة التلاقي أو الخط الفاصل بل أن الكاربون المكون للكرافيت هو الذي انتقل من جانبي وصلة اللحام إلى

منطقة الحشوة وكون طور واحد بينته الفحوصات بحيود الأشعة السينية (XRD) وهو طور الكاربيد للتيتانيوم كما في الشكل(١٣) و(١٤) .

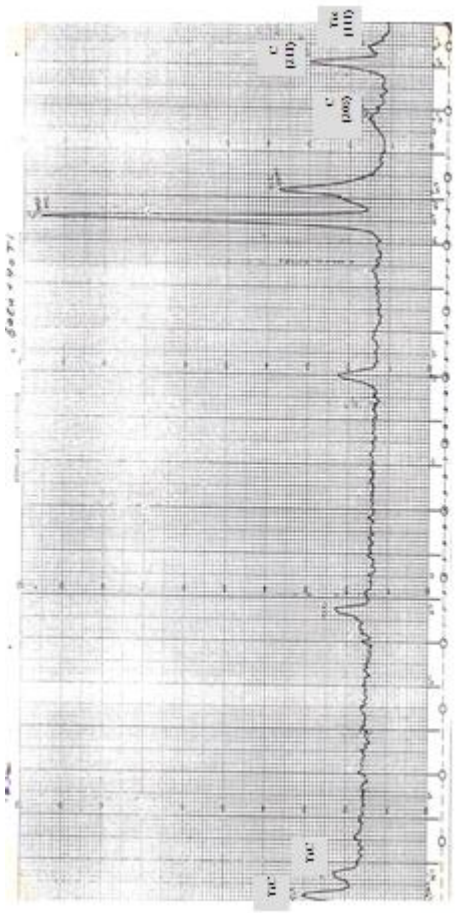
الطور الواحد I في هذة الحالة يكون على شكل أعمدة (columnar) من الكاربيدات ممتدة بين جانبي وصلة اللحام شكل (١٢) وأيضا يوضح ذلك الشكل (١٥) الذي يمثل منطقة الربط بالكامل لوصلة لحام دون أظهار مما يؤكد توازن توزيع الحشوة بمحتوياتها بين خطي اللحام .

ولتأكيد تلك الآلية تأتي فحوصات الXRD في الأشكال (١٣) و(١٤) لعينات ملحومة بحشوات ذات نسب وزنية للتيتانيوم ٤٠% و٥٠% على التوالي . حيث يظهر في تلك المخرجات ((XRD chart تكون كاربيد للتيتانيوم ((TiC والكاربون (C) وهما الأكثر تواجد في المنطقة .



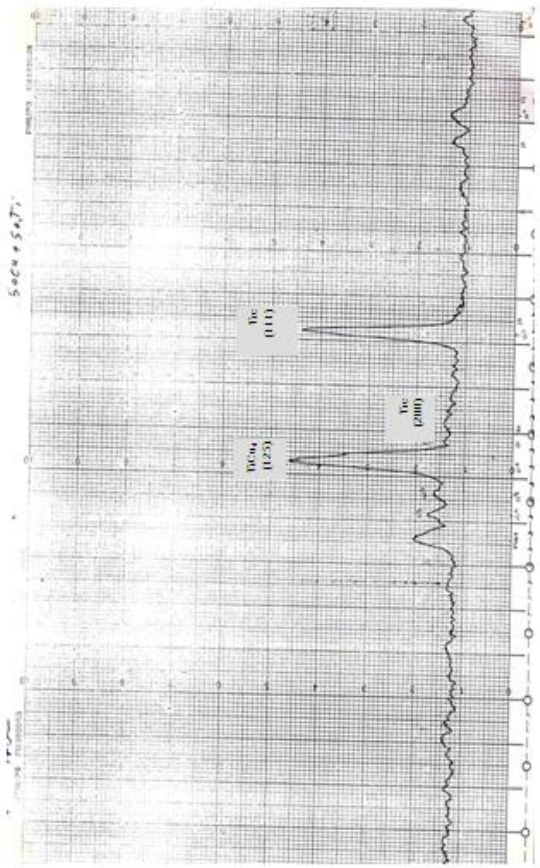
الشكل (١١) : آلية الربط في لحام المونة بأستخدام المونة الفعالة .

الشكل (١٢) : وصلة لحام كرافيت/ كرافيت مستخدم فيها مونة (Cu50Ti٥٠) . وفيها يكون طور الربط عبارة عن اعمدة ((columnar من الكاربيدات بين جانبي وصلة اللحام X 450



الشكل (١٣) : مخرج حيود الأشعة السينية لمنطقة الربط لحشوة (Cu40Ti٦٠) .

الشكل (١٥) : وصلة لحام كرافيت/ كرافيت تبين فيها توزيع عقد ومناطق الربط بشكل منتظم (دون اظهار) X450



الشكل (١٤) : مخرج حيود الاشعة السينية XRD لمنطقة الربط لحشوة (Cu50Ti٥٠) .

٣. متانة الربط Bonding Strength

لغرض اختبار متانة الربط فقد تم أجراء وصلات لحام ثنائية التناكب كرافيت / كرافيت وكانت نتائج فحص القص موضحة بالجدول رقم (٤) حيث يتضح من الجدول أن متانة أجهاد القص يكون أقل من MPa٤ لجميع وصلات اللحام التي فيها نسبة التيتانيوم في سبيكة الحشوة دون ٣٠% . اما عندما أصبحت النسبة الوزنية للتيتانيوم ٣٠% فان أجهاد القص ارتفع عن MPa٤ ووصل أقصاه عند وصلة اللحام ذات المحتوى من التيتانيوم بمقدار ٤٠% حيث وصل أجهاد القص إلى أقصاه MPa١٤.٢، ثم بدأت بالانخفاض عندما زادت النسبة الوزنية للتيتانيوم وأصبحت ٥٠ % وهذا يعطي لنا أن (كاربيد التيتانيوم) عندما زاد في تلك الوصلة أصبحت هشة بحيث أصبح إجهاد القص أكثر قليلا من MPa٦.. وبذلك تكون السبيكة ذات نسبة وزنية من التيتانيوم بحدود ٤٠ % نقطة انقلاب وبالمقارنة مع نتائج الباحث حيدر [٨] فان تلك النتيجة (١٤.٢ MPa) تعتبر موثوقة وجيدة حيث انه حصل على أعلى متانة بحدود (MPa١١.)

..

الجدول ٤: قيم أجهاد القص مختلف أنواع الحشوات المستخدمة في اللحام.

نوع حشو اللحام	أجهاد القص MPa
ABA2	0.5
ABA3	٢.٠
ABA4	٤.٠
ABA5	٣.٨
ABA6	٢.٢
ABA7	٤.٢
ABA8	١٤.٢
ABA9	٦.٥

الاستنتاجات Conclusion

مما تقدم نستطيع بيان الآتي:-

١. نستطيع أجراء عمليات اللحام بالمونة (Brazing) لوصلة لحام كرافيت / كرافيت باستخدام حشوات ذات أساس غير فعال (نحاس) .

٢. أفضل سبيكة حشو تم الحصول عليها في لحام المونة للكرافيت / كرافيت هي السبيكة ذات المحتوى الوزني للتيتانيوم بحدود ٤٠ % و ٦٠ % للنحاس وذلك لكون منطقة الربط بقيت محافظة على مطوليتها في تلك الحالة بالمقارنة مع سبيكة ذات محتوى ٥٠ % (هشة) .

٣. آلية الربط أعطت لنا تواجد طور واحد بين جانبي وصلة اللحام هو المسؤول عن الربط وهو تكون طور كاربيد التيتانيوم Ti C مع وجود جزر من الكرافيت .

٤. أجهاد القص الذي تم الحصول عليه لوصلة لحام ثنائية التناكب بحشوة ٦٠ Cu 40 Ti يعد ضمن الجو العام لاختبارات القص للحام المونه للكرافيت وكذلك السيراميك .

Abstract

More than fifteen brazed joints are tested for graphite butt joints by using active filler metal alloy (ABA) , which contained copper and titanium as active elements .Titanium weight percent ranging from 2wt% -to- 50wt.%

Bonding is observed by using optical microscopic for bonding region ,and by seeking for bonding phases at the metal / Filler interface by using XRD technique .Finally mechanical properties be concluded by using compression stress to obtaining shear stress from double butt brazed joints .The final results are , that joints which brazed with titanium content less than 20wt% are not reliable ,while that brazed by Filler metal alloy of 40wt% content of titanium give optimum shear stress of 14 MPa.

المصادر

١. **Metals Handbook " ASM,Vol.6 , Metals Park ohio.1976**

٢. **M.M. Schwartz " Metals Joining Manual " Mc Graw- Hill Book Company New York 1979.**

٣. **J.F. Lancaster " Metallurgy of Welding " George Allen & Union LT.D . , London 1980**

٤. **R.G. Donnelly & G.M. Slaughter "The Brazing of Graphite " Welding Journal Vol . 41, (No.5),1962.**

٥. **C .W.Fox & G.M Slaughter " Brazing of Ceramics " welding journal vol. 43,(No.7), 1964.**

٦. **H.Ohmure & T . Yoshida " Dissolution& Deposit of Base Metal in Dissimilar Carbon Steel Brazing " welding journal , vol .59 ,(No.10),1980.**

٧. **H.Ohmure & T . Yoshida ,K.Kawshiri , O. Yoshimoto " A Technique for Brazing Graphite / Graphite and Stainless Steel /High Carbon Steel Joints " Welding Journal , vol. 73, (No.10) 1994.**

٨. **Hayder Ibraheam Saleh " Evaluation of Graphite / Graphite Brazing " M.Sc.Thesis ,university of technology, Baghdad 2005.**

٩. **H . Mizuhara , E. Huebel , T . Oyama " High Reliability joining of Ceramic to metal " Ceramic Bulletin , vol .68 (No.9) ,1988**