جامعة دمشق
كلية العلوم التطبيقية

" تقنية الإنتاج "

لطلاب السنة الثانية

قسم الميكاترونيكس

إعـــداد

الأستاذ الدكتور المهندس

محمد علي سلامة

للعام الدراسي 2019-2020

اللحـام

تعريف اللحام: اللحام هو عملية تقانية هدفها الحصول على وصلات غير قابلة للتفكك، وذلك من خلال إيجاد ارتباط بين ذرات سطحي القطعتين المراد وصلهما. ويتم ذلك: إما بالصهر الموضعي أو الكامل لحواف القطعتين– أو بإحداث انفعالات لدنة في هذين السطحين دون تسخين– أو بالتسخين (سواء الموضعي أو الكامل للقطعتين) مع إحداث انفعالات لدنة في السطحين المتلامسين.

تصنيف أنواع اللحام: هناك سمات مختلفة لتصنيف أنواع اللحام، ولكن أكثر هذه السمات شيوعا هي: نوع الطاقة المستخدمة في اللحام– حالة المعدن في منطقة اللحام أثناء إجراء عملية اللحام. **فإذا تم التصنيف وفقا لنوع الطاقة المستخدمة،** فإن جميع أنواع اللحام تصنف إلى المجموعات التالية:

- **مجموعة طرائق اللحام الميكانيكية:** وفيها تستخدم الطاقة الميكانيكية التي تسبب انفعالات لدنة في منطقة اللحام بحيث تكون هذه الانفعالات كافية للحصول على الوصلة اللحامية. ومن هذه الطرائق: اللحام على البارد واللحام الاحتكاكي واللحام بالانفجار.
- **مجموعة طرائق اللحام الكيميائية:** وفيها تُحول الطاقة الكيميائية إلى حرارية توصل المعدن إلى حالة الانصهار دون تسليط أي ضغط خارجي على الوصلة اللحامية. ومن هذه الطرائق: اللحام الغازي بالصهر واللحام بالهيدروجين الذري.
- **مجموعة طرائق اللحام الكهربائية:** وفيها يتم تحويل الطاقة الكهربائية إلى حرارية لصهر حواف القطع المراد لحامها. ومن هذه الطرائق: اللحام بالقوس الكهربائي (اليدوي ونصف الآلي والآلي) واللحام الكهربائي الخبثي (انتشار حرارة عالية عند مرور تيار كهربائي بالخبث) واللحام بالأشعة الإلكترونية واللحام بتحريض تيار كهربائي ذي ترددات عالية واللحام بأشعة الليزر.
- **مجموعة طرائق اللحام الكهروميكانيكية:** وفيها يتم تحويل الطاقة الكهربائية إلى حرارية لتسخين المعدن إلى ما دون حالة الانصهار، يتبعها تسليط قوى ضغط خارجية لإحداث انفعالات لدنة في سطحي القطعتين لوصلهما، ومن هذه الطرائق: طريقة اللحام الكهربائي بالتماس (وتدعى أحيانا طريقة لحام المقاومة).
- **مجموعة طرق اللحام الكيميامیكانيكية:** وفيها يتم تحويل الطاقة الكيميائية إلى حرارية لتسخين حواف القطعتين المراد وصلهما إلى درجة اللحام المطلوبة (وهذه الدرجة أيضا دون درجة الانصهار)، يتبعها إحداث انفعالات لدنة في المعدن المسخن من خلال تسليط قوى ضغط خارجية على القطعتين المراد وصلهما، ومن هذه الطرائق: اللحام بالغاز والكبس.

أما إذا تم التصنيف وفقا لحالة المعدن في منطقة اللحام أثناء إجراء عملية اللحام، فإن جميع أنواع اللحام تصنف إلى مجموعتين كبيرتين، هما: **مجموعة لحام الضغط– مجموعة لحام الصهر**.

- **مجموعة لحام الضغط:** تتم عملية لحام الضغط عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة انصهار المعدن المراد لحامه، إذ بتسليط ضغوط خارجية يمكن لحام القطعتين وهما في الحالة الصلبة شريطة أن تكون هذه الضغوط كافية لإحداث انفعالات لدنة في سطحي القطعتين المراد وصلهما.
- **مجموعة لحام الصهر:** يتم لحام الصهر عادة بإحداث صهر لحواف القطع المراد لحامها، ولهذا يكون المعدن في حالة صهر في منطقة اللحام، ويتم اللحام دون تسليط قوى ضغط خارجية.

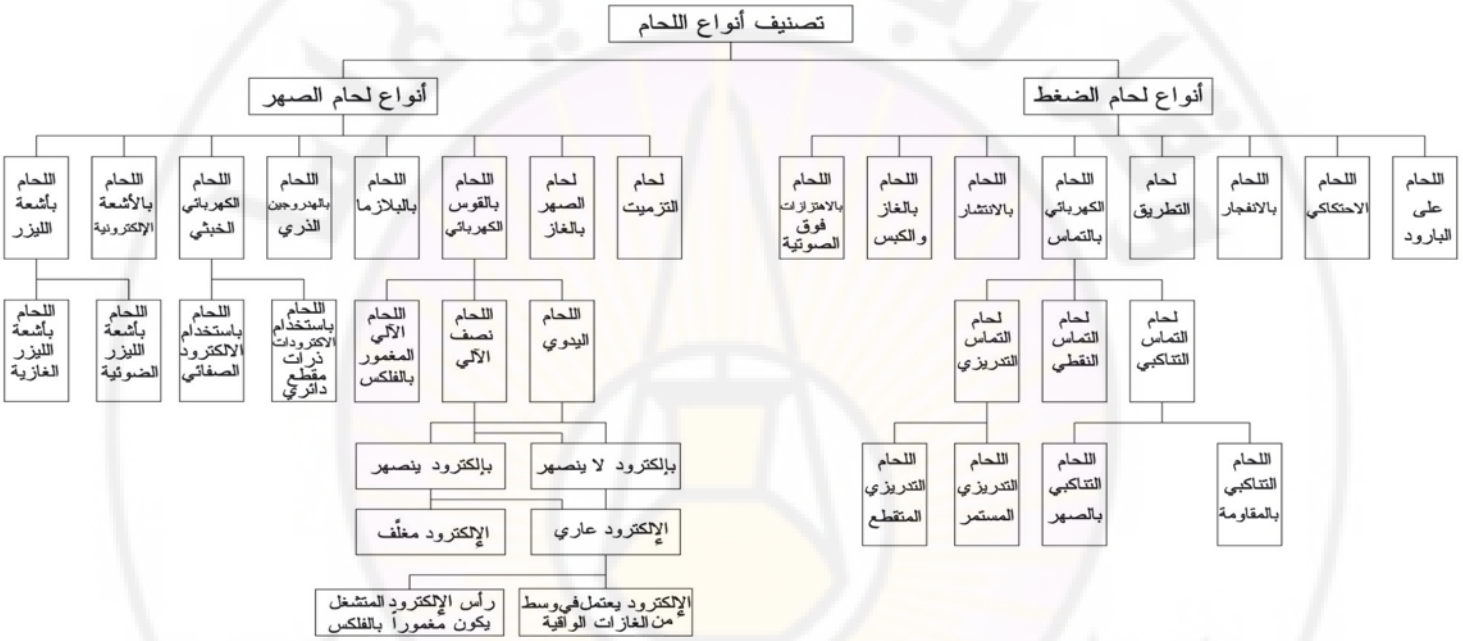
تضم مجموعة لحام الضغط الطرائق التالية: لحام التطريق– اللحام الاحتكاكي– اللحام على البارد– اللحام بالغاز والكبس– اللحام الكهربائي بالتماس (لحام المقاومة)– اللحام بالانتشار– اللحام بالانفجار– اللحام بالأمواج فوق الصوتية.

تضم مجموعة لحام الصهر الطرق التالية: لحام الثرميت– لحام الصهر بالغاز– اللحام بالقوس الكهربائي– اللحام في وسط من الغازات الواقية – اللحام بالبلازما– اللحام بالأشعة الإلكترونية – اللحام بأشعة الليزر– اللحام بالهيدروجين الذري– اللحام تحت الماء.

ونورد فيما يلي مفهوم كل طريقة من طرائق لحام الضغط وتقانتها بشكل مختصر:

لحام التطريق: يعد لحام التطريق (اللحام الحدادي) أحد طرائق لحام الضغط وهو الأسلوب االتقليدي لوصل المعادن الذي عم استخدامه في القرون السابقة، وتتلخص تقانته بتسخين منطقة الوصل للقطعتين المراد لحامهما في كور الحدادة أو في فرن مناسب إلى درجة الحرارة المطلوبة ثم توضعا فوق بعضهما وتطرقان يدويا أو آليا أو تُكبسان حتى تلتحما في وحدة واحدة. وتعتمد قوة الصدم أو الضغط اللازمة على مقدار التسخين الذي تعرضت له القطعتان. ومن المعادن التي يشيع لحامها بالتطريق الحديد الطروق والفولاذ منخفض نسب الكربون، ولكن هذه المعادن تتأكسد بسرعة إذا تعرضت للهواء الجوي بعد تسخينها إلى درجة حرارة عالية وتتكون عندئذ قشور أكسيدية على السطح، وما لم تكن هذه الأكاسيد في حالة من الميوعة تسمح بعصرها خارج منطقة اللحام، فإنها تمنع تلاحم القطعتين تلاحماً جيداً، لذلك يجب العمل على منع الأكسجين من الوصول إلى المعدن الجاري تسخينه. ولهذا الغرض تستعمل مساعدات الصهر المختلفة بهدف خفض درجة انصهار هذه الأكاسيد ومنع زيادة التأكسد. أما أساليب لحام التطريق الشائعة الاستعمال فهي: لحام التطريق باستخدام المطارق، اللحام بالقوالب، اللحام بالدرفلة. وينحصر الاختلاف الأساسي بين هذه الأساليب في الطريقة التي يولد بها الضغط اللازم لعملية اللحام.

فبينما ينشأ الضغط في لحام التطريق اليدوي عن ضربات خفيفة نسبياً، فإنه ينشأ في لحام التطريق الآلي من مطرقة تعمل بالهواء المضغوط أو بالضغط الهيدروليكي أو بالبخار أو بوسائل الضغط الآلي الأخرى، وفي حين يسلط الضغط في اللحام بالقوالب عن طريق الجزء المتحرك من القالب نرى أن اللحام بالدرفلة يتم بدفع المشغول طوليا بين درفيلي ألواح يولدان الضغط المطلوب. ويبين الشكل (2) بعض أنواع وصلات لحام التطريق .

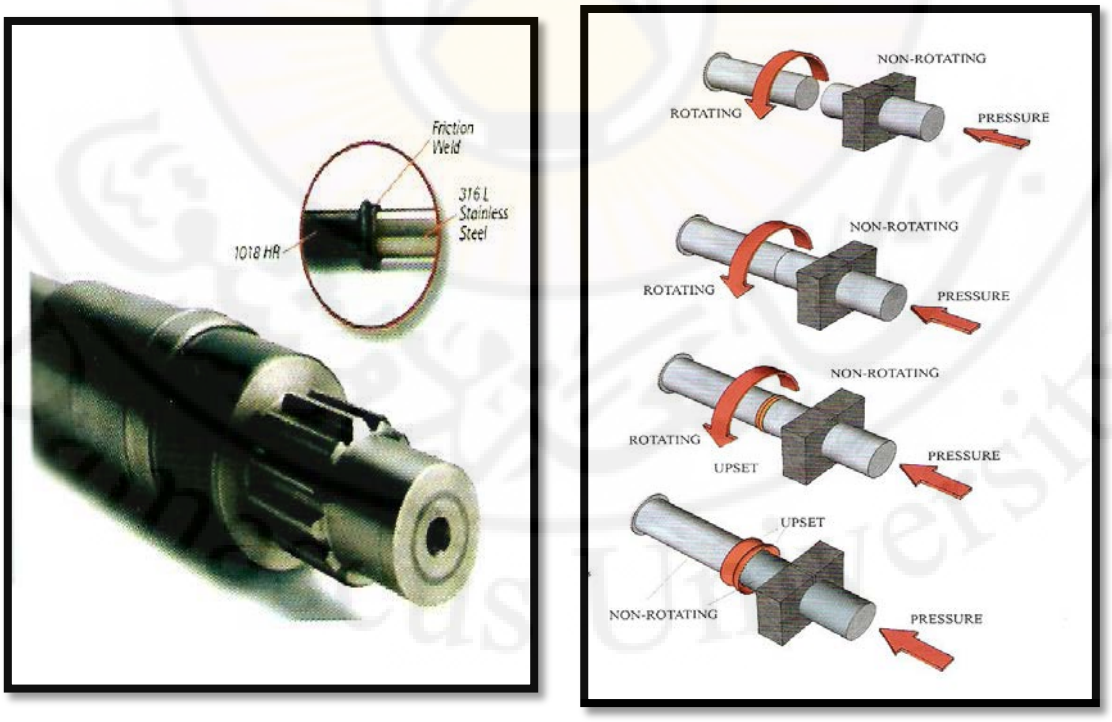


الشكل (1) : تضنيف أنواع اللحام وطرائقه



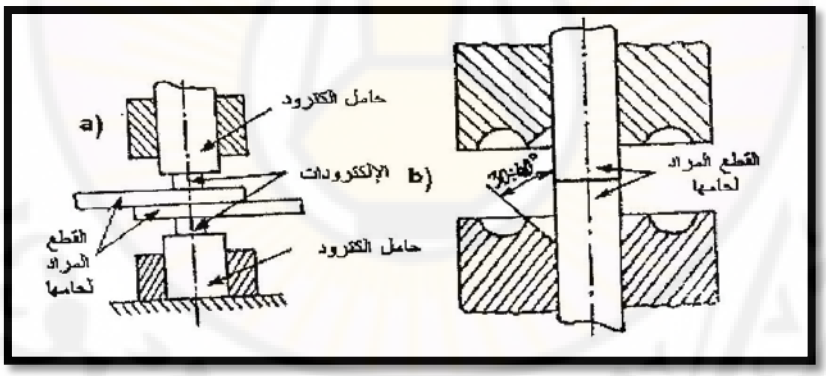
الشكل (2) : لحام التطريق

اللحام الاحتكاكي: يعد اللحام الاحتكاكي أحد طرائق لحام الضغط، ويجري تسخين حواف القطعتين المراد وصلهما بواسطة الحرارة الناشئة من احتكاك سطحي هاتي القطعتين عند تدوير إحداهما والأخرى ثابتة مع تأثير قوة ضغط محورية متزايدة عليهما. وعند بلوغ حد معين لكل من سرعة الدوران والضغط توقف الحركة بشكل مفاجئ ويبقى الضغط مسلطاً لتتم عملية اللحام نتيجة الحرارة المتولدة عن الاحتكاك والدوران. وتحسب معدلات ارتفاع درجات الحرارة بالاستعانة بمخططات وجداول معدة مسبقاً تبعاً لنوع المعدن ودرجة نعومة السطوح المرغوب في لحامها. ويستعمل اللحام الاحتكاكي بشكلٍ واسعٍ في لحام غرف الاحتراق المسبق في محركات الديزل ومرتكزات الدوران وأذرع التوصيل والاسطوانات والوصلات المحورية ومحاور القيادة الأمامية للمركبات وأعمدة الصبابات وغيرها من القطع المعدنية التي تتمتع بلدونة عالية. وبصفة عامة يقتصر اللحام الاحتكاكي على القطع ذات المقاطع الدائرية أو القريبة منها كالأشكال السداسية والثمانية، ولا يمكن باستخدام هذه الطريقة لحام المشغولات ذات المقاطع الدائرية التي لها أكثر من محور مركزي، ويجب أن تتحمل القطع المراد لحامها باللحام الاحتكاكي عزوم الفتل والقوى المحورية المرتفعة وأن تقاوم الصدمات. ويبين الشكل (3) المراحل التقانية للحصول على وصلة لحامية لقضيبين مصمتين من البرونز بطريقة اللحام الاحتكاكي.



الشكل (3): المراحل التقانية للحصول على وصلة لحامية لقضيبين مصمتين من البرونز بطريقة اللحام الاحتكاكي

اللحام على البارد: تعد هذه الطريقة إحدى طرق لحام الضغط، ويتم بهذه الطريقة الحصول على وصلات لحامية من خلال إحداث انفعالات لدنة كبيرة في سطحي القطعتين المراد وصلهما دون استخدام أي تسخين خارجي لهاتين القطعتين. وتوضع الصفيحتان 2 و 3 المراد لحامهما بشكل تراكبي أو بشكلٍ تناكبي (أنظر الشكل " 4 , a, b") وتحصران بوساطة المقبضين الذين يمنعان حدوث انتفاخ في هاتين الصفيحتين عند تعرضهما للضغط. بعد ذلك يتم ضغط الصفيحتين بوساطة رأسي الكبس، واللذين يصنعان عادة من معدن أشد قساوة من المعدن الملحوم. ولهذا يتعرض المعدن في منطقة الكبس إلى حدوث انفعالات لدنة كبيرة جداً فيه، وبالتالي يبدأ المعدن بالانسياب في هذه المنطقة وبخاصة في منطقة الفصل بين سطحي الصفيحتين. فإذا كان السطحان نظيفين تماماً من الدهون والشحوم والأوساخ، ولا يوجد عليهما سوى قشور أكسيدية، فإن هذه الأخيرة تتصدع تحت تأثير انسياب المعدن. ولهذا يحدث تلامس بين معظم نقاط السطحين وينشأ بين هذه النقاط روابط معدنية. ويتعلق مقدار الانفعالات اللدنة المراد إحداثها في سطحي الوصلة بكل من خواص المعدن الملحوم وطبيعة القشور الأكسيدية وأسلوب إحداث هذه الانفعالات. وتستخدم هذه الطريقة لوصل المعادن ذات اللدونة العالية، ويتم استعمالها للحصول على وصلات تراكبية وتناكبية للمعادن التي لا تحتاج إلى تسخين قبل عملية اللحام أو خلالها.



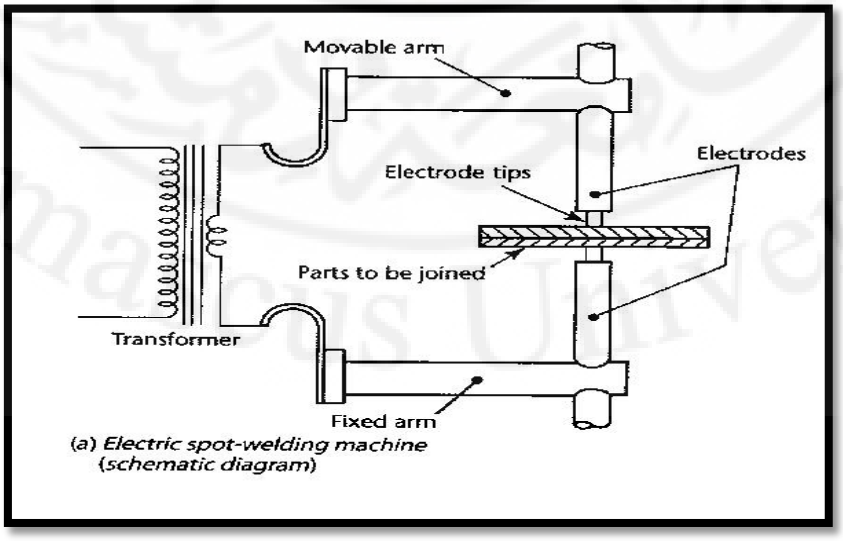
الشكل (4) : اللحام على البارد

اللحام بالغاز والكبس: يشبه مبدأ اللحام بالغاز والكبس مثيله في لحام التطريق، ولكن تسخين القطع المراد لحامها بهذه الطريقة يتم من خلال استخدام اللهب الناتج عن احتراق الغازات، حيث يمكن التحكم باستطاعة هذا اللهب وتركيزه بشكل دقيق على المناطق المراد تسخينها قبل تسليط الضغط أو الكبس عليها. ويتم التسخين بلهب الغاز إما تدريجيا مع إحداث الضغط للمنطقة المسخنة أو أن يتم تسخين المقطع المراد لحامه كاملا وتسليط الضغط في الوقت نفسه. ففي الحالة الثانية (أي تسخين كامل المقطع) يتم التسخين الجانبي لهذا المقطع أو تسخين الحواف فقط (أي أن اللهب يوجه بشكل مواز لمحور القطع المراد لحامها وعموديا على سطوح الحواف التي سيتم لحامها فيما بعد). فإذا تم التسخين من الجانب يمكن تطبيق الضغط على القطع في

الوقت الذي يستمر فيه التسخين باللهب، أما إذا سخنت الحواف، فإن اللهب يجب أن يبعد قبل تسليط الضغط على القطع. وبما أن إبعاد اللهب خلال هذا الفاصل الزمني القصير (أي حتى لحظة تسليط الضغط)، يؤدي إلى تأكسد سطوح الحواف بفعل الأكسجين الموجود في الهواء الجوي ، فإن تسخين هذه الحواف يجب أن يتم إلى حالة الانصهار، وذلك بهدف عصر المصهور السطحي المؤكسد خارج منطقة اللحام عند تسليط الضغط، وبالتالي يتم لحام سطحي الحواف النظيفين تماماً والخاليين من الأكاسيد وهما في حالتهما الصلبة ولكن مسخنا إلى درجة حرارة عالية لإجراء عملية اللحام بالضغط.

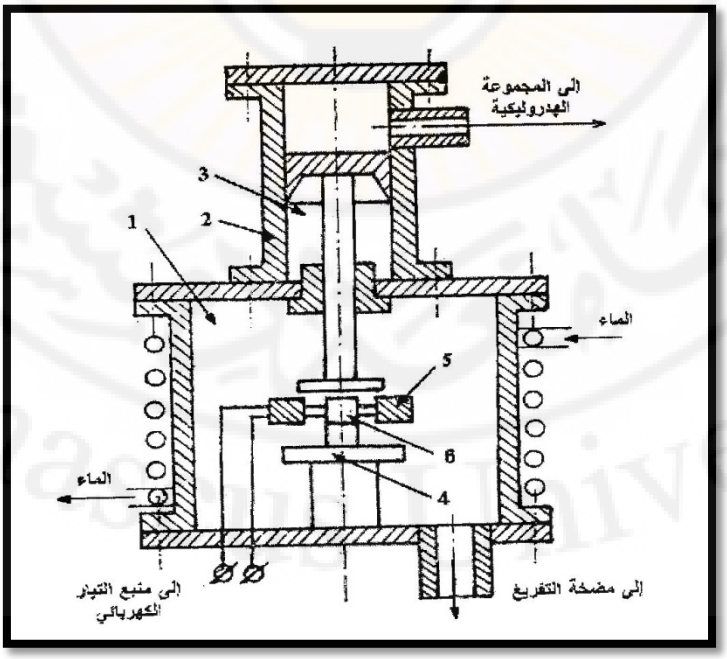
ويستخدم لهب الأكسجين– استيلين عادة لتسخين كامل المقطع، حيث تصل درجة حرارة هذا اللهب إلى 3000 درجة مئوية. وتستخدم طريقة اللحام بالغاز والكبس في إجراء اللحامات التناكبية للأنابيب ومجموعة من الوصلات في السكك الحديدية التي تكون مصنعة من الفولاذ الكربوني منخفض نسب الكربون.

اللحام الكهربائي بالتماس: يعد اللحام الكهربائي بالتماس أحد طرائق لحام الضغط، وتجري عملية اللحام من خلال تسخين القطع المراد لحامها بطريقة المقاومة الكهربائية، إذ تتولد حرارة كبيرة جداً عند مرور تيار كهربائي عبر سطوح التماس بين القطعتين. في المرحلة الأولى يرفع الضغط الميكانيكي على القطعتين لتأمين التماس بين سطحيهما، وفي المرحلة الثانية يوصل التيار ويبقى الضغط ثابتاً، وفي المرحلة الثالثة يقطع التيار وترفع قيمة الضغط، ثم يخفض الضغط تدريجياً وتترك الوصلة لتبرد (أنظر الشكل 5). تتعدد أساليب اللحام الكهربائي بالتماس، فمنها: لحام التماس التناكبي (بالمقاومة – بالصهر)، لحام التماس النقطي، لحام التماس التدريزي (المستمر– المتقطع)، ولكل من هذه الأساليب تقانته وميزاته ومجالات استخدامه المتعددة.



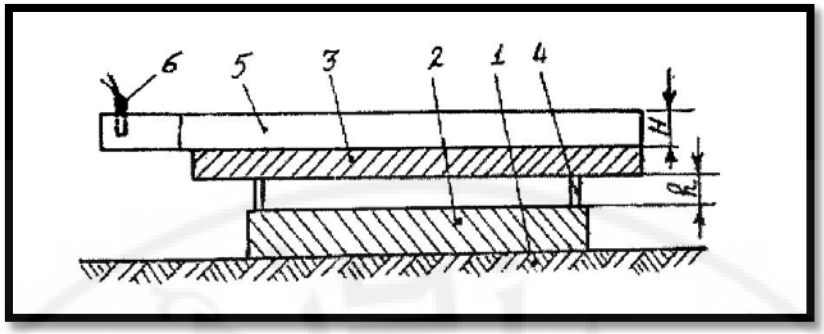
الشكل (5): اللحام الكهربائي بالتماس

اللحام بالانتشار: يُعد اللحام بالانتشار أحد طرائق لحام الضغط الحديثة والخاصة، وتتم عملية اللحام نتيجة لوجود انتشار متبادل بين ذرات السطوح المتلامسة وعند درجة حرارة مرتفعة ومؤثرة لفترة زمنية طويلة نسبياً، إضافة إلى توافر انفعالات لدنة غير كبيرة. وتتم عملية اللحام باستخدام آلات لحام خاصة، حيث توضع القطعتان في حجرة مفرغة تماماً من الهواء (مخلخلة)، ويحافظ على التخلخل في الحجرة عند تسخين القطع، وذلك بهدف حماية سطوح هذه القطع من الأكسدة والنتردة. ويتم التسخين بوساطة مولد كهربائي ذي ترددات عالية، أما تسليط الضغط اللازم فيتم بوساطة مجموعة هيدروليكية. وتبرد الوصلات اللحامية إلى درجة حرارة الغرفة داخل الحجرة المخلخلة نفسها. ويبين الشكل (6) مخططاً لآلة اللحام بالانتشار في وسط مخلخل. تُستخدم طريقة اللحام بالانتشار في لحام الوصلات الصعبة والدقيقة في بعض الأجهزة الحديثة وفي صناعة فوهات اللحام من معدن التنجستين وفي صناعة الصمامات الكيميائية والغازية. كما يُستخدم اللحام بالانتشار بشكلٍ واسعٍ في الصناعات الإلكترونية وذلك للحام بعض القطع والعقد في الأجهزة الإلكترونية. ولقد ضمنت هذه الطريقة الحصول على وصلات لحامية مقاومة للاهتزازات ودرجات الحرارة المرتفعة نسبياً مع الحفاظ على الدقة العالية في أبعاد القطع الملحومة وشكلها، ويمكن بهذه الطريقة لحام سماكات رقيقة جدا (من 3 إلى 8 ميكرونات) من معدن النيكل أو الألمنيوم مع سماكات كبيرة. وباختصار تتراوح السماكات التي يمكن لحامها بهذه الطريقة من عدة ميكرونات إلى عدة سنتيمترات.

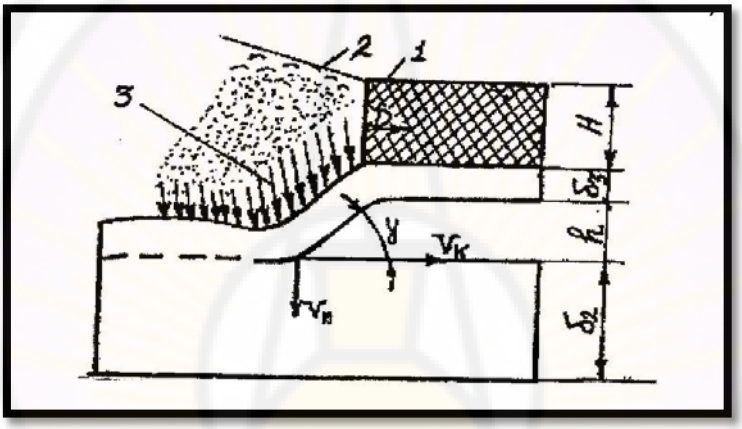


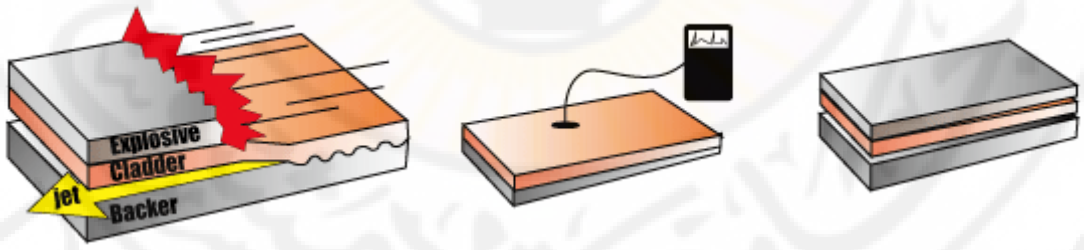
الشكل (6) : مخطط لآلة اللحام بالانتشار في وسط مخلخل: 1- الحجرة المخلخلة، 2- اسطوانة لتوصيل الضغط الهيدروليكي، 3- مكبس، 4- طاولة لتثبيت القطع المراد لحامها، 5- محرض،6- القطع المراد لحامها.

اللحام بالانفجار: يعد اللحام بالانفجار أحد طرائق لحام الضغط الحديثة والخاصة، وينسب عادةً إلى مجموعة الطرائق الميكانيكية للحام المعادن، إذ تتحول الطاقة الكيميائية (الناتجة عن تحول شحنة المادة المتفجرة إلى نواتج غازية)، تتحول إلى طاقة ميكانيكية تمنح إحدى القطعتين المراد لحامهما سرعة تحرك عالية جداً. وتُصرف هذه الطاقة الحركية (الناتجة عن تصادم القطعة المتحركة مع سطح القطعة الثابتة)، تُصرف هذه الطاقة على إحداث انفعالات لدنة مشتركة لطبقات المعدن المتماسة، مما يؤدي إلى تشكل الوصلة اللحامية، ويتحول عمل الانفعالات اللدنة إلى حرارة تسخن المعدن إلى درجات حرارة عالية. ويبين الشكل (7) مخططاً مبسطاً لطريقة اللحام بالانفجار، حيث توضع إحدى القطعتين 2 المراد لحامهما فوق القاعدة 1. وتكون القاعدة أرضية أو ترابية أو خشبية أو معدنية. وتوضع فوق القطعة 2 القطعة الأخرى 3 بحيث تكون موازية لها وتشكل معها خلوصاً (h). وتستند القطعة 3 إلى مساند تكنولوجية 4، وتوضع على سطحها العلوي شحنة المادة المتفجرة 5 ذات السماكة (H)، بينما تساوي مساحتها مساحة القطعة 3. ويتوضع الفتيل في إحدى نهايتي المادة المتفجرة. فعندما تنفجر شحنة المادة المتفجرة، فإن جبهة موجة الانفجار تنتشر عبر هذه الشحنة بسرعة D، حيث تتراوح قيم هذه السرعة بين (2000–8000 m/sec). وتحتفظ نواتج الانفجار الغازية المتشكلة خلف هذه الموجة، وخلال فترة زمنية قصيرة جداً، وطبقا لمبدأ العطالة، تحتفظ هذه النواتج بالحجم السابق للمادة المتفجرة وتوجد في هذا الحجم تحت ضغط يصل إلى (100 – 200) ألف ضغط جوي. وتنتشر بعد ذلك هذه الغازات عمودياً على السطوح الحرة للشحنة وبسرعة تساوي (0.5- 0.75 D) وتمنح المعدن الموجود تحت هذه الشحنة نبضة، إذ تكسب هذه النبضة القطعة المعدنية العلوية تسارعات عالية باتجاه القطعة الثابتة ولتصطدم بها بسرعة عالية جداً. ويتحرك الجزء المائل من هذه القطعة وراء جبهة موجة الانفجار بسرعة ($V_k = D$)، أما الجزء الموجود أمام هذه الجبهة فإنه يحافظ على وضعه الأولي، إضافةً لجزء الشحنة الذي لم يتفجر بعد (أنظر الشكل 8). يؤدي الاصطدام عالي التسارع بين الجزء المقذوف والجزء الثابت إلى ازدياد قيم الضغط بالقرب من رأس الزاوية (γ)، ويؤدي ذلك إلى حدوث سيولة في المعدن الموجود أمام رأس هذه الزاوية وظهور مركبة جانبية للسرعة، مما يجبر معدن الطبقات السطحية لكلا الجزئين المصطدمين أن يتشوه بهذه الاتجاه وبسرعة عالية. ويؤدي ذلك كله إلى تقريب السطحين من بعضهما إلى أقصى حد ممكن، لهذا تتحطم الأكاسيد والأوساخ السطحية الأخرى وتتجمع في منطقة معينة، حيث تُجرف خارج رأس الزاوية ويتم الالتحام بين السطحين. تتعلق الآفاق المستقبلية ومجالات استخدام اللحام بالانفجار بمقدرة هذه الطريقة على تكوين وصلات لحامية متينة وهي في حالتها الصلبة، كما تتعلق بسرعة إجراء العملية اللحامية وعلى سطوح كبيرة جداً، فمثلا يمكن إجراء وصلات لحامية تصل مساحة سطوحها إلى (15–20) متراً مربعاً.



الشكل (7) : مخطط اللحام بالانفجار: 1- القاعدة، 2 و 3 – القطع المراد لحامها، 4- مساند تكنولوجية، 5- شحنة المادة المتفجرة، 6- الفتيل.

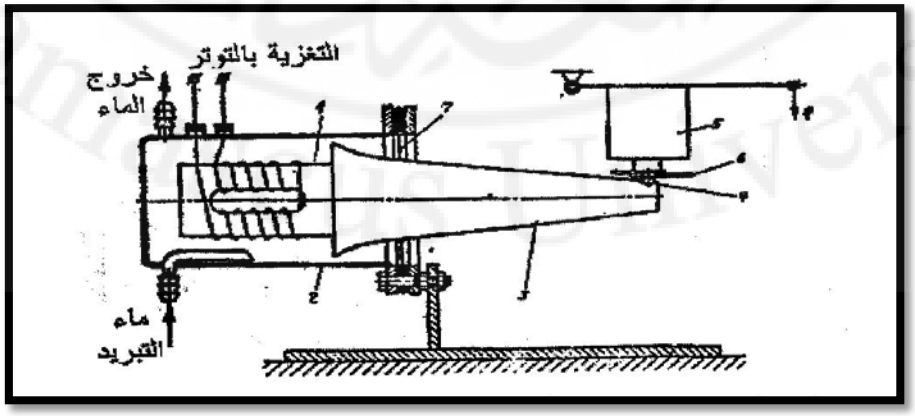




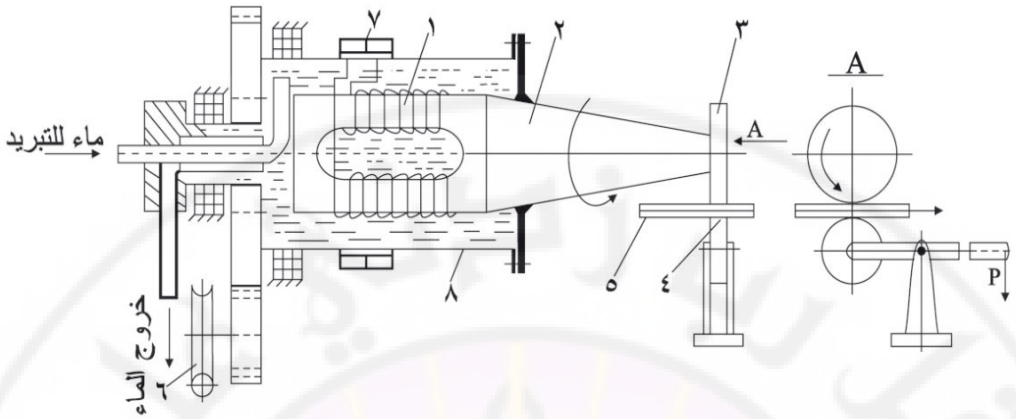
الشكل (8) : مخطط عملية اللحام بالانفجار بعد استقرارها: 1- جبهة موجة الانفجار، 2- جبهة تطاير نواتج انفجار المادة المتفجرة، 3- جبهة موجة تفريغ الانفجار

اللحام بالأمواج فوق الصوتية: تستخدم الأمواج فوق الصوتية في اللحام لأغراض مختلفة، إذ يمكن بتأثير هذه الأمواج في حوض اللحام المصهور (أثناء تبلوره) يمكن تحسين الخواص الميكانيكية للوصلة اللحامية، وذلك من خلال تصغير حجم حبيبات معدن الدرزة اللحامية وانطلاق الغازات من هذه الدرزة بشكلٍ أفضل. ويمكن أن تكون الأمواج فوق الصوتية مصدراً

للطاقة، وذلك بهدف إجراء وصلات لحامية نقطية أو على شكل درزات، حيث تستطيع هذه الأمواج أن تكسر القشور الطبيعية والمصطنعة مما يسمح باستخدام هذه الطريقة في لحام المعادن التي تعلو سطحها أكاسيد أو طبقة دهان ...أو غيرها. وتستخدم هذه الطريقة في مجال الصناعات الإلكترونية بشكلٍ واسع، وتلقى تطوراً سريعاً في مجال الصناعات البلاستيكية، إذ يمكن باستخدامها الحصول على وصلات بلاستيكية عالية الجودة، مع العلم أن عملية لحام المواد البلاستيكية بطرائق لحام أخرى تكون صعبة وأحياناً كثيرة غير ممكنة. وتكون الوصلة الناتجة عن اللحام بالأمواج فوق الصوتية هي حصيلة تأثير مشترك لاهتزازات ميكانيكية ذات ترددٍ عال وقوى ضغط غير كبيرة نسبياً. وتتم عملية اللحام بالأمواج فوق الصوتية عادةً تحت تأثير مشترك لثلاثة عوامل هي: الاهتزازات ذات التردد العالي– الضغط – التأثير الحراري الذي يرافق عملية اللحام. وتتألف آلة اللحام بالأمواج فوق الصوتية من العناصر التالية: منبع تغذية بالتيار الكهربائي، جهاز تحكم، نظام اهتزاز ميكانيكي، موصل للضغط. ويقوم نظام الاهتزاز الميكانيكي بتحويل الطاقة الكهربائية إلى ميكانيكية وتوصيل هذه الأخيرة إلى منطقة اللحام وتركيز هذه الطاقة، وبالتالي الحصول على القيمة اللازمة لسرعة اهتزازات المشع. ويتألف نظام الاهتزاز (أنظر الشكل 9) من مبدل كهروميكانيكي 1 لفت عليه وشائع وُضع ضمن هيكل معدني 2 يتم تبريده بالماء، ومن محول الاهتزازات المرنة 3 ورأس لحام 4 ودعامات مجهزة بآلة ضغط 5 وقطع الوصلة اللحامية 6. ويتم تثبيت نظام الاهتزاز بوساطة زالقة 7 – أي يتم زلق النظام عليها إلى الأعلى والأسفل. ويتم باستخدام الآلة آنفة الذكر لحام نقطة أو مجموعة نقاط من الوصلة. أما في الوقت الحاضر فتتوافر مجموعة من الآلات للحام الدرزات بالأمواج فوق الصوتية. ويبين الشكل (10) رسما تخطيطيا لآلة لحام الدرزة بالأمواج فوق الصوتية، والتي يمكن أن تستعمل للحصول على درزات متشابهة على الوصلة. يتم تدوير نظام الاهتزازات في هذه الآلة بوساطة موصل خاص. وعند اللحام تضبط الوصلة بين نهاية محول دوراني للاهتزازات المرنة والمجهز على شكل بكرة علوية وبين بكرة سفلية مثبتة.



الشكل (9): رسم تخطيطي لآلة لحام النقطة بالأمواج فوق الصوتية



١ــ مبدّل كهروميكانيكي. ٢ ــ محول الاهتزازات المرنة. ٣ــ البكرة اللاحمة.

٤ــ البكرة المثبتة. ٥ ــ الوصلة اللحامية. ٦ ــ آلة الوصل.

٧ ــ مأخذ للتيار الكهربائي من مولد للاهتزازات فوق الصوتية. ٨ ــ الغطاء المعدني للمبدّل.

الشكل (10): رسم تخطيطي لآلة لحام الدرزة بالأمواج فوق الصوتية

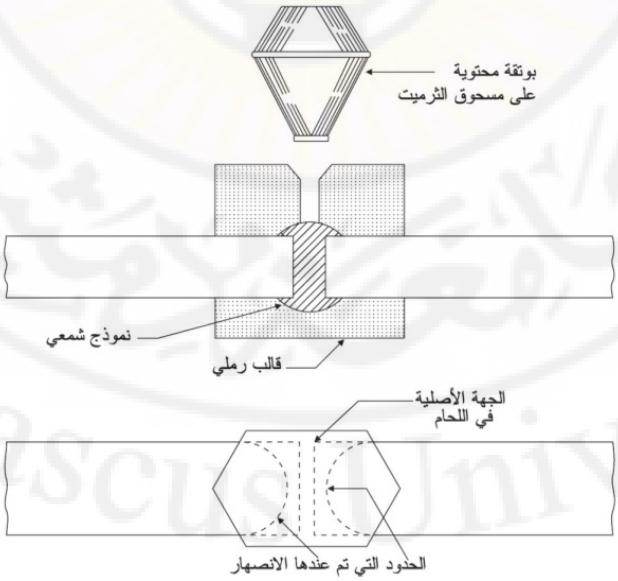
أما مفهوم كل طريقة من طرائق لحام الصهر وتقانتها بشكل مختصر فنوردها فيما يلي:

لحام الثرميت : تستخدم هذه الطريقة بصورة رئيسة للحام بعض أجزاء الآلات أو المنشآت في مواقع العمل مباشرة. ويُعد التفاعل الناشر للحرارة، والناتج عن تفاعل أكسيد الحديد مع الألمنيوم (ثرميت الألمنيوم)، يُعد هذا التفاعل هو مصدر حرارة اللحام لأن مزيج أكسيد الحديد والألمنيوم هو مزيج شديد الاحتراق، وقد لوحظ أن هذا التفاعل يستمر بمعدل سريع جداً، إذ أمكن الحصول على كميات كبيرة تصل إلى طن أو أكثر من المادة المنصهرة في تفاعل واحد استغرق زمناً لم يتجاوز 30 ثانية. وتشبه عملية لحام الثرميت عملية سباكة موضعية، فهي تقتصر على لحام القطاعات السميكة نظراً لعمليات التحضير الأولية، الأمر الذي لا يستحق وشأنه في الوصلات الصغيرة. وتبدأ عملية التحضير لوصلة اللحام بفصل الطرفين مسافة تتراوح بين (10 – 80 mm)

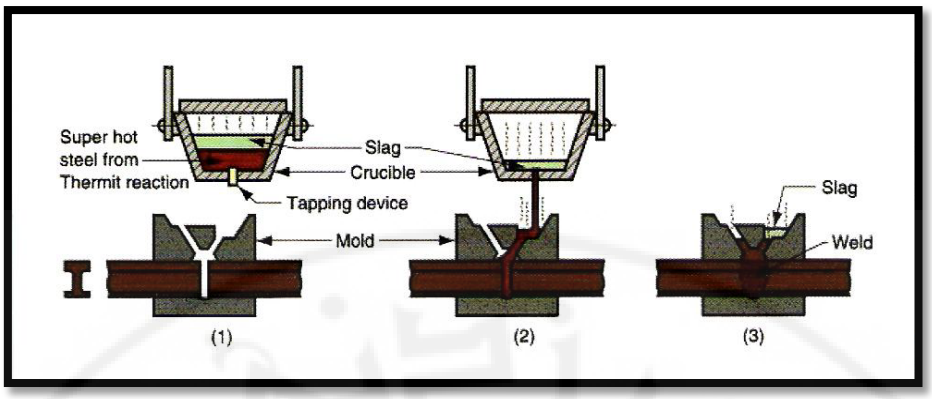
ويشكل بينهما نموذجا من الشمع حسب الشكل النهائي المرغوب لوصلة اللحام (الشكل 11)، ثم يشكل القالب الرملي حول النموذج الشمعي، كما تُشكل مصبات ومجاري وفتحة تسمح بالتسخين الأولي. يبدأ بعد ذلك التسخين من خلال الفتحة المذكورة باستخدام أي لهب حتى درجة الاحمرار، حيث ينصهر الشمع ويسيل من الفتحة المذكورة تاركا مكانه في القالب الرملي فارغاً.

ولا يكمن الهدف من التسخين الأولي في إذابة النموذج الشمعي فحسب بل يكمن أيضا في تسخين طرفي القطعتين المراد لحامهما تسخيناً مسبقاً قبل صب المعدن المنصهر في القالب، وذلك لمنع حدوث التبريد المفاجئ للوصلة اللحامية. وبعد الانتهاء من التسخين الأولي تسد الفتحة المذكورة تماماً، وفي هذه الأثناء تشحن بودقة مخروطية الشكل بمسحوق الثرميت وتوضع فوهتها السفلى فوق مصب القالب وبعيدة عنه بعدة سنتيمترات (10 – 25 cm) ويشعل المخلوط في البودقة لفترة تتراوح بين (0.5 – 1.0 min.)، حيث يتم التفاعل ويطفو الخبث المنصهر في أعلى البودقة، ويسمح بالتالي للمصهور المعدني بالخروج من فتحة أسفل البودقة فيملأ القالب المشكل بين طرفي الوصلة، حيث يترك عدة ساعات ليبرد قبل الشروع بهدم القالب الرملي من حول الوصلة، وذلك بهدف الحصول على وصلة غير هشة.

إن ما سبق ذكره إحدى الطريقتين المتميزتين للحام الثرميت وتدعى طريقة لحام الثرميت بالصهر أما الطريقة الأخرى (والتي تدعى طريقة لحام الثرميت بالضغط) فلا تستخدم فيها إلا حرارة الخبث وحرارة المعدن. فمثلا عند لحام ماسورتين معا (أنظر الشكل 12) تربط قامطات خاصة بالماسورة مع القالب، وعند صب منتجات التفاعل يتدفق الخبث إلى القالب ويغلف خارج الماسورة وداخل القالب معاً، ويتدفق المعدن المنصهر بعد الخبث ويحل محله في الجزء الأسفل، لكنه لا يزيل تغليف الخبث. ثم يقوم المعدن فائق السخونة برفع درجة حرارة الماسورة إلى درجة اللحام المطلوبة ولكن دون أن يصهرها، وعندها تشد القامطات بعضها مع بعض لضغط نهايتي الماسورتين الواحدة على الأخرى لصنع وصلة تناكبية بالضغط.



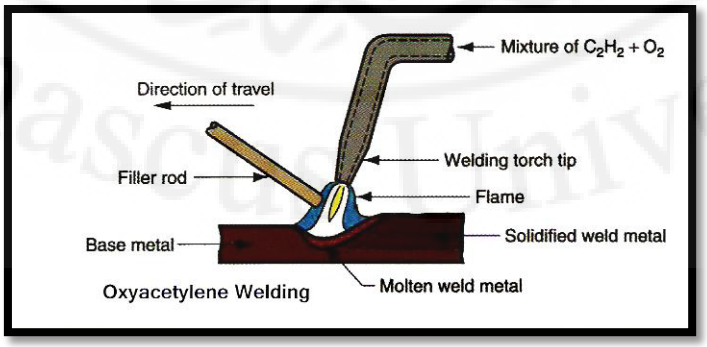
الشكل (11): لحام الثرميت بالصهر



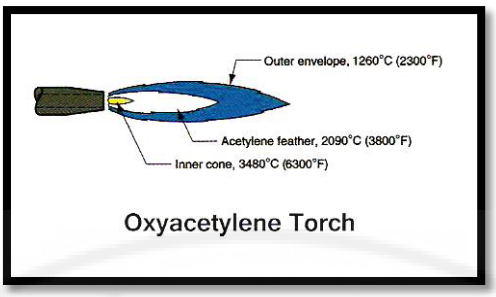
الشكل (12): لحام الثرميت بالضغط

لحام الصهر بالغاز (اللحام بالغاز): يتم توليد الحرارة في هذه الطريقة من خلال احتراق وقود غازي مناسب مع الهواء أو الأكسجين النقي، وتصل حرارة اللهب الناتج عن هذا الاحتراق إلى عدة آلاف من الدرجات المئوية. ويخلط الغاز عادةً مع الهواء أو الأكسجين في مشعل خاص، ويتم تنظيم نسب الخلط لهذه الغازات لإنتاج لهب مندلع من هذا المشعل يتمتع بخصائص معينة. وتستخدم في طريقة اللحام بالغاز غازات عديدة، منها: الاستيلين والغاز المنزلي والميتان والبروبان والهيدروجين وبخار البنزين.

يصلح اللحام بالغاز بصفة خاصة لوصل الألواح المعدنية التي تتراوح سماكاتها بين (2–50 mm)، أما استخداماته اليوم فتنحصر في لحام الألواح التي تتراوح سماكاتها بين (1 – 10 mm)، كما يُستخدم في الحالات التي يتعذر فيها الوصول بسهولة إلى مواضع الوصلات المراد لحامها. فإذا ضبط اللهب كما يجب (أنظر الشكلين 13 و 14)، يمكن باستخدام غاز الاستيلين الحصول على درجة حرارة لحام تزيد على 3000 درجة مئوية، في حين لا تزيد درجة حرارة اللهب الناتج عن استخدام الهيدروجين عن 1900 درجة. ولهذا، يفضل الهيدروجين في لحام الصفائح والأنابيب المعدنية رقيقة الجدران، بينما يستخدم الاستيلين في الصناعات الهندسية للحام المقاطع الكبيرة (وبخاصة الوصلات الفولاذية).



الشكل (13) : اللحام بالغاز



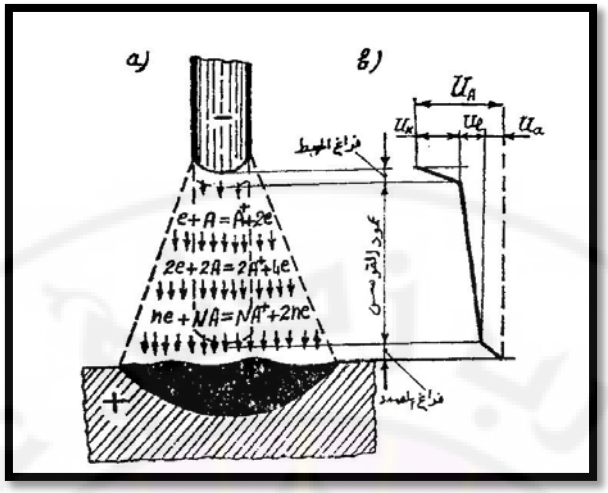
الشكل (14) : مشعل الأكسجين أستيلين

اللحام بالقوس الكهربائي: تتفوق طريقة اللحام بالقوس الكهربائي على سائر الطرائق الأخرى حتى أنها تبلغ 90 % من مجموع استخدامات طرائق لحام الصهر المختلفة. ويتم في هذه الطريقة تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية تستخدم في الصهر الموضعي لطرفي الوصلة. ويُعرَّف القوس الكهربائي على أنه: عملية تفريغ مستمرة للتيار الكهربائي في وسط غازي متأين موجود بين إلكترودين صلبين أو سائلين ويغذيهما توتر كهربائي. وتعد عملية التفريغ هذه المنبع الحراري المركز والمستخدم للصهر الموضعي عند اللحام . ويبدأ التفريغ الكهربائي بخلق انبعاث إلكتروني من قطب سالب ساخن يمثل المهبط إلى قطب آخر موجب يمثل المصعد. ويحافظ على استمرار التفريغ باستمرار تأين الغاز حراريا. فالعوامل الأساسية في خلق القوس الكهربائي إذاً هي: الحرارة، التأين، الانبعاث. ويتم قدح القوس بإحدى الطرق التالية: بتلامس الإلكترود مع المشغول لحظياً وسحبه مسافة قليلة، أو بوساطة جهاز يسبب شرارة تقفز من الإلكترود إلى المشغول، أو بوساطة جهاز يُكوَّن ويحافظ على إبقاء قوس ثانوي يمهد الطريق للقوس الرئيس. ويتألف القوس الكهربائي(أنظر الشكل 15) من ثلاثة أقسام هي: فراغ المهبط (الحيز الذي تنبعث منه الإلكترونات باتجاه المصعد) – فراغ المصعد (الحيز بالقرب من المصعد ويساوي طوله مقدار الانتقال الحر للإلكترون) – عمود القوس (الجزء الأساسي للقوس الكهربائي وفيه يحدث تأين ذرات الهواء). ويمكن أن تتبع سمات كثيرة لتصنيف أساليب اللحام بالقوس الكهربائي،ولكن أكثر هذه السمات أهميةً، هي:

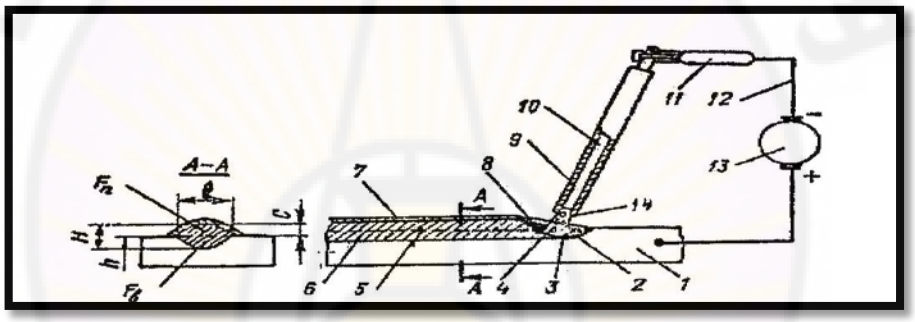
- **التصنيف حسب مستوى المكننة والأتمتة المستخدمتين في أسلوب اللحام:** وطبقا لهذه السمة يميز ثلاثة أنواع من اللحام (اليدوي – نصف الآلي – الآلي). وتبين الأشكال (16 – 17 – 18) رسماً تخطيطياً لكل نوع من هذه الأنواع الثلاثة آنفة الذكر.
- **التصنيف حسب نوع التيار الكهربائي المستخدم للحام وقطبيته:** وتبعا لهذه السمة يمكن أن نميز أسلوب اللحام بتيار مستمر ذي قطبية مباشرة "أي أن الإلكترود موصول مع القطب

السالب لمصدر التيار"– أسلوب اللحام بتيار مستمر ذي قطبية معكوسة "أي أن الإلكترود موصول مع القطب الموجب" – أسلوب اللحام بتيار متناوب.

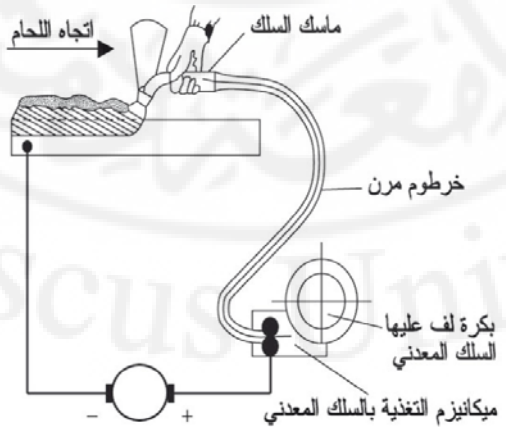
- **التصنيف حسب نوع القوس المشتعل:** ويتم التصنيف في هذه الحالة إلى نوعين من الأقواس: القوس ذو التأثير المباشر– وهو القوس المشتعل بين الإلكترود ومعدن الأساس، ويُعدُّ المعدن جزءاً من الدارة الكهربائية، القوس ذو التأثير غير المباشر– وهو القوس الذي يشتعل بين إلكترودين، ولا يعد معدن الأساس جزءاً من الدارة الكهربائية.
- **التصنيف حسب خواص الإلكترود:** وتُصنَّف في هذه الحالة جميع أساليب اللحام بالقوس الكهربائي إلى نوعين: أسلوب اللحام بإلكترود لا ينصهر (أي غير مستهلك)، حيث يتم استخدام إلكترود من الفحم أو الغرافيت أو من معدن التنجستين المشوب بالثوريوم، ويمكن استعمال سلك من المعدن المضاف في هذه الحالة، والأسلوب الآخر هو أسلوب اللحام بإلكترود ينصهر (أي مستهلك)، وهذا الأسلوب شائع الاستخدام، إذ ينصهر الإلكترود المعدني وتتساقط قطراته المنصهرة بالتدريج لتشكل فيما بعد الدرزة اللحامية.
- **التصنيف حسب نوع الحماية المستخدمة لمنطقة اللحام:** ويتم التصنيف هنا إلى مجموعة كبيرة من أساليب اللحام، فمثلا يمكن أن يتم اللحام دون حماية لمنطقة اللحام كأن يتم بإلكترود عار أو إلكترود ذي غلاف رقيق، أو أن يتم اللحام باستخدام حماية لمنطقة اللحام كأن تكون هذه الحماية من الخبث وذلك باستخدام إلكترودات ذات غلاف سميك أو استخدام طبقة من مساعدات الصهر (الفلاكس) تقي المعدن المنصهر من التفاعل مع الوسط المحيط أثناء اللحام، أو أن تستخدم حماية من الخبث والغاز في آن واحد، أو أن يتم اللحام في وسط من الغازات الواقية (هليوم، آرغون، آزوت، أو مزيج من هذه الغازات)، أو أن تستخدم حماية مركبة كأن يتم اللحام بإلكترودات مغلفة في وسط من الغازات الواقية.
- **التصنيف حسب ظروف تتبع اشتعال القوس:** ويمكن أن نميز في هذه الحالة ثلاثة أساليب للحام بالقوس الكهربائي وهي: اللحام بالقوس المفتوح– اللحام بالقوس المحجب– اللحام بالقوس نصف المحجب (أو نصف المفتوح). وتختلف هنا الظروف التي تسمح أو لا تسمح بمراقبة اشتعال القوس، فمثلا عند اللحام بالقوس المفتوح يمكن مراقبة اشتعال القوس باستخدام الزجاج الواقي، أما اللحام بالقوس المحجب فيعني أن عملية اللحام تتم دون توافر إمكان لمراقبة اشتعال القوس، وأما اللحام بالقوس نصف المحجب فيعني أن جزءا من القوس يشتعل تحت طبقة من الفلاكس، بينما يشتعل الجزء الآخر فوق هذه الطبقة. ويجب أن ننوه إلى أن كل أسلوب من الأساليب الثلاث آنفة الذكر له ميزاته ومجالات استخدامه.



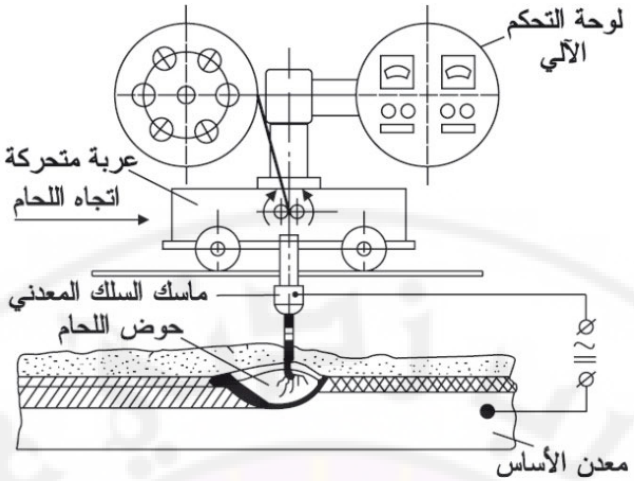
الشكل (15) : مخطط القوس الكهربائي



الشكل (16) : اللحام اليدوي بإلكترود مغلف: 1- معدن الأساس، 2- حوض اللحام، 3- فوهة، 4- قوس اللحام، 5- المعدن المضاف من الإلكترود، 6- معدن الأساس المشارك في بنية الدرزة اللحامية، 7- القشرة الخبثة المتجمدة، 8- الخبث المنصهر، 9- غلاف الإلكترود، 10- قضيب الإلكترود المعدني، 11- ماسك الإلكترود، 12- دارة اللحام الكهربائية، 13- مصدر التيار الكهربائي، 14- نهاية الإلكترود السفلي.

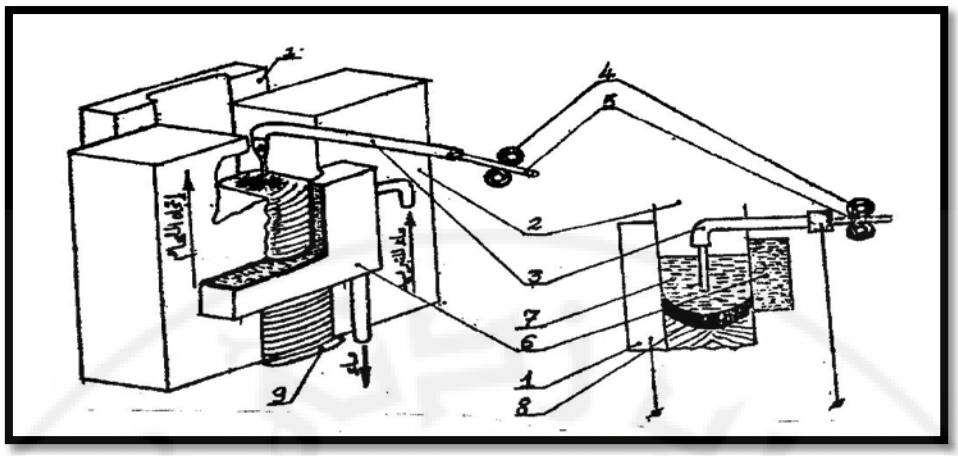


الشكل (17): اللحام نصف الآلي

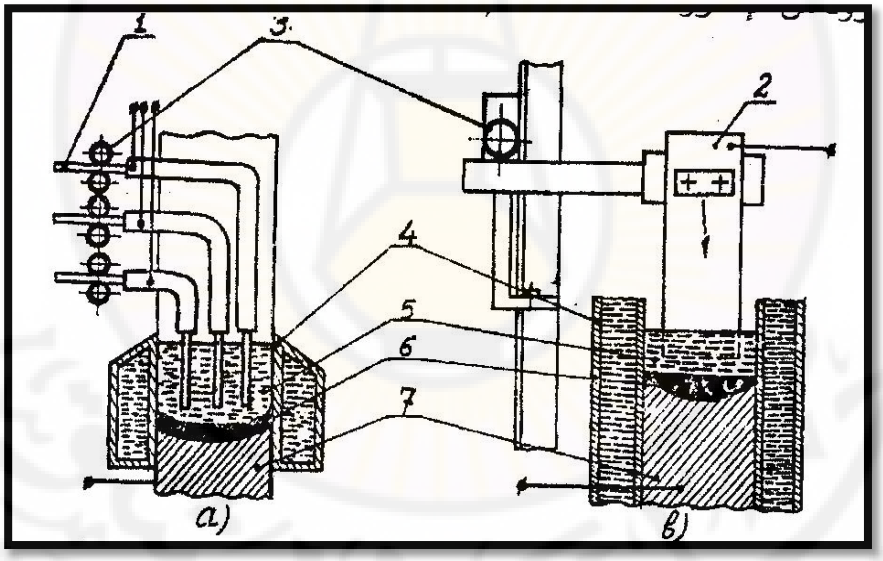


الشكل (18) : اللحام الآلي بالقوس المغمور بالفلاكس

- **اللحام الكهربائي الخبثي:** تعد هذه الطريقة من طرق لحام الصهر الحديثة والخاصة، إذ لا تستخدم هذه الطريقة إلا في لحام السماكات الكبيرة (أكثر من 16 مم)، وإذا أخذنا الناحية الاقتصادية بالحسبان يمكننا القول أن طريقة اللحام هذه تستخدم للحام السماكات التي تزيد على 40 مم. ويلحم بهذه الطريقة جميع أنواع الفولاذ وحديد الصب تقريباً والسبائك المختلفة لكل من معادن النحاس والتيتان. وتتميز هذه الطريقة عن غيرها من طرق اللحام الآلي بالقوس المغمور بطبقة من الفلاكس (والتي تعد تطوراً عن هذه الطرائق) بأن عملية اللحام الكهربائي الخبثي (ومهما كبرت سماكة القطعتين المراد وصلهما) تتم بمسار لحام واحد، ويكون توضع حوض اللحام عمودياً أثناء إجراء عملية اللحام. ويلعب الخبث المصهور دور المصدر الحراري لإتمام عملية اللحام بهذه الطريقة. ويبين الشكل (19) كيف تتم طريقة اللحام الكهربائي الخبثي للوصلات المعدنية، ويمكن تلخيص تقانة اللحام بهذه الطريقة بما يلي: إن ارتفاع درجة حرارة الخبث المصهور(نتيجة لمرور تيار كهربائي فيه) إلى درجة عالية يجعل كمية الحرارة المنطلقة من هذا الخبث كافية لصهر حواف الوصلة اللحامية وسلك اللحام المغمور وتشكيل حوض اللحام. وتستخدم الصفائح النحاسية من الطرفين (يمكن أن تكون إحداها متحركة – الشكل 19) للحفاظ على حوض اللحام المنصهر من الاندلاع. وتتم عملية اللحام آليا وبسرعة تغذية مناسبة لسلك اللحام. وبهذا الشكل يمكن الحفاظ على عمق مناسب للحوضين (المعدني والخبثي) المنصهرين. ويشكل حوض اللحام المعدني المتجمد في الأسفل ما يسمى الدرزة اللحامية. ويمكن أن تتم عملية اللحام الكهربائي الخبثي بإلكترود واحد أو بعدة إلكترودات (الشكل 20). وتستخدم طريقة اللحام بعدة إلكترودات في حال وصل القطع ذات السماكات الكبيرة جدا (حتى 500 مم).



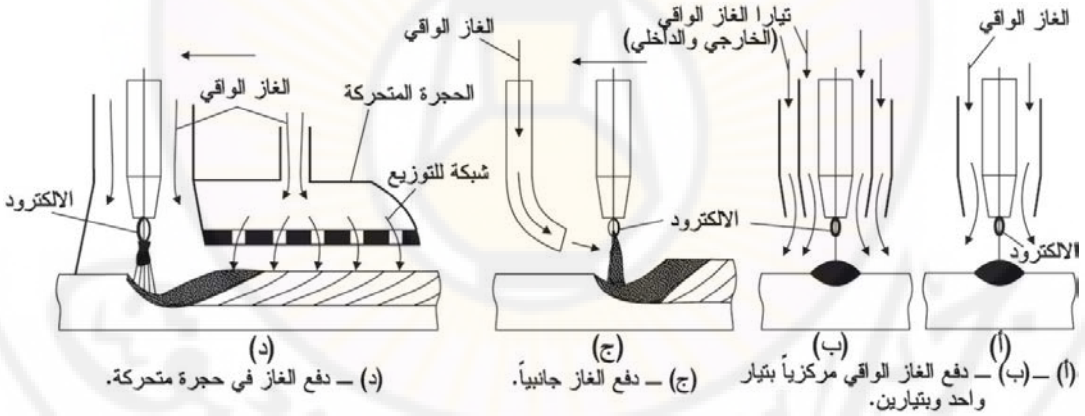
الشكل (20): مخطط اللحام الكهربائي الخبثي للوصلات المعدنية بإلكترود واحد: 1- صفيحة نحاسية، 2- الوصلة اللحامية، 3- حملاج اللحام، 4- بكرتان، 5- سلك اللحام، 6- صفيحة نحاسية متحركة،7- حوض الخبث،8- الحوض المعدني، 9- الدرزة اللحامية.



الشكل (21): مخطط اللحام الكهربائي الخبثي بعدة إلكترودات أو بصفيحة معدنية: 1- سلك اللحام، 2- صفيحة اللحام، 3- ميكانيزم (آلية) سحب سلك اللحام، 4- صفائح نحاسية تبرد بالماء، 5- حوض خبثي، 6- حوض المعدن المنصهر، 7- اللدرزة اللحامية.

- **اللحام في وسط من الغازات الواقية:** وتُعد هذه الطريقة من الطرائق الحديثة، وتستخدم في جو من الغازات الواقية للحام الإنشاءات المصنوعة من أنواع مختلفة من الفولاذ الكربوني والسبائكي والإنشاءات المصنوعة من المعادن غير الحديدية ومن سبائك هذه المعادن. ويمكن أن تتم عملية اللحام هذه يدوياً أو نصف آلي أو آلياً. وتستعمل كغازات

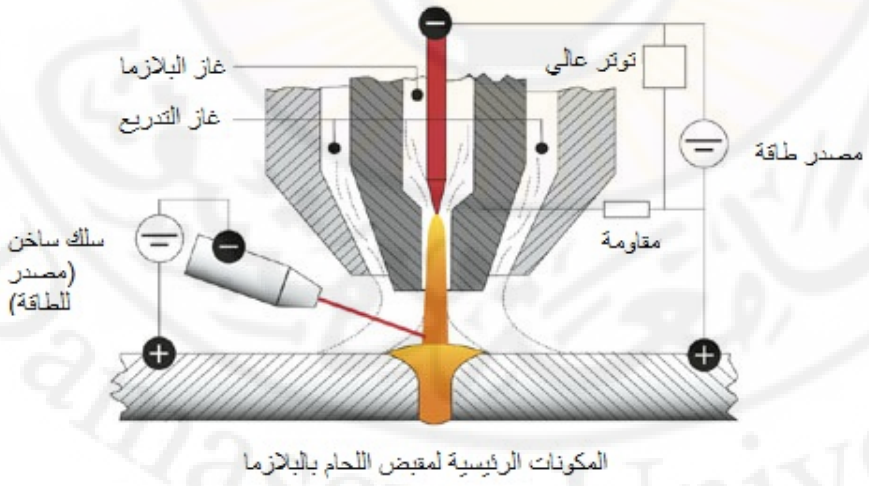
واقية غازات خاملة (مثل الآرغون والهليوم) أو غازات أخرى (مثل ثاني أوكسيد الكربون، الهيدروجين، الآزوت، الأكسجين ... وغيرها)، أو مزيج من غازين أو أكثر من هذه الغازات. وأكثر الغازات استخداماً في الوقت الحاضر الآرغون وغاز ثاني أوكسيد الكربون أو مزيج منها. وتتميز طريقة اللحام هذه عن غيرها من طرق اللحام بالقوس الكهربائي بأن الغاز يقي القوس وحوض المعدن المنصهر من التأثير الضار للوسط المحيط (الهواء مثلاً). أما طريقة استخدام الغازات للوقاية فتتم إما بدفع هذه الغازات في منطقة اللحام مركزياً أو جانبياً (أنظر الشكل 21). ويمكن إجراء عملية اللحام باستخدام إلكترود ينصهر (وغالباً ما يكون تركيبه الكيميائي مطابقا للتركيب الكيميائي لمعدن الوصلة) أو باستخدام إلكترود لا ينصهر (مصنوع من معدن التنجستين المشوب بالثوريوم)، وتتشكل الدرزة اللحامية في الحالة الأخيرة نتيجة انصهار حافتي الوصلة أو نتيجة لانصهار المعدن المضاف (معدن الملء).



الشكل (21): مخطط اللحام في وسط من الغازات الواقية:
(أ) و (ب) – دفع الغاز الواقي مركزياً بتيار واحد و بتيارين، (ج)– دفع الغاز جانبياً، (د)– دفع الغاز في حجرة متحركة،

- **لحام البلازما:** تعرف البلازما على أنها الغاز المتأين جزئيا أو كليا. ويتألف هذا الغاز من ذرات وجزيئات معتدلة ومن شوارد (أيونات) وإلكترونات. ويمكن عد الغاز المشرد كهربائياً هو الحالة المثلى للبلازما. وتنتج البلازما في معدات خاصة، وتسمى هذه المعدات في تقنية اللحام مشاعل البلازما (انظر الشكل 22). وتستخدم في الصناعة بشكل رئيس مشاعل البلازما التي تنتج في أقواس تغذى بتيار مستمر. وأكثر طرق

الحصول على البلازما شيوعاً هي تلك التي يستخدم فيها الغاز للتبريد المكثف لقوس يشتعل في قنال ضيقة نسبياً ومبردة بالماء. يتم اختيار قطر الإلكترود ونوعية الغاز المشكل للبلازما حسب الشروط المطلوب توافرها في عملية اللحام. ويستخدم قوس البلازما في لحام الفولاذ الذي لا يصدأ والتيتانيوم وسبائك النيكل والموليبدينيوم والتنجستين ومعادن وسبائك أخرى كثيرة تستعمل في مجالات الصناعات المختلفة مثل: صناعة الطائرات، الإلكترونيات، البواخر، الصناعات البتروكيميائية ومجالات أخرى. وتختلف طريقة اللحام بقوس البلازما الآرغوني (أي غاز الآرغون يشكل البلازما) عن طريقة اللحام في وسط من غاز الآرغون (أي غاز الآرغون يستخدم للوقاية) بأن اشتعال القوس في الأولى يكون أكثر اتزاناً ويصهر هذا القوس وبشكلٍ متساوٍ حواف القطعتين المراد وصلهما. يمكن باستخدام قوس البلازما إجراء عملية اللحام التناكبي لسماكات تصل إلى (9.5 mm) دون شنفرة الحواف ودون استخدام سلك المعدن المضاف. ويمكن باستخدام قوس ميكروالبلازما لحام السماكات التي تتراوح بين(0.8 mm - 0.025) من الفولاذ الكربوني والفولاذ الذي لا يصدأ والنحاس والنيكل والتيتانيوم والتنتاليوم والموليبدينيوم والتنجستين ومعادن وسبائك أخرى كثيرة. وتتراوح شدة التيار المستخدمة في هذه الحالة بين (A 10.0 – 0.1).



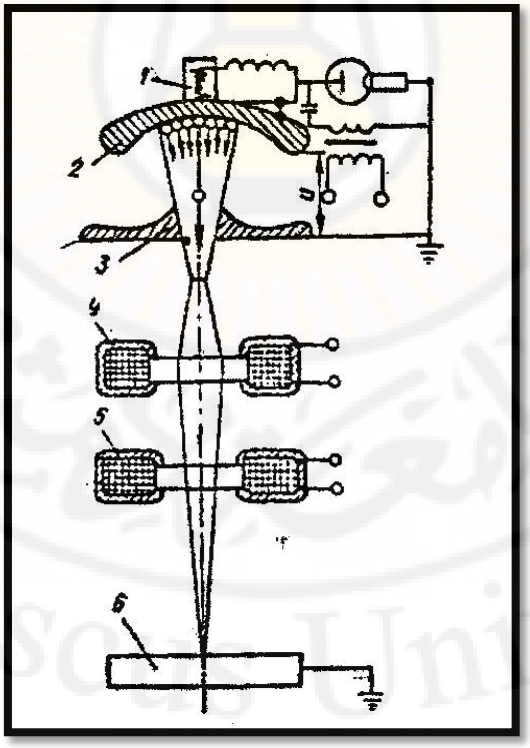
المكونات الرئيسية لمقبض اللحام بالبلازما

الشكل (22) : تقانة لحام البلازما

- **اللحام بالأشعة الإلكترونية:** إن الميزة الأساسية لعملية اللحام بالأشعة الإلكترونية تكمن في استخدام الطاقة الحركية للإلكترونات التي تتحرك بسرعة هائلة جداً في الوسط المخلخل. وعند ارتطام هذه الإلكترونات بسطح المعدن، فإن الجزء الأكبر من طاقتها

الحركية سوف يتحول إلى حرارة تستخدم لصهر المعدن. وفي حالة استخدام الأشعة الإلكترونية كمصدر حراري لعمليات اللحام فإنه من الضروري في البداية الحصول على إلكترونات حرة، ومن ثم جمعها في حزمة وإعطاؤها سرعات عالية جداً من أجل رفع طاقتها الحركية، وتتحول هذه الطاقة كلياً فيما بعد إلى حرارة عند نفاذ الإلكترون داخل المعدن المراد لحامه. يتم الحصول على إلكترونات حرة بوساطة مهابط معدنية تصدر هذه الإلكترونات، وأما تسريعها فيتم في حقل كهربائي ذي توتر عال بين المهبط والمصعد. ويستخدم الحقل المغناطيسي لجمع هذه الإلكترونات في حزمة وتركيز اتجاهها نحو المحرق. ويحدث التوقف المفاجئ (الفرملة) لتيار الإلكترونات وبشكل أوتوماتيكي (آلي) داخل المعدن المراد لحامه. ويتم توليد الشعاع الإلكتروني في جهاز خاص يسمى المدفع الإلكتروني. ويوضح الشكل (23) رسماً تخطيطياً لآلة اللحام بالأشعة الإلكترونية. والمدفع الإلكتروني في هذه الآلة هو جهاز يتم بوساطته الحصول على حزم إلكترونية ضيقة ولها كثافة طاقة عالية. ويتألف هذا الجهاز من المهبط 1 الذي يمكن تسخينه إلى درجات حرارة مرتفعة. ويتوضع المهبط داخل الإلكترود المهبطي 2، وعلى مسافة معينة يتوضع الإلكترود المسرع (أي المصعد 3). ويكون شكل الإلكترود المهبطي والمصعد بحيث يؤمنان وجود حقل كهربائي بينهما قادر على جمع الإلكترونات في حزمة قطرها يساوي قطر فتحة المصعد. ويمكن أن يصل فرق الكمون الموجب للإلكترود المسرع إلى عشرات الآلاف من الفولتات. لذا تكتسب الإلكترونات الصادرة عن المهبط سرعة وطاقة عاليتين. وتتحرك الإلكترونات بعد خروجها من المصعد بسرعات متساوية تقريباً. تتنافر الإلكترونات لأن شحنتها الكهربائية متشابهة مما يؤدي إلى توسع قطر الحزمة الإلكترونية وبالتالي تناقص كثافة الطاقة فيها. لهذا، ولزيادة كثافة الطاقة في الشعاع الإلكتروني الخارج من فتحة المصعد يتم تجميع هذا الشعاع بوساطة حقل مغناطيسي صادر عن عدسة مغناطيسية 4. ويؤدي هذا في النهاية للحصول على حزمة إلكترونية ذات كثافة طاقة عالية وقطرها صغير جداً، وسوف ترتطم هذه الحزمة بالمعدن المراد لحامه 6 بسرعة عالية جداً. ونتيجة لفرملة هذه الحزمة الإلكترونية داخل المعدن، فإن الطاقة الحركية للإلكترونات سوف تتحول إلى حرارة تسخن المعدن إلى درجة حرارة عالية. لا ترافق حركة الإلكترونات في الفراغ أي ظواهر ضوئية، لهذا فإن الشعاع الإلكتروني لا يمكن رؤيته. ولكن تأثيره يمكن متابعته، وذلك

من خلال تسخين هذا الشعاع للمكان الذي يرتطم به من سطح المعدن. ويعد التيار الإلكتروني من أكثر المصادر الحرارية مردوداً في عمليات اللحام، ذلك لأن كثافة طاقة الحزمة أعلى بكثير من كثافة طاقة القوس الكهربائي. وتمكننا طاقة الحزمة الإلكترونية من لحام جميع أنواع المعادن وبسماكات مختلفة. ولكن عملية اختيار كثافة الطاقة في الحزمة الإلكترونية المستخدمة لعمليات اللحام تحدد بمجموعة عوامل: خواص المعدن (درجة انصهاره، الناقلية الحرارية وغيرها)، سماكة الوصلة وشكلها ... الخ. فعند لحام المعادن التي درجة انصهارها مرتفعة والمعادن ذات الناقلية الحرارية الجيدة وفي حالة لحام السماكات الكبيرة، فإن كثافة طاقة الحزمة الإلكترونية يجب أن تكون عالية. وعند لحام المعادن التي درجة انصهارها وتبخرها منخفضة وفي حالة لحام السماكات القليلة فإنه من الأفضل استخدام حزم إلكترونية ذات كثافة طاقة منخفضة. وأحيانا وفي مثل هذه الحالات يمكن استخدام الحزم الإلكترونية النبضية (الحزم المتولدة من إلكترود مهبطي يغذيه تيار نبضي). ونود أن نذكر أنه توجد في الوقت الحاضر آلات لحام بالأشعة الإلكترونية تكفي استطاعتها للحام سماكات كبيرة تتراوح بين (200 – 500 mm).

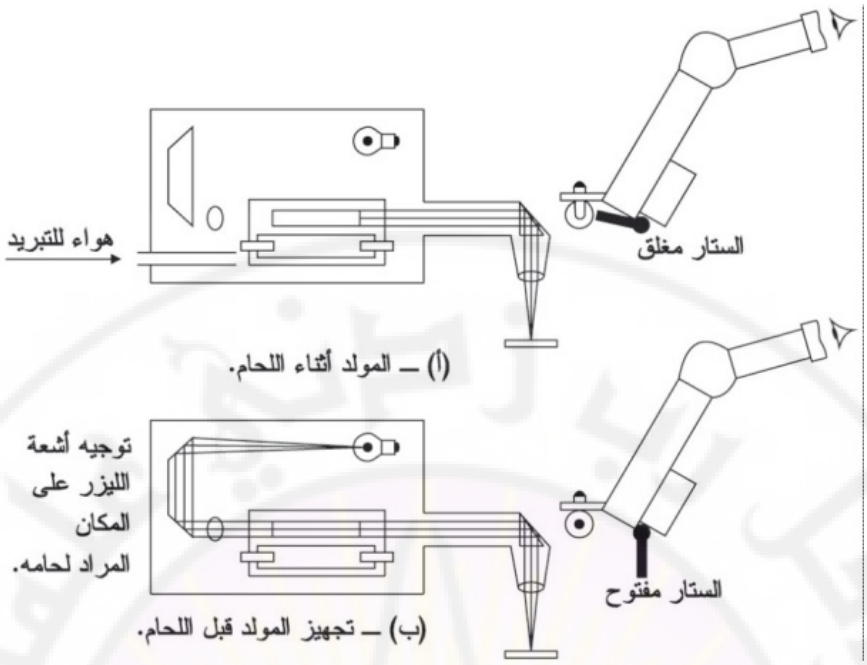


الشكل (23): رسم تخطيطي لآلة اللحام بالأشعة الإلكترونية

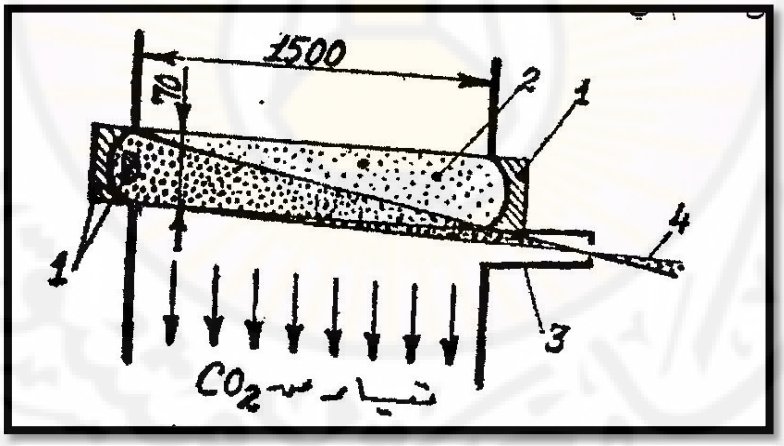
- **اللحام بأشعة الليزر** : ظهرت المولدات الكوانتية في النصف الثاني من القرن العشرين. ويمكن بوساطة هذه المولدات في الوقت الحاضر الحصول على حزم ضوئية عالية الكثافة وموجهة، ويمكن تركيز طاقة هذه الحزم على مساحات لا تتعدى أجزاء من الألف من الميليمتر المربع. وعلى هذا الأساس تم في العصر الحاضر تصميم آلات أشعة الليزر وإنتاجها والتي تستخدم في عمليات اللحام والقص والمعالجات الحرارية المختلفة. وتقوم المولدات الكوانتية بتحويل الطاقة الكهربائية والكيميائية والضوئية والحرارية إلى إشعاعات ضوئية عادية هي أمواج كهرطيسية. ويقع مجال هذه الأشعة في مجال الأشعة فوق البنفسجية المرئية والأشعة تحت الحمراء. ويمكن أن يكون المشع جسماً صلباً مصنوعاً من الزجاج والنيوديوم أو الياقوت، ويمكن أن تستخدم بعض السوائل كمشعات مثل محاليل أكاسيد النيوديوم أو مواد الصباغة، ويمكن استخدام بعض الغازات أو مزيج منها كمشعات مثل الهيدروجين، الآزوت، الأرغون، ثاني أوكسيد الكربون وغيرها. وتم في نهاية القرن العشرين تصميم مشعات من أنصاف نواقل مصنوعة من الكريستال الأحادي (مونوكريستال) مثل أرسينيدات الغاليوم والإنديوم أو خلائط الكادميوم مع الكبريت. وتتم عملية اللحام إما بشعاع الليزر الضوئي أو بأشعة الليزر الغازية. وأهم ما يميز طريقة اللحام بشعاع الليزر الضوئي هو إمكان الحصول على كثافة طاقة من مرتبة الطاقة نفسها التي نحصل عليها من الحزمة الإلكترونية. وفي طريقة اللحام هذه ونتيجة لعدم وجود شحنة في شعاع الليزر فإنه من السهل تركيز هذا الشعاع محرقياً في أي مكان. لذا فإن عملية لحام المعادن يمكن أن تتم في الهواء وفي وسط من الغازات الواقية وفي مكان مفرغ من الهواء (مخلخل). وإن إمكان تجميع (تركيز) طاقة شعاع الليزر في نقطة معينة تجعل طريقة اللحام هذه صالحة لإجراء اللحامات الميكروية. وبما أن الدورة الحرارية في طريقة اللحام هذه قصيرة جداً فهذا يعطي أيضا إمكان الحصول على وصلات لحامية للمعادن التي تتأثر سلبيا بطول فترة الدورة الحرارية. وتجد طريقة اللحام بأشعة الليزر الضوئية في الوقت الحاضر استخداماً واسعاً في لحام الدارات الإلكترونية المختلفة. ويمكن باستخدام شعاع الليزر الضوئي إجراء لحامات لوصلات متنوعة من معادن وأشباه معادن مختلفة في حقل الصناعة الإلكترونية مثل: لحام الذهب مع السيليسيوم والجرمانيوم مع الذهب والنيكل مع التنتاليوم والنحاس مع الألمنيوم .... الخ. وتعد الحجرة الضوئية 1 (أنظر الشكل 24) العقدة الأساسية في المولد الكوانتي.

ويوضع بداخل الحجرة كريستال الياقوت 2. ويكون توضع المصباح النبضي 3 بحيث يكون موازيا لكريستال الياقوت. وتوصل نهايات الكريستال بتوتر عال. ويجب أن يكون السطح الداخلي للحجرة مستويا ولماعا وعاكسا للضوء. يمرر الهواء المضغوط إلى داخل الحجرة لتبريد كريستال الياقوت، ويخرج هذا الهواء من الحجرة إلى المحيط الخارجي. لتشكيل الإشعاع الصادر عن الكريستال وتوجيهه إلى منطقة اللحام يستخدم ما يسمى نظام التشكيل الضوئي. ويتألف هذا النظام من موشور 4 وعدسة ومجسم يمكن تبديله 5. ويزود نظام التشكيل هذا بعدسات مرئية يمكن بوساطتها جمع الأشعة الضوئية المتوازية (التي يصدرها المولد) في المحرق وبقطر نحو (0.05 – 0.25 mm). ولتجهيز المولد يستخدم جهاز ضوئي مؤلف من المصباح 6 والموشور 7 والعدسة المكثفة 8. يمر الشعاع الضوئي الصادر من المصباح عبر الياقوت والنظام الضوئي للمولد (أنظر الشكل 24) يستخدم المجهر المجسم 9 لمشاهدة منطقة اللحام وذلك عند وصول الشعاع إلى هذه المنطقة ولرؤية الوصلات الملحومة .ويستخدم الستار 10، والذي يمكن تحريكه بوساطة مغناطيس كهربائي، يستخدم لوقاية عين العامل على الآلة من إشعاع المولد في لحظة اللحام. ويتألف الجهاز الكهربائي لآلة اللحام من منبع تغذية للمصباح النبضي وطاولة يدخل الستار فيها، إضافة لمحول كهربائي للإضاءة. ويضم الجزء الكهربائي مولدا أيضا. ويغذى المصباح النبضي بتوتر كهربائي قدره (18 KV).

أما شعاع الليزر الغازي فإنه يفقد طاقة قليلة في الوسط الغازي ومن السهل تجميعه محرقيا ويوجد إمكان كبير لتوصيل هذا الشعاع إلى المناطق صعبة الوصول وذلك باستخدام مجموعة من المرايا. ويتم حماية حوض اللحام في هذه الحالة بوساطة أحد الغازات الخاملة أو مزيج منها. يأخذ شعاع ليزر الغازي ذو التأثير المستمر شكلا حلقيا عند خروجه من المولد. ويمكن تجميع أشعة الليزر هذه بوساطة مجموعة من المرايا (أنظر الشكل 25). وبما أن ليزر غاز ثاني أوكسيد الكربون يتمتع بأكبر طاقة ومردود بين ليزر الغازات، فإنه يستخدم حاليا للحام المعادن المختلفة، إذ يمكن بوساطته لحام الفولاذ الذي تصل سماكته إلى 15 مم. ويجد هذا النوع من الليزر الغازي حاليا تطورا سريعا لاستخدامه في المعالجات الحرارية للسبائك المعدنية وفي عمليات القص المختلفة.



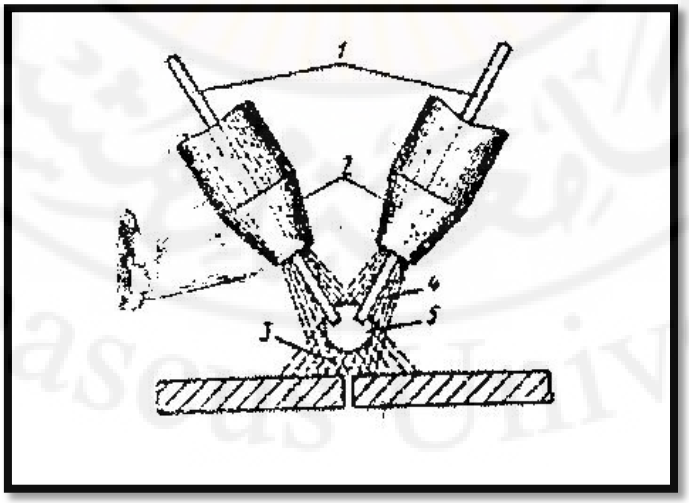
الشكل (24): رسم تخطيطي لمولد كوانتي يستخدم في اللحام: a – المولد أثناء اللحام، b– تجهيز المولد قبل اللحام



الشكل (25): جهاز توليد أشعة ليزرات ذات التأثير المستمر:
1– مجموعة مرايا، 2– المنطقة الفعّالة (النشطة)، 3– فتحة لخروج الشعاع، 4= شعاع الليزر الخارج

- **اللحام بالهيدروجين الذري:** يتم صهر المعدن بهذه الطريقة بوساطة الحرارة المنطلقة نتيجة تحول الهيدروجين الذري إلى جزيئي وحرارة القوس المشتعل بين إلكترودين من التنجستين. وتعد كمية الحرارة الناتجة عن إشعاع القوس وعن احتراق جزيئات الهيدروجين في المنطقة الخارجية للمشعل صغيرة جدا إذا ما قورنت بكمية الحرارة

المنطلقة نتيجة ارتطام ذرات الهيدروجين بالمعدن وتحولها إلى هيدروجين جزيئي .وتبلغ درجة حرارة لهب الهيدروجين الذري نحو (3700) درجة مئوية. ويقوم الهيدروجين في طريقة الحام هذه بنقل الحرارة من القوس إلى المعدن، إذ يمتص الهيدروجين الجزيئي في البداية كمية الحرارة اللازمة لتحوله إلى هيدروجين ذري (أي انشطاره). وعند ارتطام ذرات الهيدروجين بسطح المعدن فإنها تفقد جزءا كبيرا من حرارتها فتبرد هذه الذرات وتكون من جديد جزيئات الهيدروجين. ويقوم الهيدروجين أيضا بحماية منطقة اللحام من تأثير الأكسجين والآزوت الموجودين في الهواء الجوي. يشتعل القوس عند اللحام بالهيدروجين الذري، وكما ذكرنا آنفا، بين إلكترودين من التنجستين يميلان على بعضهما بزاوية معينة (أنظر الشكل 27). ويتم دفع الهيدروجين النقي إلى منطقة القوس، وأحيانا يدفع مزيج من الهيدروجين والآزوت الناتجين عن انشطار النشادر وتستخدم طريقة اللحام بالهيدروجين الذري عادة للحم المعادن والخلائط المعدنية ذات السماكات (0.5 – 10.0 mm). ويلحم بهذه الطريقة بشكل جيد وصلات من الفولاذ الكربوني والسبائكي ومن الفونت ومن سبائك الألمنيوم والمغنزيوم. ويلحم بشكل سيئ النحاس واللانتانيوم. ويجب استعمال البودرة عند لحام الألمنيوم وسبائكه وهي عبارة عن أملاح المعادن القلوية. وهناك بعض المعادن التي تتفاعل مع الهيدروجين (أي تبدي شراهة قوية نحوه) كالتيتان والزركونيوم والتنتاليوم وغيرها، حيث لا ينصح لحام هذه المعادن بطريقة اللحام بالهيدروجين الذري.

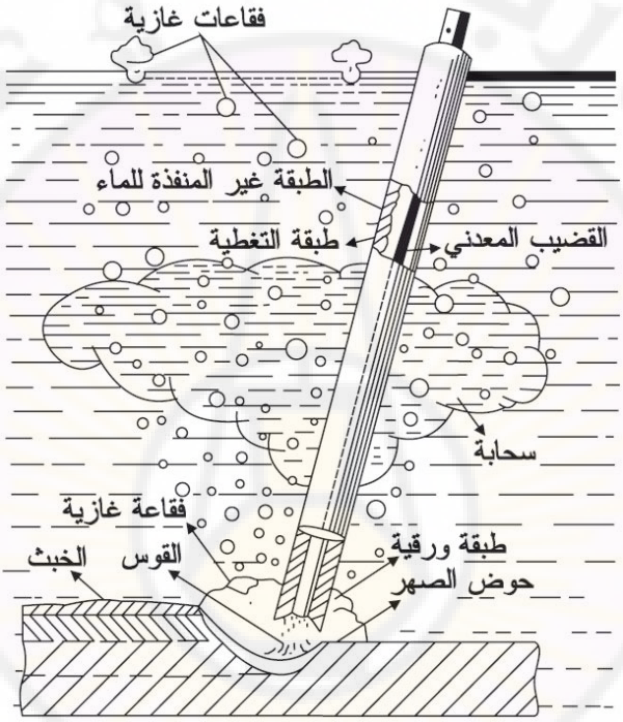


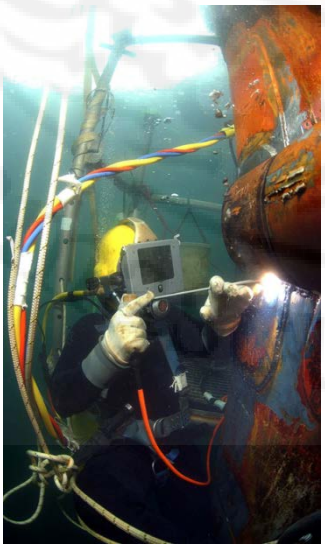
الشكل (26): اللحام بالهيدروجين الذري: 1– الإلكترودات، 2– ماسكات الإلكترودات،3– منطقة تحول الهيدروجين، 4– الهيدروجين الجزيئي القادم من الاسطوانات، 5– منطقة انشطار الهيدروجين الجزيئي إلى ذري.

- **اللحام تحت الماء:** تعد هذه الطريقة من طرق اللحام الحديثة والخاصة، ولقد صممت هذه الطريقة انطلاقا من قدرة القوس الكهربائي على الاشتعال بشكل متزن في الفقاعة الغازية وبسبب التبريد المكثف للماء المحيط بهذا القوس (أنظر الشكل 27). تتشكل الفقاعة الغازية نتيجة لتبخر الماء وتحلله إلى عنصريه الهيدروجين والأكسجين، إضافة إلى الغازات المتشكلة نتيجة لانصهار معدن الالكترود وطبقة التغطية. تنطلق حول القوس المشتعل كمية كبيرة من الغازات تؤدي إلى زيادة الضغط في الفقاعة الغازية وإلى تشكل جزء من هذه الغازات على شكل فقاعات على سطح الماء. ويتحلل الماء الموجود في القوس المشتعل إلى هيدروجين وأكسجين، ويتحد الأخير مع المعدن مشكلا أكسيد المعدن. أما نواتج اشتعال المعدن وطبقته المغلفة فتكون معلقة في الماء وتتألف بشكل أساسي من أكاسيد الحديد وتشكل سحابة معلقة، حيث تشكل هذه السحابة صعوبة في مراقبة اشتعال القوس الكهربائي. إن اشتعال القوس تحت الماء بشكل متزن يمكن تفسيره انطلاقا من مبدأ الطاقة الصغرى (أي أن التبريد القوي لجزء من القوس يقابله ازدياد كمية الحرارة المنطلقة منه). ولتعويض الضياع الحراري الناتج عن التأثير التبريدي للماء ووجود كمية كبيرة من الهيدروجين، فإن ذلك يتطلب توترا مرتفعا نسبيا (30 – 35 v). تجرى عملية اللحام تحت الماء باستخدام تيار مستمر أو متناوب. ويكون اشتعال القوس أكثر اتزاناً عند استخدام تيار مستمر، ذلك لأن التيار المستمر يحلل الماء إلى عنصريه قبل أن يشتعل القوس، بينما يحلل التيار المتناوب الماء إلى عنصريه وتتشكل الفقاعة الغازية في لحظة قدح القوس (أي وجود دارة القصر) وعند درجة حرارة عالية. ولا يؤثر كل من ازدياد العمق وارتفاع ضغط الوسط المحيط في اتزان القوس المشتعل، وإنما يؤديان إلى زيادة توتر القوس وارتفاع قيم شدة التيار الكهربائي المار فيه. يمكن أن تتم عملية اللحام تحت الماء في المياه الحلوة والمالحة على حدٍ سواء. ويمكن تحت الماء إجراء أنواع الوصلات اللحامية كافة من تراكبية وزاوية ومتعامدة، وقلما تجرى اللحامات التناكبية، وتستخدم لهذا الغرض مايسمى طريقة الإلكترود المستند (المتكأ)، والسبب في ذلك أن اشتعال القوس يكون أكثر اتزاناً، ويستطيع عامل اللحام في هذه الحالة أن يحرك الإلكترود دون هزه على عرض خط اللحام مع الاحتفاظ بزاوية ميل الإلكترود ثابتة. ويمكن باستخدام الإلكترود المستند أن تتم عملية اللحام وفي جميع الأوضاع (الأفقي،

الشاقولي، الرأسي). وتتم عملية اللحام الشاقولي في هذه الحالة من الأعلى إلى الأسفل، ويكون ميل الإلكترود عندئذ باتجاه سير عملية اللحام.

تصنع إلكترودات اللحام اليدوي تحت الماء من اسلاك فولاذية مغلفة بطبقة تغطية كما هو الحال في الإلكترودات العادية، إلا أن هناك بعض المواد الخاصة تدخل في تركيب طبقة التغطية هذه إضافة إلى المواد المعدنية وغير المعدنية المستخدمة عادة. ويظهر في الشكل نفسه مقطعا للإلكترودات المستخدمة في القص تحت الماء.







الشكل (27): الشكل العام لاشتعال القوس الكهربائي تحت الماء.

حساب أنظمة اللحام وأبعاد الدرزة اللحامية
عند اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي والقوس المحكَّم آلياً

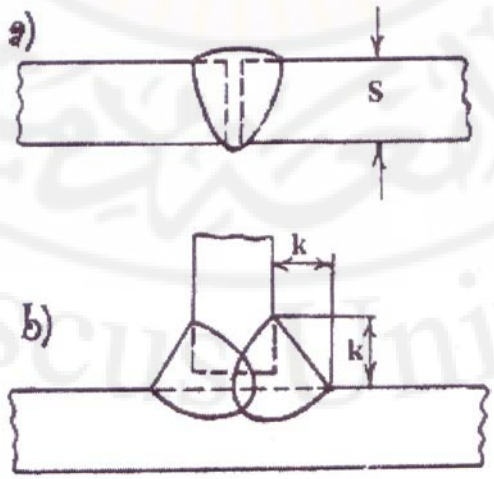
1-حساب أنظمة اللحام وأبعاد الدرزة اللحامية عند اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي:

يتألف نظام اللحام في حالة اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي من العناصر الآتية: قطر الإلكترود – شدة التيار الكهربائي– توتر القوس الكهربائي– مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف والناتج بمسار لحام واحد للقوس الكهربائي– نوع التيار وقطبيته– الطاقة الطولية وغيرها

1- اختيار قطر الإلكترود: يتم عادةً اختيار قطر الإلكترود تبعاً لكلٍ من نوع الوصلة المراد لحامها وسماكة هذه الوصلة (S)، وذلك في حالة اللحام التناكبي، أو تبعاً للبعد (K) في حالة اللحام الزاوي (الشكل 28,a & b) – ويعد البعد (K) طول ضلع الدرزة الزاوية. ويبين الجدول (1) التوصيات العملية المتبعة عادةً لاختيار قطر الإلكترود، وذلك في حالتي اللحام: التناكبي والزاوي.

جدول (1): توصيات عملية لاختيار قطر الإلكترود في حالة اللحام اليدوي

سماكة القطعة عند اللحام التناكبي	2.0–1.8	3.0	8.0–4.0	12.0–9.0	15.0–12.0	20.0–16.0	20.0 <
قطر الإلكترود	2.0–1.6	3.0	4.0	5.0–4.0	5.0	6.0–5.0	10.0–6.0
طول ضلع الدرزة الزاوية	3.0			5.0–4.0		9.0–6.0	
قطر الإلكترود	2.0			4.0		5.0	



الشكل (28): وصلة تناكبية وأخرى زاوية

وهنا لا بد من الإشارة إلى أنه عند اللحام التناكبي لحواف مشنفرة وبعدة مسارات لحام، فإن عملية لحام الدرزة الأولى تتم بإلكترودات لا يتجاوز قطرها (4mm)، وذلك لأن استخدام إلكترودات ذات قطر أكبر لا يحقق صهر جذر الدرزة اللحامية، والسبب عدم إمكان إدخال رأس الإلكترود ذي القطر الكبير إلى عمق الزاوية بين الحواف المشنفرة بشكل كامل.

عند اللحام الزاوي بمسار واحد فإنه يمكن الحصول على درزات لحامية لا تتجاوز قيمة (K) فيها (mm 9-8)، فعند ضرورة تحقيق درزات لحامية زاوية بـ (K) أكبر من ذلك تجري عملية اللحام بمسارين أو أكثر.

2- **<u>حساب شدة التيار:</u>** تتعلق شدة التيار بقطر الإلكترود وكثافة التيار المسموح بها، وتحدد عادةً بالعلاقة الآتية:

$$I = \frac{\pi d^2}{4} J \qquad (1)$$

1- حيث: d – قطر الإلكترود (mm)، J – كثافة التيار المسموح بها $\left(A/_{mm^2}\right)$.

ويبين الجدول (2) قيم J المسموح بها عند اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي.

الجدول (2): قيم J المسموح بها عند اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي:

نوع التغطية	كثافة التيار المسموح بها $\left(A/_{mm^2}\right)$ في الإلكترود ولأقطار مختلفة			
	3.0	4.0	5.0	6.0
حامضية	20.0–14.0	16.0–11.5	13.5–10.0	12.5–9.5
أساسية (قلوية)	18.5–13.0	14.5–10.0	12.5–9.0	12.0–8.5

يمكن في بعض الحالات استخدام أيٍ من المعادلات التجريبية الآتية لحساب شدة التيار الكهربائي في قوس اللحام:

$$I = K'.d \qquad (2)$$
$$I = K_1.d^{1.5} \qquad (3)$$
$$I = d(K_2 + \alpha.d) \qquad (4)$$

حيث: K_1 و K_2 و α عوامل حددت قيمها تجريبياً كما يلي:

$$K_1 = 20 - 25, \quad K_2 = 20, \quad \alpha = 6$$

ومن السهل تعيين شدة التيار وفقاً للمعادلة (2)، حيث تؤخذ قيمة K' من الجدول الآتي وتبعاً لقطر الإلكترود المستعمل في عملية اللحام:

الجدول (3): قيم K' تبعاً لقطر الإلكترود المستعمل عند اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي:

قطر الإلكترود (mm)	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
K'	25-30	45–30	50–35	55–50	60–45

3- **اختيار توتر القوس:** يتغير توتر القوس في حدود ضيقة نسبياً، فإذا علمنا أن شدة التيار عند اللحام اليدوي تتراوح بين (70-380A)، فإن توتر القوس يتراوح بين (20-36V)، ولهذا من السهل تحديد قيمة توتر القوس إذا عرفنا شدة التيار. وهنا لا بد من الإشارة إلى أنه في بعض الأحيان، وعند إعداد بروسيجر (Procedure) اللحام، فإنه يتم اختيار توتر القوس على أساس المواصفات الواردة في النشرة الفنية للإلكترود المستخدم في عملية اللحام.

4- **حساب المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف:** يتم إيجاد مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة اللحامية المضاف عند اللحام التناكبي، وبعد كل مسار لحام وفقاً للمعادلتين الآتيتين:

- بعد المسار الأول (أي عندما يتم صهر جذر الدرزة اللحامية):

$$F_1 = (6-8)d \qquad (5)$$

- بعد كل مسار من المسارات الأخرى:

$$F_n = (8-12)d \qquad (6)$$

أما في حالة اللحام الزاوي، فإن مساحة المقطع العرضي للمعدن المضاف الناتج بمسار لحام واحد أو عدة مسارات ، فيتم حسابه من العلاقة الآتية:

$$F = K_y \frac{K^2}{2} \qquad (7)$$

حيث: K_y معامل الزيادة، ويتعلق بكلٍ من مقدار الخلوص بين حافتي الوصلة الزاوية ومقدار تحدب الدرزة (أي مقدار تقوية الدرزة اللحامية)، وتؤخذ قيم معامل االزيادة من الجدول الآتي:

الجدول (4): علاقة قيم معامل الزيادة K_y بطول ضلع الدرزة الزاوية K :

طزل ضلع الدرزة الزاوية K (mm)	4.0–3.0	6.0–5.0	12.0–10.0	20.0–12.0	30.0–20.0	30.0
معامل الزيادة K_y	1.50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05

وهنا لا بد من الإشارة إلى أن مساحة مقطع الدرزة المضاف على سطح قطعة معدنية (وعلى شكل ندبة لحام) تحسب وفقاً للمعادللة (6). ويتم أيضاً استخدام العلاقة نفسها عند لحام قطعتين تناكبياً دون شنفرة حوافهما.

5- **حساب قيم الطاقة الطولية:** من الضروري في أغلب الأحيان استنتاج قيم الانفعالات (التشوهات) اللدنة الناتجة في الوصلة اللحامية عن عملية اللحام، إضافةً إلى معرفة عمق تغلغل الصهر بشكلٍ تقريبي. ويتطلب معرفة هذا أو ذاك حساب قيمة الطاقة الطولية (أي معرفة مقدار التأثير الحراري في معدن الوصلة)، والطاقة الطولية هي عبارة عن نسبة استطاعة القوس الكهربائي (q) إلى سرعة اللحام (V).

$$q_n = \frac{q}{V} = \frac{0.24 \,.\, I \,.\, U \,.\, \eta}{V} \ [cal/cm] \qquad (8)$$

حيث: U توتر القوس، I شدة التيار، η المردود، وتتراوح قيمته بين (0.7-0.9). ويمكن لسرعة اللحام V أن تُعيَّن وفقاً للعلاقات الآتية:

$$V = \frac{\alpha_m \cdot I}{3600 \cdot \gamma \cdot F_n} \ [cm/sec.] \qquad (9)$$

حيث: α_m معامل صهر معدن الإلكترود $\frac{g}{A.h}$، γ الوزن النوعي لمعدن الإلكترود $\frac{g}{cm^3}$، F_n مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف بعد كل مسار من مسارات اللحام (cm^2) يمكن لسرعة اللحام بلقوس الكهربائي اليدوي أن تفرض عادةً، وأن تختبر على نحوٍ غير مباشر، وذلك حسب أبعاد الدرزة اللحامية المراد الحصول عليها. لهذا، وبمعرفة نظام اللحام يمكن حساب الطاقة الطولية(q_n) من خلال العلاقة (8). أما إذا أدخلت في هذه العلاقة قيمة V من العلاقة (9)، يمكن الحصول على العلاقات الآتية:

$$q_n = \frac{0.24 \cdot I \cdot U \cdot \eta \cdot 3600 \cdot \gamma}{\alpha_n \cdot I} \cdot F_n \qquad (10)$$

$$q_n = 0.24 \cdot 3600 \cdot \eta \cdot \gamma \cdot \frac{U}{\alpha_m} \cdot F_n \qquad (11)$$

إن النسبة $\frac{U}{\alpha_m}$ في المعادلة (11) تتغير في حدود ضيقة نسبياً، ولو أن هناك فرقاً واضحاً في قيم عوامل الانصهار للإلكترودات من أنواعٍ مختلفة. لهذا، فإن قيمة الطاقة الطولية تتناسب طرداً مع مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف، وتصبح العلاقة (11) محددة بقيمة الثابت (A) مضروباً بمساحة المقطع العرضي. ففي لحام الفولاذ، وباستعمال أنواع مختلفة من الإلكترودات تكون قيمة (A) مساويةً (14500). لهذا، تصبح العلاقة (11) على الشكل الآتي (بالنسبة للحام الفولاذ فقط):

$$q_n = 14500 \cdot F_n \qquad (12)$$

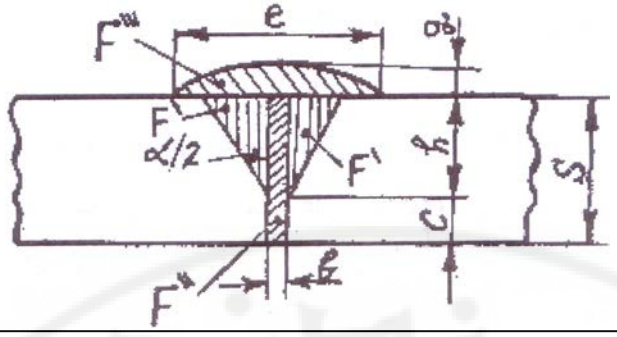
6-**<u>حساب عدد المسارات:</u>** تحدد عدد مسارات اللحام بصفة عامة عند لحام حواف مشنفرة. فمثلاً، عند اللحام التناكبي وبوجود حواف مشنفرة (ولنفرض أن شنفرة الحواف تمت على شكل حرف (V) (الشكل 29)، فإن من الضروري حساب المساحة الكلية للمقطع العرضي (أي المساحة التي تُملأ أثناء اللحام بمعدن الإلكترود المنصهر- أي المعدن المضاف):

$$F = 2F' + F'' + F''' \qquad (13)$$

$$F = h^2 tg\frac{\alpha}{2} + b \cdot S + \frac{2}{3} g\left(2htg\frac{\alpha}{2} + b + 6\right) \qquad (14)$$

وبمعرفة المساحة الكلية للمقطع العرضي لمعدن الدرزة اللحامية المضاف من العلاقة (14) ومساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف بعد المسار الأول وبعد كل مسار من المسارات الأخرى من العلاقتين (5) و (6)، يمكن إيجاد عدد مسارات اللحام من العلاقة الآتية:

$$n = \frac{F - F_1}{F_n} + 1 \qquad (15)$$



الشكل (29): إيجاد المساحة الكلية للمقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف.

–**<u>حساب أبعاد الدرزة اللحامية:</u>** إن أبعاد الدرزة اللحامية هي: عرض الدرزة (e) وارتفاع الندبة (g) وعمق الصهر (r). ففي حالة اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي، فإن هذه الأبعاد الثلاثة تُحدد طبقاً لأبعاد الحواف المشنفرة للوصلات المعدة للحام، ولهذا فليس من الضروري تعيين هذه الأبعاد، وبخاصةٍ عمق تغلغل الصهر (r) إلا عندما يتم لحام الحواف غير المشنفرة أو عند وضع ندبة لحام على سطح قطعة معدنية، ذلك لأن إيجاد عمق الصهر في هاتين الحالتين وبدقة مفيد للأهداف العملية. ويجري تحديد عمق الصهر على الشكل الآتي:

– إن درجة الحرارة العظمى على بعد (r) من نقطة تأثير قوس اللحام تحسب بالعلاقة:

$$T_{max} = \frac{2q_n}{\pi .e .c .\gamma .r^2} \qquad (16)$$

حيث: e – أساس اللوغاريتم الطبيعي (e=2.714....)،

C – الحرارة النوعية لمعدن الأساس $\frac{cal}{g .o_C}$ ،

γ – الوزن النوعي لمعدن الأساس $\frac{g}{cm^3}$،

– من العلاقة (61) نجد أن: (17)

$$r = \sqrt{\frac{2q_n}{\pi .e .c .\gamma .T_{max}}}$$

وبما أن الثوابت في هذه العلاقة متساوية تقريباً لجميع أنواع الفولاذ، يمكن استبدال هذه الثوابت بقيمها العددية، وبهذا الشكل يمكن حساب المسافة (r) من نقطة تأثير القوس وحتى خطوط الإيزوثيرم التي درجة حرارتها ($1500\ ^oC$): (18)

$$r = 0.0112\sqrt{q_n}$$

وبما أن الشروط الحقيقية لانتشار الحرارة في القطعة عند اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي تختلف عن المخطط الحسابي النظري، الذي نتج منه استخراج العلاقة (16)، فإن عمق الصهر الحقيقي (H) يؤخذ عادةً مساوياً: H= (0.5-0.7)r

<u>مثال (1):</u> أوجد نظام اللحام اللازم للحام قطعتين من الفولاذ منخفض نسبة الكربون تناكبياً إذا علمت أن سماكة كل منهما (S=8 mm)، وأن اللحام يتم دون شنفرة الحواف، ثم أوجد عمق تغلغل الصهر.



1- نختار قطر الإلكترود اللازم لعملية اللحام من الجدول (1)، فنجد أن: (d=4 mm).
ويجب أن نلاحظ هنا أن عملية اللحام يجب أن تتم من الوجهين كما في الشكل، وذلك من أجل الحصول على عمق صهر كامل لحافتي القطعتين (كامل المقطع).

2- نوجد مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف من العلاقة (6):

$$F_n = (8-12)d \rightarrow F_n = 10\ x\ 4 = 40mm^2 = 0.4cm^2$$

3- تُحسب شدة التيار بإحدى العلاقات الأربع (1-4)، وللسهولة نستخدم المعادلة (2)، حيث تأخذ قيمة K' من الجدول (3):

$$I = K'.d = (35-50)d \rightarrow I = 42.5\ x\ 4 = 170A$$

4- نوجد سرعة اللحام من العلاقة (9)، حيث نوجد أولاً معامل صهر معدن الإلكترود α_m، وذلك تبعاً لشدة التيار وتوتر القوس. فإذا علمنا أن توتر القوس هنا، وبناءً على معطيات البند (3) يساوي: (U=25V) ، ومنه نجد أن: $\alpha_m = 9.2\ \frac{g}{A.h}$

لهذا، تكون سرعة اللحام: $V = \frac{\alpha_m .I}{3600\ .\gamma.F_n} = \frac{9.2\ .170}{3600\ .7.8\ .0.4} = 0.14\frac{cm}{sec.} \approx 5\frac{m}{h}$

ملاحظة: تتراوح عادةً سرعة اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي: $V = (5-12)\frac{m}{h}$، وذلك تبعاً لشروط اللحام ومهارات العامل الفني الذي يقوم بإجراء عملية اللحام.

5- يمكن إيجاد قيمة الطاقة الطولية بالعلاقة (8):

$$q_n = \frac{0.24\ .I\ .U.\eta}{V} = \frac{0.24\ .170\ .25\ .0.8}{0.14} \approx 5400\ cal/cm$$

أو بالعلاقة (12): $q_n = A\ .F_n = 14500\ .0.4 = 5800\ cal/cm$

ويمكن في هذه الحالة حساب القيمة الوسطى، والتي تساوي: $q_n = 5600\ cal/cm$

6- نوجد عمق تغلغل الصهر على الشكل التالي:

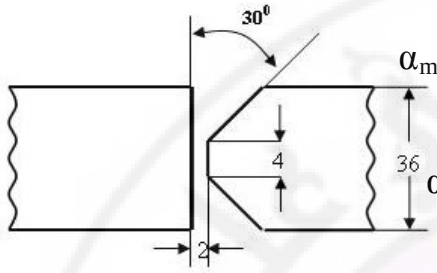
أ- نحسب المسافة r من نقطة تأثير القوس وحتى خطوط إيزوثيرم الصهر بالعلاقة (19):

$$r = 0.0112\sqrt{q_n} = 0.0112\sqrt{5600} = 0.84\ cm = 8.4\ mm$$

ب- نوجد عمق الصهر الحقيقي H من العلاقة: $H = (0.5-0.7)r = 0.6\ .8.4 = 5\ mm$

ومنه نلاحظ ان تغلغل الصهر بهذا الشكل، ومن كل وجه من وجهي الوصلة كافٍ لصهر كامل المقطع لهذه الوصلة.

مثال (2): أوجد قيم عناصر نظام اللحام وعدد مسارات اللحام اللازمة، وذلك عند لحام قطعتين من الفولاذ الكربوني سماكة كل منها (S = 36 mm) تناكبياً مع شنفرة الحواف كما هو مبين في الشكل أدناه شريطة أن يتم لحام المسار الأول بإلكترود قطره (d_1=4mm)، ولحام جميع المسارات الأخرى بإلكترود قطره (d_2=5 mm)، علماً أن: **(15 درجة)**



1 – عند اللحام بإلكترود قطره (d_1=4mm):

α_{m1} = 10 g / A.h ،η_1 = 0.85 ،K′ = (35 – 50) A/ mm

2 – عند اللحام بإلكترود قطره (d_2=5mm):

α_{m2} =11g / A.h ،η_1 = 0.85 ،K′ = (50 – 55) A/ mm

الوزن النوعي للفولاذ $\gamma = 7.8\ g / cm^3$،

ارتفاع بروز (مقدار التقوية) الدرزة اللحامية (g = 3 mm)

الحل: **1) حساب عناصر نظام اللحام في حالة لحام المسار الأول:**

1- حساب شدة التيار: $I_1 = K'.d = (35-50)d \rightarrow I_1 = 42.5\ x\ 4 = 170A$ **(درجتان)**

2- مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف:

$F_1 = (6-8)d_1 \rightarrow F_1 = 7\ x\ 4 = 28\ mm^2 = 0.28\ cm^2$ **(درجة واحدة)**

3- توتر القوس الكهربائي: $U_1 \cong 25\ V$ **(درجة واحدة)**

4- سرعة اللحام: $V_1 = \frac{\alpha_{m1}.I}{3600.\gamma.F_n} = \frac{10.170}{3600.7.8.0.28} = 0.22\frac{cm}{sec.} \approx 7.92\frac{m}{h}$ **(درجة واحدة)**

5- إيجاد قيمة الطاقة الطولية بالعلاقة: $q_1 = \frac{0.24.I.U.\eta}{V} = \frac{0.24.170.25.0.8}{0.22} \approx 3709\ cal/c$ **(درجتان)**

2) حساب عناصر نظام اللحام في حالة لحام المسارات الأخرى:

1- حساب شدة التيار: $I_2 = K'.d_2 = (50-55)d2 \rightarrow I = 52.5\ x\ 5 = 262.5\ A$ **(درجتان)**

2- مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف:

$F_2 = (8-12)d_2 \rightarrow F_2 = 10\ x\ 5 = 50\ mm^2 = 0.50\ cm^2$ **(درجة واحدة)**

3- توتر القوس الكهربائي: $U_2 \cong 30\ V$ **(درجة واحدة)**

4- سرعة اللحام: $V_2 = \frac{\alpha_{m2}I}{3600.\gamma.F_n} = \frac{11.262.5}{3600.7.8.0.50} = 0.21\frac{cm}{sec.} \approx 7.56\frac{m}{h}$ **(درجة واحدة)**

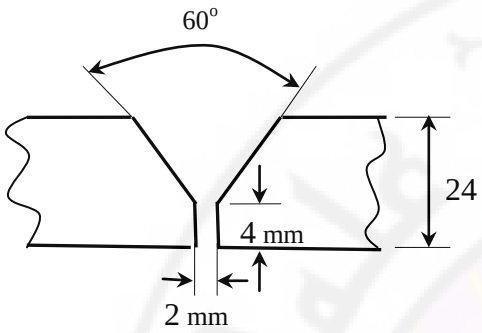
5- إيجاد قيمة الطاقة الطولية بالعلاقة: $q_2 = \frac{0.24.I.U.\eta}{V} = \frac{0.24.262.5.30.0.8}{0.21} \approx 7200\ cal/c$ **(درجتان)**

3) حساب عدد المسارات (درجة واحدة):

$$F = h^2 tg\alpha + b.S + \frac{2}{3}g(htg\alpha + b + 6) = 16^2 tg30 + 2x36 + \frac{2}{3}x3(2x16tg30 + 2 + 6) = 272.75$$

$$n = \frac{F - F_1}{F_n} + 1 = \frac{272.75 - 28}{50} + 1 = 5.9 = 6$$

مثال (3): أوجد قيم عناصر نظام اللحام اليدوي وعدد مسارات اللحام اللازمة، وذلك عند لحام قطعتين من الفولاذ الكربوني سماكة كل منها (S = 36 mm) تناكبياً مع شنفرة الحواف كما هو مبين في الشكل أدناه شريطة أن يتم لحام المسار الأول بإلكترود قطره (d_1=4mm)، ولحام جميع المسارات الأخرى بإلكترود قطره (d_2=5 mm)، علماً أنه: **(16 درجة)**



1) عند اللحام بإلكترود قطره (d_1=4mm):

α_{m1} = 10 g / A.h ،η_1 = 0.85 ،K′ = (35 – 50) A/ mm

2) عند اللحام بإلكترود قطره (d_2=5mm):

α_{m2} =11 g/ A.h ،η_2 = 0.85 ،K′ = (50 – 55) A/ mm

الوزن النوعي للفولاذ $\gamma = 7.8\ g / cm^3$،

ارتفاع بروز (مقدار التقوية) الدرزة اللحامية (g = 3 mm)

الحل: 1) حساب عناصر نظام اللحام في حالة لحام المسار الأول:

1- حساب شدة التيار: $I_1 = K'.d_1 = (35-50)d \rightarrow I_1 = 42.5\ x\ 4 = 170A$ **(درجتان)**

2- مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف:

$F_1 = (6-8)d_1 \rightarrow\ F_1 = 7\ x\ 4 = 28\ mm^2 = 0.28\ cm^2$ **(درجة واحدة)**

3- توتر القوس الكهربائي: $U_1 \cong 25\ V$ **(درجة واحدة)**

4- سرعة اللحام: $V_1 = \frac{\alpha_{m1}.I_1}{3600.\gamma.F_n} = \frac{10.170}{3600.7.8.0.28} = 0.22\frac{cm}{sec.} \approx 7.92\frac{m}{h}$ **(درجة واحدة)**

5- إيجاد قيمة الطاقة الطولية بالعلاقة: $q_1 = \frac{0.24.I.U.\eta}{V} = \frac{0.24.170.25.0.8}{0.22} \approx 3709\ cal/c$ **(درجتان)**

2) حساب عناصر نظام اللحام في حالة لحام المسارات الأخرى:

6- حساب شدة التيار: $I = K'.d = (50-55)d2 \rightarrow I = 52.5\ x\ 5 = 262.5\ A$ **(درجتان)**

7- مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف:

$F_1 = (8-12)d_2 \rightarrow\ F_2 = 10\ x\ 5 = 50\ mm^2 = 0.50\ cm^2$ **(درجة واحدة)**

8- توتر القوس الكهربائي: $U_2 \cong 30\ V$ **(درجة واحدة)**

9- سرعة اللحام: $V_2 = \frac{\alpha_m.I}{3600.\gamma.F_n} = \frac{11.262.5}{3600.7.8.0.50} = 0.21\frac{cm}{sec.} \approx 7.56\frac{m}{h}$ **(درجة واحدة)**

إيجاد قيمة الطاقة الطولية بالعلاقة: $q_2 = \frac{0.24.I.U.\eta}{V} = \frac{0.24.262.5.30.0.8}{0.21} \approx 7200\ cal/c$ **(درجتان)**

3) حساب عدد المسارات (درجة واحدة):

$$F = h^2 tg\alpha + b.S + \frac{2}{3}g(2htg\alpha + b + 6) = 20^2 tg30 + 2x24 + \frac{2}{3}x3(2x20tg30 + 2 + 6) = 341.13$$

$$n = \frac{F - F_1}{F_n} + 1 = \frac{341.13 - 28}{50} + 1 = 7.26 \cong 8$$

2-حساب أنظمة اللحام عند اللحام بالقوس الكهربائي المحكَّم آلياً:

إن العناصر الأساسية في نظام اللحام المحكم آلياً (سواءً أكان نصف آلي أم آلياً، وسواءً كانت عملية اللحام تتم بالقوس المغمور تحت طبقة من مساعدات الصهر"الفلاكس" أم في وسط من الغازات الواقية) هي: شدة التيار الكهربائي، كثافة التيار الكهربائي في سلك اللحام، قطر سلك اللحام، توتر القوس، سرعة اللحام، سرعة التغذية بسلك اللحام، نوع التيار وقطبيته، الطاقة الطولية.....الخ، ولهذه العناصر تأثير كبير في أبعاد الدرزة اللحامية الناتجة وشكلها. ولهذا يجب الأخذ بالحسبان أن هذه العناصر سوف توفر الحصول على درزات لحامية معروفة الأبعاد والشكل مسبقاً وذات نوعية جيدة. ولنورد فيما يلي كيف يتم إيجاد عناصر نظام اللحام عند لحام قطعتين تناكبياً ومن الوجهين ودون شنفرة الحواف، ففي هذه الحالة يكون تدرج حساب عناصر نظام اللحام كالآتي:

1- **إيجاد عمق الصهر:** يتم حساب عمق الصهر من العلاقة:

$$H_1 = \frac{S}{2} + (2-3)mm \qquad (19)$$

وهذا هو عمق الصهر من وجه واحد، إذ نلاحظ أنه يزيد على نصف سماكة لقطعة بمقدار (2-3 mm)، وذلك كي لا يوجد خلوص بين جذري الدرزتين اللحاميتين، مما يشكل عيباً كبيراً في الوصلة اللحامية.

2- **اختيار شدة التيار الكهربائي:** يتم اختيار شدة التيار التي توفر عمق الصهر المطلوب بالعلاقة الآتية:

$$I = \frac{H_1}{K_h}.100 \qquad (20)$$

حيث: K_h – معامل التناسب، وتتعلق قيمته بالشروط التي يتم وفقها إنتاج الوصلة اللحامية (نوع التيار وقطبيته، قطر سلك اللحام، نوع الوسط المحيط بالقوس الكهربائي)، وذلك كما في الجدول (5):

3- **التأكد من دقة اختيار قطر سلك اللحام:** يتحدد قطر سلك اللحام بالعلاقة التالية:

$$d = 1.13\sqrt{I/J} \qquad (21)$$

حيث: J – كثافة التيار المسموح بها.

وتتعلق كثافة التيار بقطر سلك اللحام في حالة اللحام المحكم آلياً للوصلات التناكبية غير المشنفرة، ويبين الجدول (6) هذه العلاقة:

الجدول (5): علاقة K_h معامل التناسب بشروط إنتاج الوصلة اللحامية بالقوس المحكم آلياً

نوع الوسط المحيط بالقوس الكهربائي أثناء اللحام	قطر سلك اللحام (mm)	$K_h\ (\frac{mm}{100A})$		
		تيار مستمر		تيار متناوب
		قطبية مباشرة	قطبية معكوسة	
فلاكس (مؤكسد شديد)	2.0	1.15	1.45–1.40	1.30–1.25
	3.0	0.95	1.30–1.25	1.15–1.10
	4.0	0.90–0.85	1.15–1.10	1.05–1.00
	5.0	0.85–0.75	1.10–1.05	0.95
	6.0	———	———	0.90
غاز ثاني أكسسيد الكربون	1.2	———	2.1	———
	1.6	———	1.75	———
	2.0	———	1.55	———
	3.0	———	1.45	———
	4.0	———	1.35	———
	5.0	———	1.20	———

الجدول (6): علاقة كثافة التيار j بقطر سلك اللحام في حالة اللحام المحكم آلياً

قطر سلك اللحام d (mm)	كثافة التيار j (A/mm^2)
2.0	200–65
3.0	90–45
4.0	60–35
5.0	50–30
6.0	45–25

ولهذا، يتم في البدية تحديد قطر سلك اللحام بشكل تقريبي من حيث اختبار صحة الاختيار بالعلاقة (21).

4- **توتر القوس الكهربائي:** بعد معرفة شدة التيار الكهربائي وقطر سلك اللحام يتم تعيين توتر القوس بالعلاقة الآتية:

$$U = 20 + \frac{50 .10^{-3}}{d^{0.5}} I \pm 1 \qquad (22)$$

5- **سرعة اللحام:** تتعين سرعة اللحام بالعلاقة نفسها التي استخدمت عند تعيين سرعة اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي (أي العلاقة 9)، إلا إن معامل صهر معدن سلك اللحام α_m يختلف من حيث القيمة، إذ يتعين هذا المعامل هنا من المخططات التجريبية الواردة في المراجع المختصة، وذلك حسب شدة التيار ونوع سلك اللحام المستخدم وقطره.

أما تعيين مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف (F)، والتي تدخل في مقام العلاقة (9)، فسوف يتم التحدث عنه فيما بعد.

وهنا لا بد من الإشارة إلى أنه يمكن استخدام علاقات تجريبية أخرى لتعيين سرعة اللحام المحكم آلياً. وإحدى هذه العلاقات بُنيت على أساس أنه للحفاظ على الشكل الهندسي للدرزة اللحامية، من الضروري أن يبقى معامل شكل الحوض ثابتاً، ويعطى هذا المعامل بالعلاقة الآتية:

$$\varphi = \frac{L}{e} = const. \qquad (23)$$

حيث: L – طول حوض اللحام، e – عرض حوض اللحام.

ولقد تبين من خلال تجارب كثيرة أجراها الباحثون في هذا المجال أنه للحفاظ على الشكل الهندسي لحوض اللحام، فإن جداء شدة التيار بسرعة اللحام يجب أن يكون ثابتاً وواقعاً ضمن حدود معينة، أي أن:

$$I.V = A \qquad (24)$$

ولهذا، وعند اختيار سرعة اللحام المحكم آلياً يمكن استخدام العلاقة آنفة الذكر (24). أما قيم الثابت A الواردة في هذه العلاقة، فلقد استنتجت تجريبياً كما أسلفنا، وفي تلك الحالات التي تم فيها الحصول على درزات لحامية وفق الشكل المطلوب والمتمتعة بمتانة عالية إذا ما قورنت بمعدن الأساس. ويبين الجدول (7) قيم A المستنتجة تجريبياً

الجدول (7): علاقة قيم الثابت A بقطر سلك اللحام في حالة اللحام المحكم آلياً

قطر سلك اللحام d (mm)	الثابت A (A . m/h)
1.2	$(2-5).10^3$
1.6	$(5-8).10^3$
2.0	$(8-12).10^3$
3.0	$(12-16).10^3$
4.0	$(16-20).10^3$
5.0	$(20-25).10^3$
6.0	$(25-30).10^3$

6- **الطاقة الطولية:** تُعين الطاقة لطولية بالعلاقة (8) نفسها، والتي استخدمت سابقاً في حالة اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي.

7- **سرعة سحب سلك اللحام (أو سرعة التغذية بسلك اللحام):** يتم تحديد هذه السرعة بالمعادلة الآتية: $$V_{electrode} = \frac{4 .\alpha_m .I}{\pi .d^2 .\gamma} \qquad (25)$$

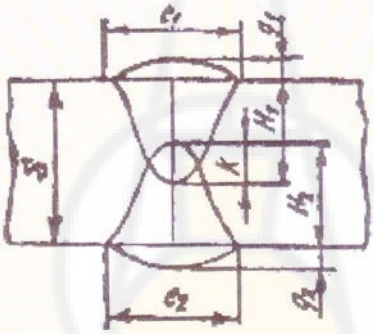
وكما نلاحظ فإن سرعة سحب سلك اللحام (كما في سرعة اللحام) تتعلق بكلٍ من معامل صهر معدن السلك (الإلكترود) وشدة التيار وقطر السلك والوزن النوعي لمعدن السلك.

- **<u>حساب أبعاد الدرزة اللحامية عند اللحام بالقوس الكهربائي المحكَّم آلياً:</u>**

ذكرنا آنفاً أنه عند تعيين نظام اللحام يجب التركيز على اختيار العناصر الأساسية التي توفر الحصول على درزات لحامية معروفة الشكل والأبعاد وتتمتع بخواص ميكانيكية لا تقل قيمها عن مثيلاتها لمعدن الأساس. وسنورد فيما يلي مثالاً في كيفية حساب أبعاد الدرزات اللحامية في حالة اللحام التناكبي. فإذا فرضنا أن اللحام التناكبي يتم من الوجهين ودون شنفرة الحواف، فإن أبعاد الدرزة تحسب كما يلي:

1- **<u>عمق الصهر:</u>** إن الشرط الأساس للحصول على عملية صهر كامل مقطع الوصلة ومن الوجهين يحدد من العلاقة الآتية:

$$H_1 + H_2 = S + K \qquad (26)$$



الشكل (30): أبعاد الدرزة اللحامية في حالة اللحام التناكبي لوصلة من الوجهين دون شنفرة الحواف.

لقد ثبت تجريبياً أن هذا الشرط غير كافٍ للحصول على درزات لحامية ذات نوعية جيدة ومتمتعة بمتانة عالية، إذ تبين أنه من الضروري إيجاد قيم معينة أخرى وأبعاد أخرى أيضاً قبل إعطاء التصور النهائي لأبعاد الدرزة اللحامية، التي سوف نحصل عليها من استخدام نظام معين للحام المحكم آلياً، فمن هذه القيم مثلاً: معامل شكل الصهر ψ_f ومعامل شكل التقويم ψ_a . ومن الأبعاد: عرض الدرزة e وارتفاع ندبتها g . ونورد فيما يلي علاقة أبعاد الدرزة اللحامية ببعضها من خلال هذين العاملين:

إن نسبة عرض الدرزة اللحامية إلى عمق الصهر تسمى معامل شكل الصهر:

$$\psi_f = \frac{e}{H} \qquad (27)$$

ونسبة عرض الدرزة اللحامية إلى ارتفاع ندبتها تسمى معامل شكل التقويم:

$$\psi_a = \frac{e}{g} \qquad (28)$$

ولقد ثبت تجريبياً أن قيم ψ_f يجب ان تتراوح بين (1.5–5.0)، بينما تتراوح قيم ψ_a فتتراوح بين (7.0–10.0).

وللحصول على درزات لحامية ذات شكل أمثل، فإنه من الضروري إيجاد العلاقة بين عناصر نظام اللحام والأبعاد الرئيسة للدرزة اللحامية، ونبدأ هذه العلاقة بإيجاد عمق الصهر:

$$r^2 = \frac{2q_n}{\pi .e .c .\gamma .T} \qquad (29)$$

فإذا افترضنا أن المساحة المحددة بخطوط إيزوثيرم الصهر هي نصف دائرة، فإن:

$$F = \frac{\pi r^2}{2} = \frac{\pi}{2} . \frac{2q_n}{\pi .e .c .\gamma .T} = \frac{1}{e .c .\gamma .T} q_n \qquad (30)$$

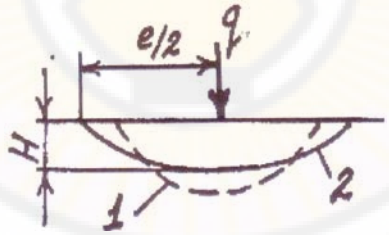
ولكن الشكل الحقيقي للصهر هو نصف قطع ناقص مساحته تساوي مساحة نصف الدائرة المعينة بالعلاقة (30). وبما أن مساحة نصف القطع الناقص، والذي نصف محوره الكبير يساوي (e/2) ونصف محوره الصغير يساوي (H)، يمكن أن تُعيّن العلاقة:

$$F = \frac{\pi}{2} . \frac{e}{2} . H = \frac{\pi}{4} \frac{e}{H} H^2 = \frac{\pi .\psi_f .H^2}{4} = \frac{1}{e .c .\gamma .T} q_n \qquad (31)$$

$$H^2 = \frac{4\, q_n}{\pi .e .c .\gamma .T .\psi_f} \qquad (32)$$

$$H = 2\sqrt{\frac{q_n}{\pi .e .c .\gamma .T .\psi_f}} = \frac{2}{\sqrt{\pi .e .c .\gamma .T}} \sqrt{\frac{q_n}{\psi_f}} = A\sqrt{\frac{q_n}{\psi_f}} \qquad (33)$$

وهذه العلاقة هي المستخدمة في تحديد عمق الصهر في حالة اللحام بالقوس الكهربائي المحكم آلياً. أما الثابت A ، ففي حالة اللحام بالقوس المغمور بالفلاكس، وباستخدام سلك لحام من الفولاذ، فإن قيمة هذا الثابت تكون مساوية (0.0156).



الشكل (31): الشكل المتوقع لحوض اللحام عند اللحام بالقوس الكهربائي: 1- نصف دائرة، 2- قطع ماقص.

ولا تتغير قيمة هذا الثابت عند لحام الفولاذ في وسط من غاز ثاني أكسيد الكربون. ولكن يجب أن نعلم أنه لتعيين عمق الصهر، فإنه يجب معرفة الطاقة الطولية (q_n) ومعامل شكل الصهر (ψ_f). وقد بحثنا آنفاً في كيفية إيجاد (q_n)، أما (ψ_f) فيمكن إيجاد قيمه بإحدى الطريقتين:

أ- **<u>بيانياً:</u>** ويتم ذلك باستخدام المخططات التجريبية التي تم الحصول عليها في هذا المجال.

ب-**<u>حسابياً:</u>** ويتم ذلك باستخدام العلاقة التجريبية المناسبة، إذ أدت معالجة النتائج التجريبية التي حصل عليها الباحثون خلال سنوات كثيرة إلى الحصول على علاقة رياضية بين معامل شكل الصهر والعناصر الأساسية لنظام اللحام:

$$\psi_f = K'(19 - 0.01\,.I)\frac{d.U}{I} \qquad (34)$$

حيث: K' – معامل تتعلق قيمته بنوع التيار وقطبيته، d – قطر سلك اللحام، I – شدة التيار، U – توتر القوس.

فعندما تكون كثافة التيار: $\boldsymbol{J \leq 120\frac{A}{mm^2}}$، ويتم اللحام بتيار مستمر ذي قطبية معكوسة، تعطى قيمة K' بالعلاقة:

$$K' = 0.367\,.\mathrm{j}^{0.1925} \qquad (35)$$

وإذا تم اللحام بتيار مستمر ذي قطبية مباشرة، تُحدد K' بالعلاقة الآتية:

$$K' = \frac{2.82}{\mathrm{j}^{0.1925}} \qquad (36)$$

أما عندما تكون كثافة التيار: $J \geq 120\frac{A}{mm^2}$، فإن قيمة K' تبقى ثابتة وتساوي (0.92) للتيار المستمر ذي القطبية المعكوسة، وتساوي (1.12) للتيار المستمر ذي القطبية المباشرة. أما عند اللحام بتيار متناوب، فإن قيمة K' ثابتة وتساوي (1) مهما تغيرت قيم كثافة التيار.

2- **حساب عرض الدرزة اللحامية:** بمعرفة عمق الصهر (H) ومعامل شكل الصهر (ψ_f)، يمكن باستخدام العلاقة (27) تعيين عرض الدرزة اللحامية:

$$e = (\psi_f)\,.H \qquad (37)$$

3- **حساب ارتفاع الندبة اللحامية (أو مقدار التقوية للدرزة اللحامية):** يتم حساب ارتفاع الندبة اللحامية بإحدى العلاقتين:

- إما بالعلاقة (28)، حيث نجد أن:

$$g = \frac{e}{\psi_a} \qquad (38)$$

- أو بالعلاقة (9) عندما تكون معلومة لدينا سرعة اللحام (V). فمن هذه العلاقة يمكن إيجاد مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف (F). وبما أن مساحة هذا المقطع يمكن أن تكتب بالعلاقة:

$$F = \mu\,.g\,.e \qquad (39)$$

حيث: μ – معامل ملء ندبة اللحام (أي نسبة مساحة المقطع العرضي لندبة اللحام إلى مساحة مستطيل قاعدته e وعرضه g). ولقد ثبت تجريبياً انه عند اللحام المحكم آلياً، فإن معامل ملء الندبة μ يتغير في حدود ضيقة جداً وتعد قيمة ثابتة وتساوي 075، ومنه يمكن إيجاد قيمة g:

$$g = {}^{F}/_{0.75\,.g\,.e} \qquad (40)$$

وهنا لا بد من الإشارة إلى أن حساب *(g)* في الوقت الحضر يتم بطريقة أخرى مغايرة تماماً لما ذكر آنفاً، فلقد تبين تجريبياً أن الارتفاع الكلي للدرزة اللحامية (أي عمق الصهر + مقدار

التقوية) يبقى في حال الوصلات التناكبية والزاوية ثابتاً إذا استخدم نظام اللحام نفسه سواءً أكانت الحواف مشنفرة أو دون شنفرة، وسواءً توافر خلوص بينها أم لم يتوافر. ويؤثر الاختلاف في نوعية الوصلة المعدة للحام على نحوٍ رئيس في نسبة مشاركة معدن الأساس والمدن المضاف في عملية الصهر (أي يختلف عمق الصهر وارتفاع الندبة كلٌ على حدا)، أما الارتفع الكلي فيبقى ثابتاً – الشكل 32. ولهذا، يمكن لنظام اللحام نفسه كتابة ما يلي:

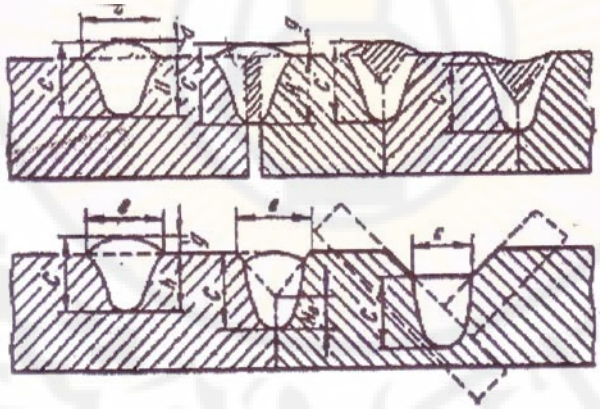
$$C = H + g = H' + g' = \cdots = const. \qquad (41)$$

لهذا، يتوجب في بداية الأمر إيجاد الارتفاع الكلي للدرزة اللحامية تجريبياً، وذلك من خلال وضع ندبة لحام على سطح قطعة معدنية خصصت لهذا الغرض مصنوعة من معدن الوصلة نفسه، ثم قياس الارتفاع الكلي للدرزة الناتجة. بعد ذلك يتم إيجاد عمق الصهر في الوصلة المعدة للحام حسابياً بالمعادلة (33)، وبالمقارنة نجد أن:

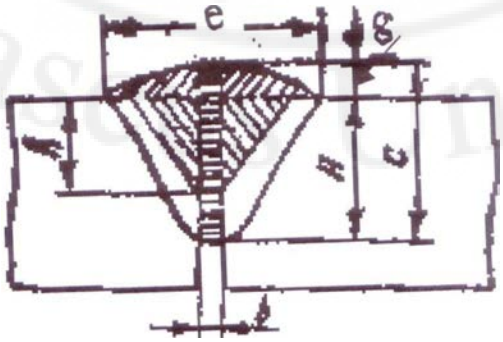
$$g' = C - H' \qquad (42)$$

ومن الشكل (33) نلاحظ أنه حتى في حال لحام وصلات ذات حواف مشنفرة ووجود خلوص بينها، يمكن إيجاد g بالعلاقة التالية:

$$g' = \frac{F - h^2 tg\alpha/2 - Cb}{0.75e - b} \qquad (43)$$

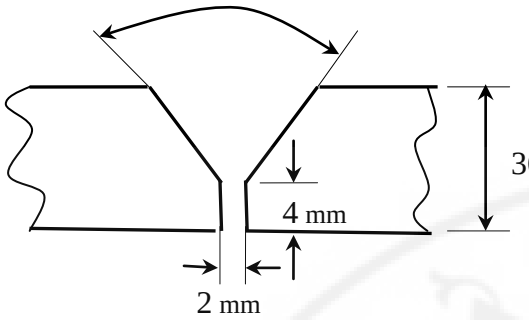


الشكل (32): الارتفاع الكلي C للرزة اللحامية يبقى ثابتاً ولوصلات مختلفة إذا لم يتغير نظام لحام هذه الوصلات.



الشكل (33): وصلة تناكبية ذات حواف مشنفرة.

مثال (1): أوجد عناصر نظام اللحام في كلتا الحالتين اليدوي والآلي، وأوجد عدد المسارات اللازمة و ذلك عند لحام قطعتين من الحديد الصناعي تناكبياً سماكة كل منها S = 36 mm مع شنفرة الحواف كما في الشكل، حيث يتم لحام المسار الأول يدوياً بالكترود قطره 4 mm و لحام المسارات الأخرى آلياً بالكترود قطره 5 mm تحت طبقة من الفلكس و بتيار مستمر، مع العلم أنه:



عند اللحام اليدوي: $K' = (35 - 50)$ A/ mm، $\eta_1 = 0.80$، $\alpha_{m1} = 10$ g /A..h

عند اللحام الآلي: $j = (30 - 50)$ A/ mm^2، $A = (20 - 25).10^3$ A.m/h، $\eta_2 = 0.90$، $\alpha_{m2} = 14$ g /A.h،

الوزن النوعي للفولاذ $\gamma = 7.8$ g /cm^3، ارتفاع بروز (مقدار التقوية) الدرزة اللحامية (g = 3 mm)

الحل: 1) حساب عناصر نظام اللحام في حالة اللحام اليدوي:

1- حساب شدة التيار: $I = K'.d = (35 - 50)d \rightarrow I = 42.5\ x\ 4 = 170A$ **(درجة واحدة)**

2- مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف:

$F_1 = (6 - 8)d_1 \rightarrow F_1 = 7\ x\ 4 = 28\ mm^2 = 0.28\ cm^2$ **(درجة واحدة)**

3- توتر القوس الكهربائي: $U_1 \cong 25\ V$ **(درجة واحدة)**

4- سرعة اللحام: $V_1 = \frac{\alpha_m .I}{3600 .\gamma .F_n} = \frac{10 .170}{3600 .7.8 .0.28} = 0.22\ \frac{cm}{sec.} \approx 7.92\ \frac{m}{h}$ **(درجة واحدة)**

5- إيجاد قيمة الطاقة الطولية بالعلاقة: $q_1 = \frac{0.24 .I .U.\eta}{V} = \frac{0.24 .170 .25 .0.8}{0.22} \approx 3709\ cal/c$ **(درجة واحدة)**

2) حساب عناصر نظام اللحام في حالة اللحام الآلي:

1- حساب شدة التيار: $I_2 = \frac{\pi d^2}{4}.J = \frac{\pi 5^2}{4}.40 = 785\ A.$ **(درجتان)**

2- مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف:

$F_2 = (8 - 12)d_2 \rightarrow F_2 = 10\ x\ 5 = 50\ mm^2 = 0.50\ cm^2$ **(درجة واحدة)**

3- توتر القوس الكهربائي: $U_2 = 20 + \frac{50 .10^{-3}}{d^{0.5}} I = 20 + \frac{50 .10^{-3}}{5^{0.5}}.785 = 37.6\ V$ **(درجة واحدة)**

4- سرعة اللحام: $V_2 = \frac{A}{I} = \frac{22.5 .10^3}{785} = 28.66\ \frac{m}{h} = 0.8\ \frac{cm}{sec}.$ **(درجة واحدة)**

5- إيجاد قيمة الطاقة الطولية بالعلاقة: $q_2 = \frac{0.24 .I .U.\eta}{V} = \frac{0.24 .785 .37.6 .0.9}{0.8} \approx 7969.32\ cal/cm$ **(درجة واحدة)**

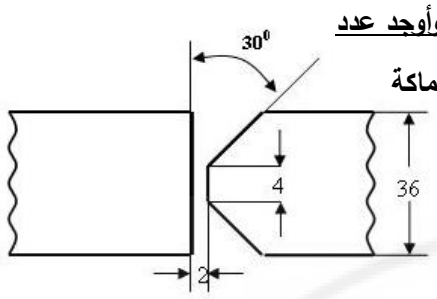
6- سرعة التغذية بسلك اللحام: $V_{electrode} = \frac{4 .\alpha_m .I}{\pi .d^2 .\gamma} = \frac{4.14.785}{\pi.5^2.7.8} = 71.8\ m/h$ **(درجة واحدة)**

3) حساب عدد المسارات (درجتان):

$$F = h^2 tg\frac{\alpha}{2} + b\ .S + \frac{2}{3}g\left(2htg\frac{\alpha}{2} + b + 6\right) = 32^2 tg30 + 2x36 + \frac{2}{3}x3(2x32tg30 + 2 + 6) = 753.10$$

$$n = \frac{F - F_1}{F_n} + 1 = \frac{753.10 - 28}{50} + 1 = 14.5 = 15$$

مثال (2): أوجد عناصر نظام اللحام في كلتا الحالتين اليدوي والآلي، وأوجد عدد المسارات اللازمة، وذلك عند لحام قطعتين من الفولاذ الكربوني تناكبياً سماكة كل منها S = 36 mm مع شنفرة الحواف كما في الشكل، حيث يتم لحام المسار الأوليدوياً بالكترود قطره 4 mm ولحام المسارات الأخرى آلياً بالكترود قطره 5 mm تحت طبقة من الفلكس و بتيار مستمر، مع العلم أنه:



عند اللحام اليدوي: $K' = (35 - 50)$ A/ mm، $\eta_1 = 0.80$، $\alpha_{m1} = 10$ g /A..h

عند اللحام الآلي: $j = (30 - 50)$ A/ mm^2، $A = (20 - 25).10^3$ A.m/h، $\eta_2 = 0.90$، $\alpha_{m2} = 14$ g /A.h،

الوزن النوعي للفولاذ $\gamma = 7.8$ g /cm^3 ، ارتفاع بروز (مقدار التقوية) الدرزة اللحامية (g = 3 mm)

الحل: 1) حساب عناصر نظام اللحام في حالة اللحام اليدوي:

1- حساب شدة التيار: $I = K'.d = (35 - 50)d \rightarrow I = 42.5\ x\ 4 = 170A$ **(درجة واحدة)**

2- مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف:

$F_1 = (6 - 8)d_1 \rightarrow\ F_1 = 7\ x\ 4 = 28\ mm^2 = 0.28\ cm^2$ **(درجة واحدة)**

3- توتر القوس الكهربائي: $U_1 \cong 25\ V$ **(درجة واحدة)**

4- سرعة اللحام: $V_1 = \frac{\alpha_m .I}{3600 .\gamma.F_n} = \frac{10 .170}{3600 .7.8 .0.28} = 0.22\frac{cm}{sec.} \approx 7.92\frac{m}{h}$ **(درجة واحدة)**

5- إيجاد قيمة الطاقة الطولية بالعلاقة: $q_1 = \frac{0.24 .I .U.\eta}{V} = \frac{0.24 .170 .25 .0.8}{0.22} \approx 3709\ cal/c$ **(درجتان)**

2) حساب عناصر نظام اللحام في حالة اللحام الآلي:

1- حساب شدة التيار: $I_2 = \frac{\pi d^2}{4}.J = \frac{\pi 5^2}{4}.40 = 785\ A.$ **(درجتان)**

2- مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف:

$F_2 = (8 - 12)d_2 \rightarrow\ F_2 = 10\ x\ 5 = 50\ mm^2 = 0.50\ cm^2$ **(درجة واحدة)**

3- توتر القوس الكهربائي: $U_2 = 20 + \frac{50 .10^{-3}}{d^{0.5}} I = 20 + \frac{50 .10^{-3}}{5^{0.5}}.785 = 37.6\ V$ **(درجة واحدة)**

4- سرعة اللحام: $V_2 = \frac{A}{I} = \frac{22.5 .10^3}{785} = 28.66\frac{m}{h} = 0.8\frac{cm}{sec}.$ **(درجة واحدة)**

5-إيجاد قيمة الطاقة الطولية بالعلاقة: $q_2 = \frac{0.24 .I .U.\eta}{V} = \frac{0.24 .785 .37.6 .0.9}{0.8} \approx 7969.32\ cal/cm$ **(درجة)**

6- سرعة التغذية بسلك اللحام: $V_{electrode} = \frac{4 .\alpha_m .I}{\pi .d^2 .\gamma} = \frac{4.14.785}{\pi.5^2.7.8} = 71.8\ m/h$ **(درجة واحدة)**

7- يمكن حساب مساحة المقطع العرضي لمعدن الدرزة المضاف من خلال معادلة السرعة كما يلي:

$\boldsymbol{V_1 = \frac{\alpha_m .I}{3600 .\gamma.F_n} \Rightarrow\ F_n = \frac{14\ x\ 785}{3600 .7.8 .0.8} = 0.50 Cm^2}$ **(درجة واحدة)**

3) حساب عدد المسارات (درجتان):

$F = h^2 tg\alpha + b\ .S + \frac{2}{3}g(2htg\alpha + b + 6) = 16^2 tg30 + 2x36 + \frac{2}{3}x3(2x16\ x\ tg30 + 2 + 12) = 278.75$

$n = \frac{F - F_1}{F_n} + 1 = \frac{278.75 - 28}{50} + 1 = 6.015 \cong 6$