جمهورية العراق

وزارة التربيـــة

المديرية العامة للتعليم المهني

العلوم الصناعية

الصناعي /اللحام وتشكيل المعادن

الثاني

تأليف

د. المهندس إحسان كاظم عباس

د. المهندس موسى عبدالرحيم خدادا د. المهندس أسيل حمد عبد

المهندس باسل محمد علي جعفر المهندس حسن عبدالله كاظم

الطبعة الثالثة ٢٠٢٤ م ـ ١٤٤٦هـ

المقدمة

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على سيد المرسلين رسول الله محمد وعلى آله الطاهرين وصحبه المنتجبين وبعد.....

دأبت المديرية العامة للتعليم المهني على إصدار الكتب المختلفة ولجميع التخصصات لتواكب التطور العلمي والصناعي، ولما كان تخصص اللحام وتشكيل المعادن من التخصصات المهمة في التعليم الصناعي؛ نظراً لاستيعابه أعداداً كثيرة من طلبتنا الأعزاء، وحاجة سوق العمل من القطاعات العامة والخاصة كافة وبمختلف أنشطتهما الإنتاجية والصناعية الصغيرة والكبيرة على حدٍ سواء فضلاً على أعمال الصيانة إلى كوادر واعية لاتجاهات المجتمع وآماله ورؤيته الجديدة ومسلحة بالعلم والمعرفة والمهارة، كُلفتْ لجنة مختصة بأعداد وتأليف كتاب العلوم الصناعية للمرحلة الثانية بهذا الخصوص.

اجتمعت اللجنة مرات عديدة وتدارست فيما بينها لوضع الأسس المنهجية والعلمية بكيفية أعداد الكتاب وتقسيم فصوله المختلفة، ليشمل المعرفة الأساسية المهمة بالاختصاص وهي عمليات اللحام والتشكيل للمعادن، وكان لدور **د. إحسان كاظم عباس** أحد مؤلفي الكتاب الفضل الكبير بعد الله تعالى في هذا الموضوع.

يتألف الكتاب من جزئين أساسيين، يتضمن الجزء الأول طرائق وتقنيات اللحام وهو بواقع ستة فصول، أما الجزء الثاني فيتضمن طرائق تشكيل المعادن؛ إذ تضمن الفصل الأول موضوع تصنيف عمليات اللحام المختلفة وإعطاء نبذة مختصرة لكل طريقة مع مخطط توضيحي لشجرة عائلة اللحام، في حين تضمنت الفصول الثاني والثالث والرابع لحام الحالة السائلة، إذ اختص الفصل الثاني بمجموعة طرائق لحام القوس الكهربائي بقسميها الأقطاب المستهلكة وغير المستهلكة، واختص الفصل الثالث بطرائق لحام المقاومة الكهربائية واحتوى الفصل الرابع على لحام الوقود الغازي. وتضمن الفصل الخامس لحام الحالة السائلة-الصلبة وأنواعها التي تشمل لحام القصدرة ولحام المونة، أما طرائق لحام الحالة الصلبة بمجموعتيها لحام الحالة الصلبة بالتشوه اللدن وبالانتشار فقد تم تناولها في الفصل السادس. أما طرائق التشكيل الكتلوي: الدرفلة، الحدادة، البثق، والسحب فقد تم التطرق إليها بالفصل السابع وتناول الفصل أيضاً موضوع التشكيل على البارد والتشكيل على الساخن وكيفية التمييز فيما بينهما لأهمية الموضوع في أعمال التشكيل المختلفة، أما أعمال الصفائح من قص وتشكيل فقد تضمنها الفصل الثامن الاخير.

أحتوى الكتاب على مجموعة من الصور والمخططات والجداول لتعزيز المفهوم العلمي وتبسيطه لطلبتنا الأعزاء.

تمت الإشارة إلى بعض التحليلات الهندسية والرياضية البسيطة وغير المعقدة ليستطيع الطالب أن يدرك معنى الطاقة وفائدتها في تنفيذ عمليات اللحام أو التشكيل ومقدار خسائرها ليتجنب الاستهلاك المفرط للطاقة وتنفيذ النصائح العالمية في موضوع ترشيد الطاقة والحفاظ على البيئة التي أصبحت معيار تقدم البلدان وعلاقتها الوطيدة في مشاكل العصر الحالي مثل التغيرات المناخية السلبية والكوارث البيئية فضلاً على التلوث والسموم المختلفة التي تضر الأنسان والحياة بصورة عامة.

لقد روعي استخدام الوحدات والرموز بالنظام العالمي للوحدات (SI)، كذلك أتبع النظام العشري بتبويب الكتاب، فيشير الرقم الأول إلى اليمين رقم الفصل ومن ثم رقم الفقرة ومن ثم رقم الفقرة الفرعية. وتم تثبيت المصطلح الأجنبي المتعارف عليه إزاء المصطلح العربي أول وروده في متن الكتاب، علماً أن الموضوعات التي سبق وأن درسها الطالب في المرحلة الأولى والتي تُعد الأساس العلمي لمادة هذا الكتاب لم يرد تكرارها.

أن المديرية العامة للتعليم المهني لترجو أن ينمو ويتطور كادرها التدريسي تطوراً خلاقاً لرفع المستوى العلمي لطلبتنا وتنمية وتغذية الفكر الإنساني والنهوض بالمسؤوليات والواجبات على وفق ما تتطلبه آفاق التنمية الوطنية من مستوى مرهف في التفكير والعمل لمواجهة تحديات العصر. وأملنا وطيد في أن يوافينا الأساتذة الأفاضل والمختصون بملاحظاتهم ومقترحاتهم للإفادة منها في طبعة الكتاب التالية.

لا يسعنا في الختام إلا التنويه بالتشجيع والدعم والمساعدات المستمرة التي لقيناها من السادة المسؤولين في المديرية العامة للتعليم المهني خاصة ووزارة التربية عامة، فلهم منا جميعاً جزيل الشكر والثناء، وكذلك نود أن نعبر عن تقديرنا العالي واحترامنا المقرون بتواضعنا تجاه أساتذتنا الأفاضل الذين لم يتهاونوا أو يبخلوا بجهدهم يوماً ما في تعليمنا ووضعنا على قاعدة علمية سليمة وخصوصاً أساتذتنا في هذا التخصص ومنهم المرحوم **د. شاكر خلف السامرائي**، **د. قاسم محمد دوس** عميد كلية الهندسة الحالي في جامعة بغداد وغيرهم كثيرون لا يسع المجال لذكرهم جميعاً، ونسأله تعالى أن يوفقنا ويسدّد خطانا إلى ما فيه الخير والفلاح، إنه ولىّ التوفيق.

المؤلفون

بغداد - 2013

المحتويات

		ص
الفصل الأول	**الفصل الأول**	ص
	تصنيف عمليات اللحام	6
	مقدمة الفصل	7
	عمليات التجميع	7
	اللحام	8
	تصنيف عمليات اللحام	9
	لحام الحالة السائلة	11
	لحام الحالة الصلبة	15
	لحام الحالة السائلة-الصلبة	18
	أنواع وصلات اللحام	22
	أسئلة الفصل الأول	25
الفصل الثاني	**الفصل الثاني**	
	لحام القوس الكهربائي	26
	مقدمة الفصل	27
	لحام القوس الكهربائي	28
	طرائق لحام القوس الكهربائي	36
	طرائق لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المستهلكة	36
	طرائق لحام القوس الكهربائي بالأقطاب غير المستهلكة	43
	أسئلة الفصل الثاني	46
الفصل الثالث	**الفصل الثالث**	
	لحام المقاومة الكهربائية	48
	مقدمة الفصل	49
	متغيرات لحام المقاومة الكهربائية	50
	طرائق لحام المقاومة الكهربائية	55
	لحام المقاومة النقطي	55
	أنواع مكائن لحام المقاومة النقطي	60
	لحام المقاومة الكهربائية الخطي	62
	لحام المقاومة الكهربائية ذو البروز	65
	أسئلة الفصل الثالث	67
الفصل الرابع	**الفصل الرابع**	
	لحام الوقود الغازي	68
	مقدمة الفصل	69
	لحام الأوكسي-أستيلين	70
	آلية توليد الحرارة	71
	أنواع الشُعلة	73
	مُعدات اللحام	76
	تجهيز الغازات	80
	أسئلة الفصل الرابع	89

		ص
الفصل الخامس	**الفصل الخامس**	
	لحام الحالة السائلة-الصلبة	90
	مقدمة الفصل	91
	لحام القصدرة ولحام المونة	92
	لحام القصدرة	98
	آلية لحام القصدرة	100
	طرائق القصدرة	102
	لحام المونة	104
	آلية لحام المونة	107
	طرائق لحام المونة	109
	الربط باللصق	111
	أسئلة الفصل الخامس	114
الفصل السادس	**الفصل السادس**	
	لحام الحالة الصلبة	115
	مقدمة	116
	نظرة عامة في لحام الحالة الصلبة	116
	تصنيف طرائق لحام الحالة الصلبة	118
	طرائق لحام الحالة الصلبة بالتشوه اللدن	118
	طرائق لحام الحالة الصلبة بالانتشار	128
	أسئلة الفصل السادس	138
الفصل السابع	**الفصل السابع**	
	تشكيل المعادن	139
	مقدمة الفصل	140
	عمليات تشكيل المعادن	140
	التشكيل على البارد وعلى الساخن	141
	عمليات التشكيل الكتلوي	142
	الدرفلة	143
	الحدادة	152
	بثق المعادن	159
	السحب	163
	أسئلة الفصل السابع	166
الفصل الثامن	**الفصل الثامن**	
	أعمال الصفائح المعدنية	167
	عمليات القطع	169
	عمليات تشكيل الصفائح المعدنية	174
	السحب العميق	176
	أسئلة الفصل الثامن	181

الفصل

الأول

تصنيف عمليات اللحام

Classification of Welding Processes

الأهداف

الهدف العام

سيتمكن الطالب في هذا الفصل من معرفة تصنيف عمليات اللحام و طرائقه وتقنياته وأهمية كل طريقة في عمليات التصنيع المختلفة، ويمكنه أن يميز بين هذه الطرائق وميزات وسلبيات كل طريقة ليتمكن من بعدها من تحديد الطريقة الصحيحة المناسبة لكل حالة من حالات اللحام ولكل نوع من أنواع المعادن وسبائكها.

الأهداف الخاصة

بعد إنهاء دراسة مفردات الفصل الأول وفهمه سوف يكون الطالب قادراً على الآتي:

1. يتعرف على أنواع عمليات التجميع.
2. يتعرف على عملية اللحام.
3. يتعرف على الأهمية التكنولوجية والتجارية للحام.
4. يتعرف ويصنف المجموعات الثلاث الرئيسة لطرائق اللحام.
5. يفهم شجرة اللحام.
6. يتعرف على أنواع اللحام بالحالة السائلة.
7. يتعرف على مصادر الطاقة الحرارية لطرائق اللحام بالحالة السائلة.
8. يتعرف على اللحام بالحالة الصلبة.
9. يحدد ويقارن بين اللحام بالتشوه واللحام بالانتشار.
10. يتعرف على أنواع اللحام بالحالة السائلة الصلبة، ويقارن بين القصدرة ولحام المونة.
11. يتعرف على عملية اللصق، ويميز بين أنواع المواد اللاصقة.
12. يفهم أنواع وصلات اللحام ويقارنها مع أنواع اللحام.

تصنيف عمليات اللحام Classification of Welding Processes

1-1 مقدمة Introduction

إن التقدم الصناعي الذي يُعد السمة البارزة في عصرنا الحالي مدين للتطور الذي أحدثته التقنيات الحديثة في طرائق التصنيع ووسائل الإنتاج، التي تتطور بقفزات واسعة وخاصة خلال العقود الخمسة الأخيرة تزامناً مع الاكتشافات الجديدة المهمة للمواد الهندسية التي استطاعت الحضارة الإنسانية تسخيرها للعملية التصنيعية، فضلاً على إيجاد بدائل مهمة للمواد التقليدية وتحسين خواصها بكلف رخيصة نسبياً أدت إلى تقليص كلف الإنتاج. ومن الجدير بالذكر أن التطور التكنولوجي الذي جعل العالم قرية صغيرة زاد من فرص التنافس بين دول العالم ناهيك من الشركات الصناعية وسباقها مع الزمن لغرض فرض هيمنة منتجاتها، أدى ذلك إلى زيادة وسرعة تطور العمليات التصنيعية.

تُعرف عمليات التصنيع المختلفة على أنها مجموعة الإجراءات المصممة الناتجة من التغيرات الفيزيائية أو الكيميائية أو يجتمعان معاً على المادة الخام الأولية والتي تحولها إلى مادة (قطعة عمل) إنتاجية ذات قيمة أعلى من حالتها الأولية، وتنقسم عمليات التصنيع إلى قسمين أساسيين: الأول هو العمليات الإجرائية التي تتضمن طرائق التصنيع المختلفة التي تحول مادة العمل من حالة إلى حالة أخرى متقدمة قريبة من المنتج النهائي المرغوب ومنها عمليات السباكة، التشكيل، التشغيل، تكنولوجيا مساحيق المعادن، تعزيز (تحسين) الخواص، وأخيراً عمليات السطح من تنظيف وطلاء وغيرها. أما القسم الثاني فيتضمن عمليات التجميع والربط المختلفة للأجزاء المنتجة من القسم الأول لعمليات التصنيع أعلاه لإنتاج وحدة جديدة مُجمعة. تنقسم عمليات التجميع والربط إلى قسمين: عمليات الربط الدائمي، وعمليات الربط غير الدائمي (الربط الميكانيكي) المختلفة، والتي سيتم تناولها في هذا الفصل.

2-1 عمليات التجميع Assembly Operations

تُعرف عمليات التجميع على أنها جميع عمليات الربط الدائمي (Permanently Joining) والربط غير الدائمي (Semi-Permanently Joining) لقطعتين مجزأتين أو أكثر من قطع عمل معينة لغرض إنتاج وحدة تجميعية مفيدة لحالة تصنيعية معينة. عمليات الربط الدائمي تتضمن طرائق اللحام المختلفة (Welding)، ولحام القصدرة والمونة (Soldering & Brazing)، واللحام البارد (اللصق) بالمواد العضوية وغيرها (Adhesive Bonding). أما عمليات الربط غير الدائمي فتتضمن جميع أنواع الربط الميكانيكي باستخدام المسننات (البراغي وغيرها) (Threaded Fasteners)، والربط التداخلي بالضغط (Press Fitting)، والبرشام (Rivet) ولو أن الأخير في بعض المصادر العلمية يتم عدُّه أحد أنواع الربط الدائمي، لاحظ جدول (1-1).

جدول 1-1 تصنيف عمليات التجميع المختلفة

عمليات التجميع Assembly Operations				
عمليات الربط الدائمي Permanent Joining Processes			الربط الميكانيكي Mechanical Fastening	
اللحام Welding	لحام القصدرة والمونة Soldering and Brazing	اللصق Adhesive Bonding	الربط بالمسننات Threaded Fasteners	الربط الميكانيكي الدائمي Permanent Fastening

3-1 اللحام Welding

هو عملية ربط قطعتين معدنيتين أو أكثر عند منطقة أسطح تقابلهم بتسليط مناسب للحرارة أو الضغط أو كليهما. وتكون المجموعة الناتجة عبارة عن وصلة دائمة لا يمكن تفكيكها دون إيقاع الضرر بالأجزاء المربوطة، أغلب عمليات اللحام تتم بتسليط حرارة فقط دون تسليط ضغط، وأخرى تتم بتسليط حرارة وضغط، ويبقى هناك عمليات لحام تتم بتسليط ضغط فقط دون تسليط حرارة خارجية، كما سيتم إيضاحها في الفقرات اللاحقة عند التطرق لموضوع تصنيف طرائق اللحام. في بعض عمليات اللحام لابد من استعمال مادة مضافة (مادة حشو) (Filler Material) لإتمام عملية اللحام. مجموعة الأجزاء المربوطة في هذه العمليات تسمى بالملحومة (Weldment). ينجز اللحام عادة للأجزاء المصنعة من المعدن نفسه، وفي بعض التطبيقات يمكن أن يتم لأجزاء مصنوعة من معادن أو سبائك مختلفة. من الضروري قبل البدء في دراسة اللحام يجب التعرف على قواعد السلامة وطرائق الوقاية واتباعها، فهنالك كثير من العاملين يتعرضون يومياً لمخاطر اللحام لأسباب تعود إلى عدم التزامهم بقواعد السلامة المهنية الواجب تطبيقها كي يكون العمل في هذا المجال محدود المخاطر.

الأهمية التكنولوجية والتجارية لعمليات اللحام تكمن في النقاط الآتية:

1. يجهز اللحام ربطاً دائمياً ينتج عنه ملحومة بقطعة كاملة واحدة تؤدي الغرض المطلوب الذي صممت لأجله. إن بعض عمليات اللحام لا تتحدد بموقع عمل خاص أو ببيئة معينة، يمكن أن تنجز موقعياً.
2. قد تكون الملحومة أقوى من المواد الأصلية (قطع العمل) وخصوصاً إذا أضيفت مادة إملاء لها القابلية على تحسين وتعزيز الخواص الميكانيكية، وباستعمال تقنيات اللحام المناسبة الصحيحة.
3. اللحام عادة هو من أكثر الطرائق اقتصادياً لربط الأجزاء من حيث الاستفادة القصوى للمادة فضلاً على كلف الإنتاج، إذ إن الطرائق البديلة للربط والتجميع تحتاج إلى عمليات تشكيل معقدة مثل عمل الثقوب وأجزاء الربط الميكانيكية كالبراغي وغيرها، ومن البديهي أن المجموعات الناتجة عن الربط الميكانيكي تكون أثقل من الملحومات.

بالرغم من مزايا طرائق اللحام المختلفة المذكورة أعلاه، لكن هنالك محددات معينة لكل طريقة من طرائق اللحام وهي كما يأتي:

1. معظم طرائق اللحام تنجز يدوياً، ومن الطبيعي أن العمل اليدوي مُكلف نسبياً بسبب الكلف العالية للأيدي العاملة الماهرة (النادرة) التي يحتاجها هذا العمل.
2. أغلب طرائق اللحام تُعد خطرة بسبب استعمال مصادر الطاقة العالية.
3. اللحام من طرائق الربط الدائمي الذي لا يتلاءم مع مبدأ التجميع والتفكيك، التي تحتاجها بعض المنتجات لأغراض التصليح والصيانة.
4. بعض الملحومات تعاني من عيوب نوعية لا يمكن اكتشافها بصرياً، إلا باستعمال أجهزة وتقنيات خاصة، هذه العيوب تؤدي إلى إضعاف (نقصان) قوة الربط وبالتالي فشل الملحومة عند الاستخدام.

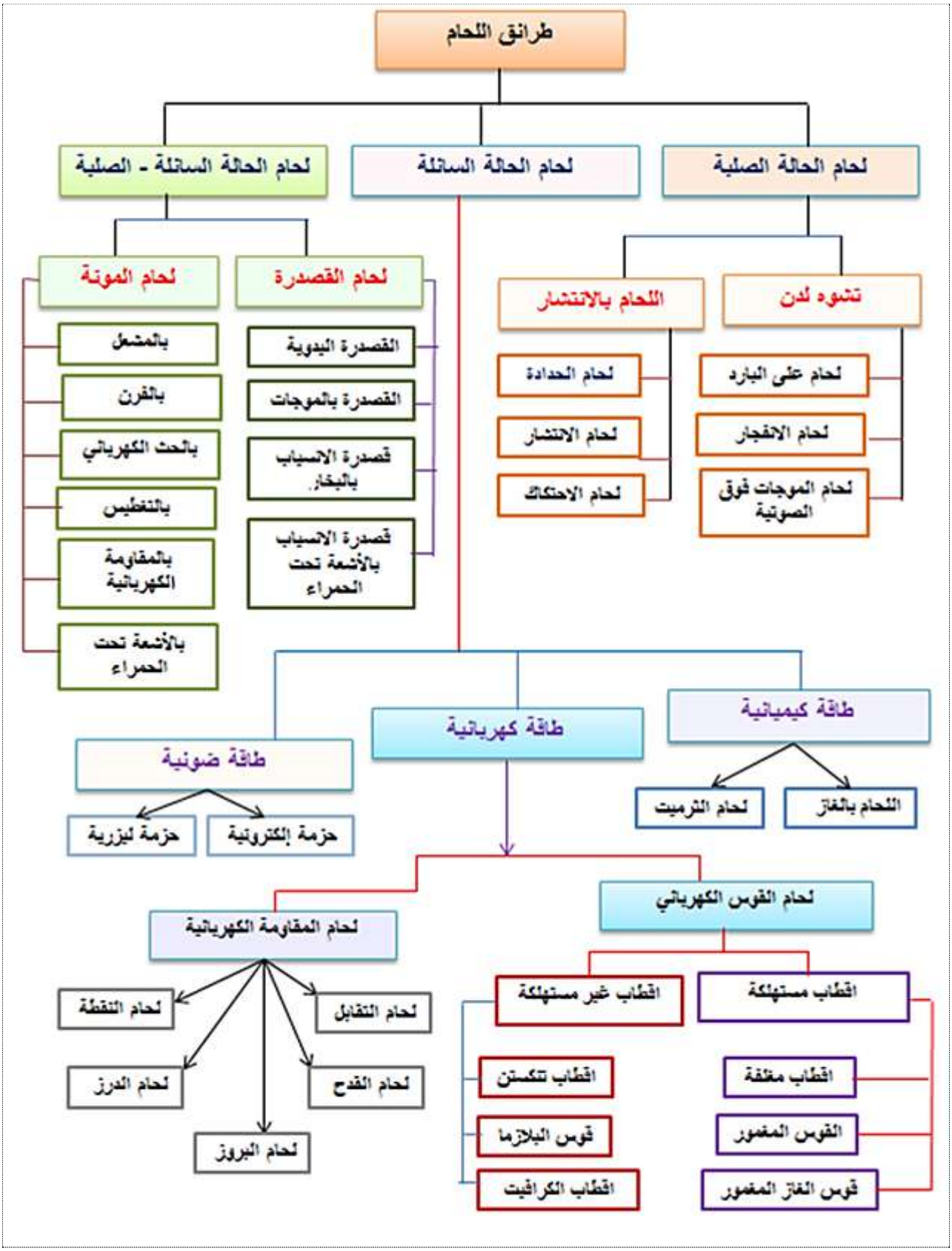
4-1 تصنيف عمليات اللحام Classification of Welding Processes

يوجد بحدود 50 نوعاً مختلفاً من طرائق عمليات اللحام صُنفتْ بحسب جمعية اللحام الأمريكية American Welding Society (AWS). تستخدم طرائق اللحام أنواعاً مختلفة من الطاقة أو طاقات مؤتلفة لتجهيز القدرة اللازمة لإتمام عملية اللحام.

تصنف عمليات اللحام إلى ثلاثة أقسام رئيسة على وفق (ISO-4063) وهي كالآتي:

- لحام الحالة السائلة (المنصهرة) Fusion Welding
- لحام الحالة الصلبة Solid-State Welding
- لحلم الحالة السائلة – الصلبة Liquid–Solid State Welding

جميع أقسام عمليات اللحام الرئيسة أعلاه تنقسم إلى طرائق متعددة ومختلفة بالاعتماد على نوع الطاقة المطلوبة وطريقة تجهيزها لعملية اللحام، فضلاً على أنواع الوصلات وأشكالها. شكل (1-1) يبين التصنيف العام لطرائق عمليات اللحام (شجرة اللحام). من الجدير بالذكر أن الطرائق المذكورة في الشكل لا تشمل جميع التقنيات المعروفة في الوقت الحاضر ولا سيما اللحام للأجزاء المتناهية الصغر (المايكروية)، اللصق بالمواد الطبيعية التي مصدرها حيواني أو نباتي والتركيبية اللدائنية وغير العضوية، والتي تصنف في بعض المصادر العلمية بإحدى طرائق لحام الحالة السائلة – الصلبة. إن لكل طريقة من الطرائق المذكورة في الشكل أساليبها المختلفة بحسب الحاجة لتطبيقات معينة لا يسع المجال لذكر جميعها، إنما اقتصرت فقط على الطرائق الرئيسة ونترك للطالب معرفتها والتدريب عليها في مراحل دراسية قادمة.



شكل 1-1 تصنيف طرائق اللحام (شجرة اللحام)

5-1 لحام الحالة السائلة (الانصهار) Fusion Welding

مجموعة كبيرة جداً تتضمن طرائق مختلفة ومتباينة بتقنيات تقليدية وأخرى حديثة ومتطورة جداً، إذ يتم صهر مناطق اللحام المتداخلة للأجزاء المراد ربطها مع بعضها بعضاً. تُعد الطاقات الكهربائية، الكيميائية، والضوئية مصادر للحرارة المستخدمة لصهر المعادن الأساسية المكونة للملحومة. يضاف إلى مناطق اللحام مواد على شكل أسلاك أو بأشكال مختلفة مصنوعة من نفس مادة الجزء الأساس أو من سبائك معدنية مناسبة أخرى لإتمام عملية اللحام وفي نفس الوقت تحسين خواص الملحومة، وفي بعض الأحيان تتم عملية اللحام هذه من دون إضافات وتسمى **لحام ذاتي** (Autogenous Weld)، مجموعة لحام الحالة السائلة يمكن تقسيمها على أساس مصادر الطاقة التي ينتج عنها حرارة اللحام وهي كالآتي:

1-5-1 اللحام باستخدام الطاقة الكهربائية Welding by Using Electrical Energy

يستفاد من الطاقة الكهربائية لتوليد الحرارة اللازمة لصهر الأجزاء المتداخلة المتقابلة من المعادن أو سبائكها للحصول على الملحومة المطلوبة، ينقسم هذا النوع من اللحام على مجموعتين أساسيتين هما لحام القوس الكهربائي ولحام المقاومة الكهربائية.

لحام القوس الكهربائي Arc Welding

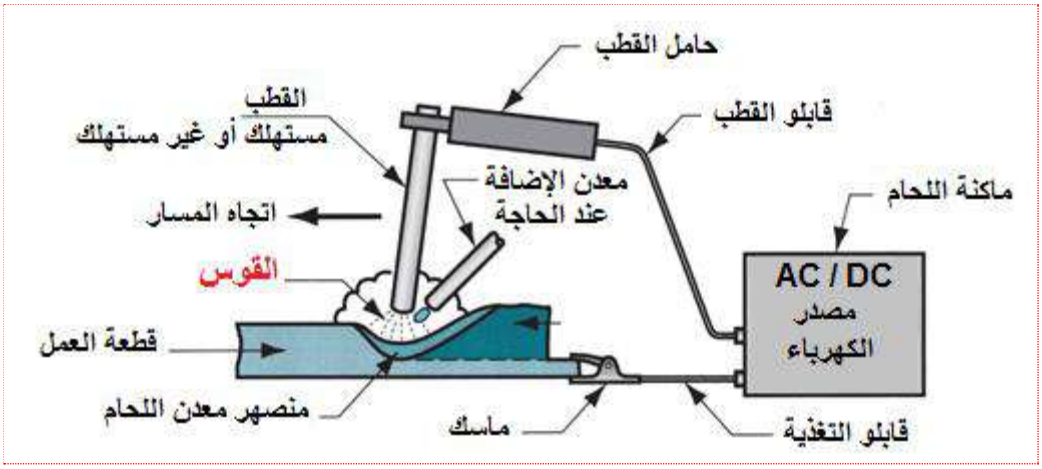
ويرمز له بالرمز (AW) وهو مجموعة واسعة من طرائق اللحام ولها تطبيقات كثيرة ومهمة في الصناعة، الحرارة المتولدة اللازمة لصهر الأسطح المتداخلة للأجزاء المراد لحامها ناتجة من القوس الكهربائي، الشكل (1-2) يوضح مخطط لعملية اللحام بالقوس الكهربائي، في بعض تطبيقات اللحام بالقوس الكهربائي يسلط ضغط معين في أثناء عملية اللحام، من الجدير بالإشارة أن نفس الأسلوب يستعمل لقطع المعادن بالقوس الكهربائي أيضاً. في هذا الفصل سيتم ذكر طرائق اللحام بالقوس الكهربائي فحسب، وسيتم تناولها بالتفصيل في الفصل اللاحق، وهي كالآتي:

1. **الأقطاب المستهلكة** وتتضمن التقنيات الآتية:

- **الأقطاب المُغلفة بمواد كيمياوية مُساعدة للصهر وتزود منطقة اللحام في هذه الحالة بحجاب يمنع وصول الهواء للمنطقة، ويرمز لها (SMAW).**
- **الأقطاب العارية المغمورة بالغاز الخامل مثل الآركون، ويرمز لها (GMAW).**
- **الأقطاب المجوفة وفي داخلها مساعد الصهر، ويرمز لها (FCAW).**
- **الأقطاب المُغلفة والمحاطة بالغاز المغمور، ويرمز لها (EGW).**
- **الأقطاب العارية المغمورة بمساعد صهر حبيبي، ويرمز لها (SAW).**

2. **الأقطاب غير المستهلكة** وتتضمن التقنيات الآتية:

- **أقطاب التنكستن مع الغاز الخامل، ويرمز لها (GTAW) والمصطلح (TIG) غالباً ما يشير إلى هذا النوع من تقنيات اللحام.**
- **أقطاب التنكستن مع تيار من البلازما وهي حالة خاصة من سابقتها، ويرمز لها (PAW).**
- **أقطاب الكرافيت وأنحسر استعمال هذه التقنية في الوقت الحاضر بالرغم من كونها الأولى بالاستعمال بلحام القوس الكهربائي، ويرمز لها (CAW).**



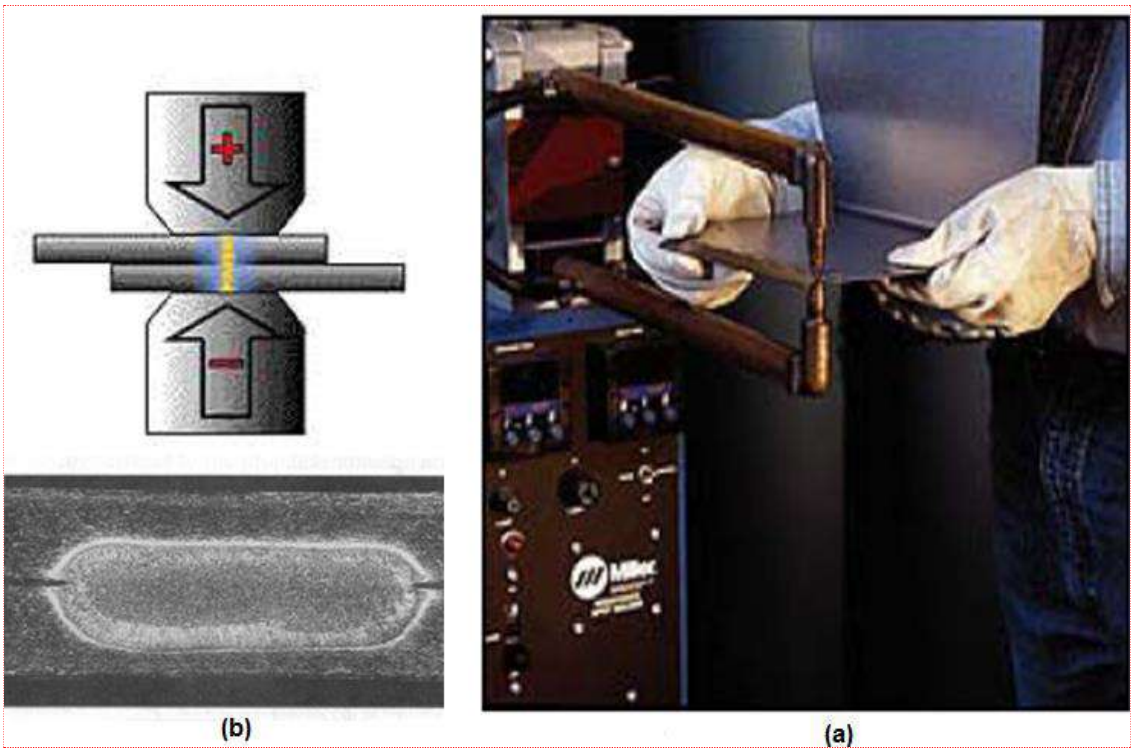
شكل 1-2 مخطط لعملية لحام بالقوس الكهربائي

تجدر الإشارة إلى وجود تقنية خاصة من اللحام بالقوس الكهربائي لتثبيت براغي عديمة الرأس (وتد) أو ما شابه على قاعدة ويرمز لهذه التقنية بـ (SW).

لحام المقاومة الكهربائية Resistance Welding

يُعد لحام المقاومة الكهربائية من مجموعة لحام الحالة السائلة (لحام الانصهار) الذي تستخدم فيه الطاقة الحرارية والضغط بالتزامن لإنجاز عملية اللحام. إن الحرارة اللازمة لعملية اللحام تتولد من المقاومة الكهربائية لسريان التيار الكهربائي في منطقة اللحام، والشكل (1-3) يوضح العناصر الرئيسة لعملية لحام النقطة، إحدى أهم مجموعة عمليات لحام المقاومة الكهربائية. يرمز للحام المقاومة الكهربائية (RW) وأنواعها هي كالآتي:

- لحام النقطة، الأكثر استعمالاً في هذه المجموعة ويرمز له بـ (RSW).
- لحام الخط (الدرز)، ويستعمل في لحام خزانات السوائل وما شابه ويرمز له بـ (RSEW).
- لحام البروز، ويستعمل في لحام الصفائح وخصوصاً السميكة منها ويرمز له بـ (RPW).
- لحام التقابل، ويستعمل في لحام الأسلاك المعدنية والأنابيب ويرمز له بـ (FW).
- لحام المقاومة عالي التردد، ويرمز له بـ (HFRW).



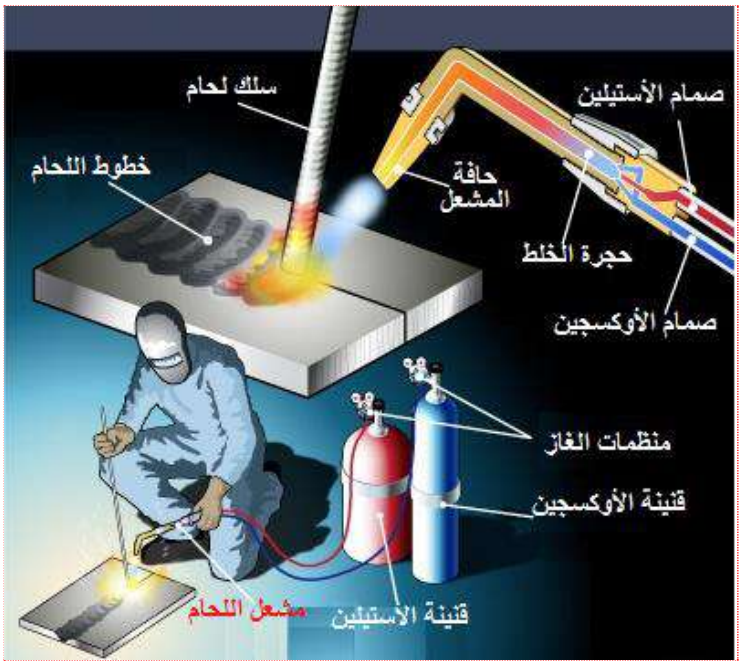
شكل 1-3 لحام المقاومة الكهربائية النقطي (a) عملية اللحام،
(b) مخطط مقطعي مع صورة مجهرية لمنطقة اللحام

1-5-2 اللحام باستخدام الطاقة الكيميائية Welding by Using Chemical Energy

تتولد الحرارة اللازمة لهذا النوع من طرائق اللحام عن طريق تحويل الطاقة الكيمياوية الناتجة من التفاعلات الكيمياوية إلى طاقة حرارية تعمل على صهر المناطق المراد لحامها. تنقسم هذه المجموعة على فرعين أساسيين هما اللحام الغازي ولحام الثرميت.

اللحام الغازي Gas Welding

يُعد اللحام الغازي أحد أنواع لحام الحالة السائلة (الانصهار)، إذ تتولد حرارة عالية نتيجة اشتعال الوقود الغازي بإضافة الأوكسجين إليها، وتستعمل في صهر مناطق اللحام أو صهر المادة المضافة، ولهذا يسمى لحام الوقود الغازي Oxy-fuel Gas Welding ويرمز له بـ (OFW)، شكل (1-4) يبين مخطط عملية اللحام الغازي. الغازات الشائعة الاستعمال هي (الأستيلين، الهيدروجين، البروبان، الغاز الطبيعي، وغيرها). يُعد لحام الأوكسي-أستيلين أحد أهم أنواع هذه المجموعة لتوليده الحرارة العالية والتي تتجاوز درجة الحرارة في بركة اللحام إلى 3480°C والتي يستفاد منها في صهر مناطق اللحام، وفي بعض الأحيان تستعمل هذه التقنية لقطع المعادن ومنها سميكة المقطع، يرمز لهذا النوع من اللحام بـ (OAW). ومن الجدير بالذكر أن اللحام الغازي يستعمل أيضا بمجموعة لحام الحالة السائلة – الصلبة ولكن الحرارة المتولدة تكون أقل من سابقتها بكثير.



شكل 1-4 مخطط لعملية اللحام الغازي

لحام الثرميت Thermit Welding

لحام الثرميت أحد أنواع لحام الحالة السائلة، إذ إن الحرارة اللازمة للحام تنتج من المعدن المنصهر فائق الحرارة الناتج من التفاعل الكيمياوي للثرمايت (Thermite) الذي هو عبارة عن خليط من مسحوق الألمُنيوم وأوكسيد الحديد عند قدحه، يرمز لعملية لحام الثرميت بـ (TW). إن معدن الإضافة يحصل عليه من المعدن المنصهر للثرمايت. وتُعرف هذه الطريقة كونها عملية سباكة وليست عملية لحام كما في بعض المصادر العلمية، بسبب أسلوبها في وصل وربط قطع العمل التي تستعمل في بعض الأحيان لتصليح الشروخ التي تحدث للسبائك الحديدية، يبين الشكل (1-5) عملية لحام الثرميت لتصليح قضبان السكك الحديدية.

شكل 1-5 مخطط لعملية لحام الثرميت

3-5-1 اللحام باستخدام الطاقة الضوئية Welding by Using Light Energy

طريقة خاصة من طرائق اللحام للحالة السائلة، إذ تستعمل طاقة الحزمة الضوئية المركزة جداً (حزمة ليزرية) لتوليد الحرارة اللازمة لصهر الحافات الضيقة والعميقة لمناطق اللحام، تتصف الملحومات المنتجة بهذه التقنية بجودة عالية جداً، يرمز للحام بحزمة الليزر (LBW). وهنالك تقنية أخرى منافسة ومشابهة لهذه التقنية وهي اللحام بحزمة الإلكترون والتي يرمز لها بـ (EBW) إذ تتولد حرارة اللحام من تسليط حزمة بكثافة عالية جداً من الإلكترونات على سطح منطقة اللحام. تمتاز تقنية اللحام بحزمة الليزر عن اللحام بحزمة الإلكترون بمزايا عديدة منها: عدم الحاجة إلى حجرة مفرغة من الهواء (إخواء)، بالإمكان توجيه حزمة الليزر بوساطة العدسات، عدم انبعاث أشعة-X في أثناء اللحام، التقنيتان المذكورتان لهما تطبيقات مهمة في الصناعة وخصوصاً بعد تطور الأجهزة والمُعدات اللازمة لذلك.

6-1 لحام الحالة الصلبة Solid State Welding

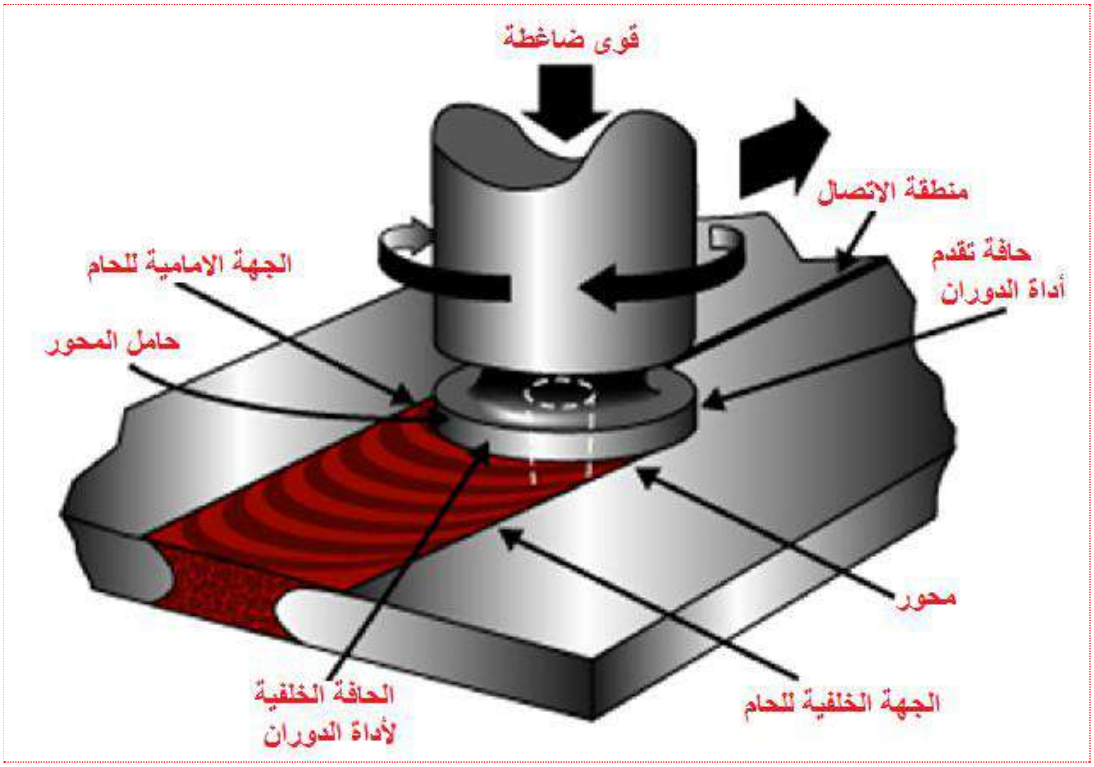
تنجز عملية اللحام بالحالة الصلبة بدون انصهار المناطق المتداخلة المراد لحامها لقطعتي العمل، وتتم إما بتسليط ضغط فقط أو ضغط مع حرارة، إن كمية الحرارة المسلطة في هذه الحالة لوحدها لن تكون كافية لإنجاز عملية اللحام دون الضغط، أي بعبارة أخرى أن الحرارة المزودة لن ترفع درجات الحرارة إلى درجات انصهار المعادن المراد لحامها (لا وجود لطور السائل)، إنما فقط لإتمام عملية اللحام بالضغط وبجودة عالية وكلٍ حسب التقنية المستعملة ونوع المعدن المستعمل. في أغلب طرائق اللحام بالحالة الصلبة زمن عملية اللحام يُعد عاملاً مهماً. لا يتم استعمال مواد منصهرة مضافة في حالة اللحام بالحالة الصلبة. يتكون في معظم طرائق اللحام بالحالة الصلبة ارتباط معدني من نوع معين بين ذرات المعدن الأساس لقطع العمل في منطقة التداخل، لهذا يشترط أن تكون الأسطح المتقابلة نظيفة وخالية من أية شوائب. يرمز إلى لحام الحالة الصلبة بـ (SSW)، يصنف لحام الحالة الصلبة إلى مجموعتين رئيستين هما لحام الحالة الصلبة بالانتشار ولحام الحالة الصلبة بالتشوه اللدن.

1-6-1 اللحام بالانتشار Diffusion Welding

تنجز عملية اللحام بهذا النوع بتسليط ضغط على قطعتي العمل المراد لحامها بارتفاع درجات الحرارة، وتتم عملية اللحام بالانتشار بين ذرات الأسطح المتلامسة من خلال حاجز (خط) التداخل لقطعتي العمل، ودرجة الحرارة لا تتجاوز نصف درجة انصهار المعدن الأساس وتأخذ عادة درجة حرارة الانصهار الأدنى في حال استعمال معدنين غير متشابهين، إذ يمكن لحام معادن غير متشابهة (Dissimilar Metals) بهذه الطريقة فضلاً على لحام المعادن المتشابهة (Similar Metal).

أهم أنواع اللحام بالانتشار هي:

- لحام الحدادة، من أقدم طرائق اللحام تاريخياً، إذ تسخن قطعتا العمل إلى درجات حرارة عالية قبل استخدام الطَرق أو أي نوع من الحدادة لإنجاز عملية اللحام، ويرمز لها بـ (FOW).
- لحام الضغط الساخن، نوع خاص من أنواع لحام الحدادة، ويرمز له بـ (HPW).
- لحام الانتشار، تحتاج العملية إلى زمن قد يتجاوز الساعة في بعض التطبيقات، ويرمز لها بـ (DFW).
- لحام الاحتكاك، تنجز عملية اللحام بهذا النوع من الحرارة المتولدة من الاحتكاك بالتزامن مع الضغط المسلط على قطعتي العمل، ويرمز لها بـ (FRW).
- لحام الاحتكاك والمزج بالحركة، بالرغم من كونها طريقة جديدة من طرائق اللحام ولكن لها تطبيقات واسعة حالياً وخصوصاً في لحام بعض الأجزاء المهمة في الطائرات والمركبات الفضائية وغيرها، ويرمز لها بـ (FSW)، والشكل (1-6) يوضح عملية هذا النوع من اللحام.

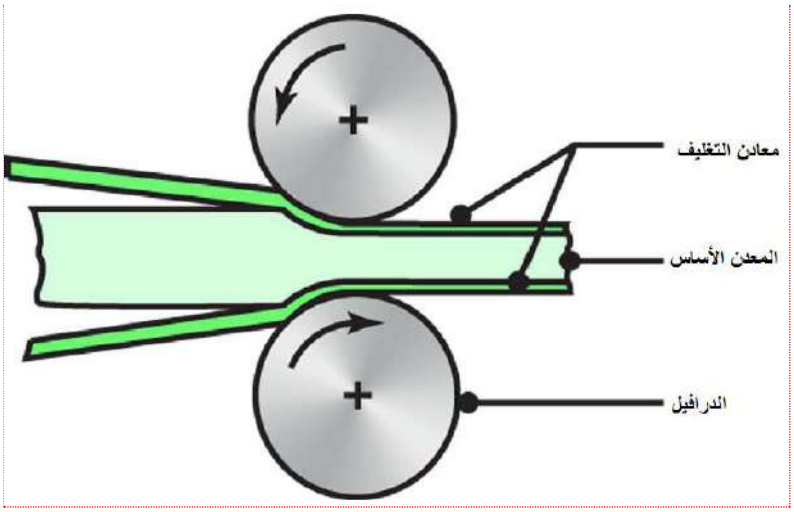


شكل 1-6 مخطط عملية اللحام بالاحتكاك والمزج بالحركة

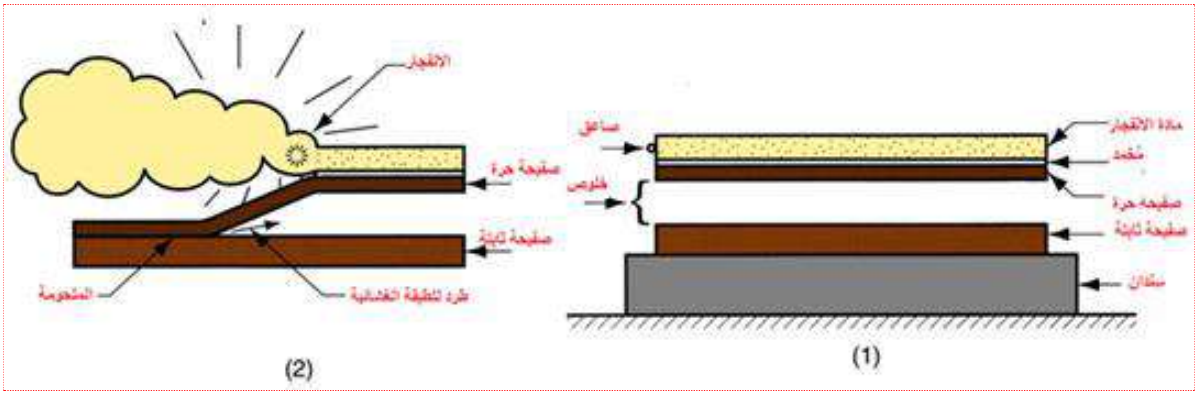
2-6-1 اللحام بالتشوه اللدن Plastic Deformation Welding

تنجز عملية اللحام لهذا النوع بتسليط ضغط عالٍ على الأسطح المتقابلة لقطعتي العمل النظيفة والخالية من أية شوائب، ما يؤدي إلى تشوه موقعي لدن وتداخل للبلورات على سطحي التلامس، وهنالك عدة أنواع في هذه المجموعة وهي كالآتي:

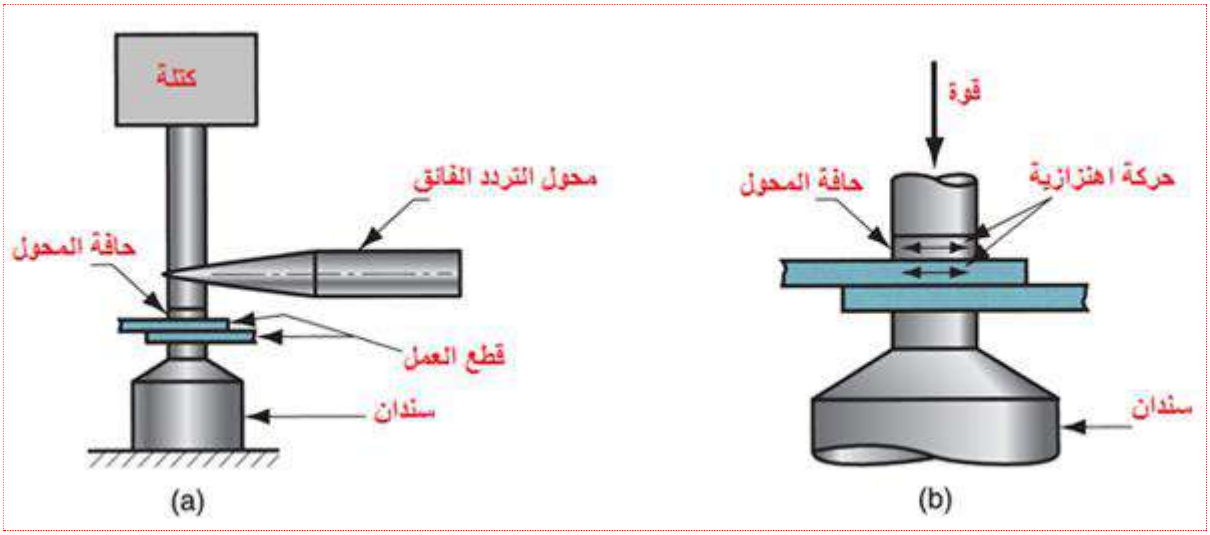
- لحام البارد، يجب أن تكون أسطح قطع العمل نظيفة جداً وتنظف بإحدى الوسائل قبل إجراء عملية اللحام وتستخدم للمعادن المطيلية وخصوصاً الألمُنيوم والنحاس وسبائكهما، ولها تطبيقات مفيدة في تصنيع الملحقات الكهربائية، ويرمز لها بـ (CW).
- اللحام بالدرافيل، وهو نوع من أنواع اللحام البارد أو لحام الحدادة في حالة تسخين قطع العمل، تقوم الدرافيل (Rolls) بتسليط الضغط المطلوب على قطع العمل لإنجاز عملية اللحام، تستخدم هذه الطريقة لتغطية (Cladding) صفائح الفولاذ واطئ أو عالي الكربون بالفولاذ المقاوم للتآكل (Stainless steel)، لاحظ الشكل (1-7)، ويرمز لها بـ (ROW).
- لحام الانفجار، وهو أحد أنواع لحام الحالة الصلبة الذي يتميز بسرعة إنجاز عملية اللحام، ويستخدم هذا النوع عادةً للمعادن غير المتشابهة في حالة تغليف معدن ذي خصائص معينة للمعدن الأساس، والشكل (1-8) يوضح مخطط لعملية لحام الانفجار، ويرمز له بـ (EXW).
- اللحام بترددات فائقة، تتم هذه العملية بتثبيت قطعتي العمل بقوة مناسبة ومن ثم يتم تسليط تردد اهتزازي على منطقة التداخل لإنجاز عملية اللحام، كما هو مبين في الشكل (1-9)، ويرمز لها بـ (USW).



شكل 1-7 لحام بالدرافيل



شكل 1-8 مخطط للحام الانفجار (1) قبل العملية، (2) في أثناء العملية



شكل 1-9 مخطط للحام بالترددات الفائقة (a) التثبيت العام، (b) مقطع منطقة اللحام

1-7 لحام الحالة السائلة - الصلبة Liquid-Solid State Welding

طرائق هذه المجموعة لا يتم فيها صهر المعدن الأساس (قطع العمل) مقارنة مع مجموعة اللحام بالحالة السائلة، بل يتم فقط صهر المواد المضافة (الحشو)، وغالباً ما تنتشر هذه المواد المضافة المنصهرة بين منطقة التداخل للمعدن الأساس على وفق مبدأ الخاصية الشعرية. ومن الجدير بالذكر أنه لا يتم تضمين مصطلح اللحام (Welding) لهذه المجموعة وإنما يستخدم مصطلح وصل المعادن (Joining) في بعض المصادر العلمية، ويستعاض عنه بمصطلحات أخرى تعتمد على ماهية المادة المضافة. وطرائق هذه المجموعة لها تطبيقات واسعة جداً وبالإمكان تصنيفها على ثلاثة أقسام وكالآتي:

1-7-1 لحام القصدرة Soldering

يُعرف لحام القصدرة (يشار له الوصل بالسمكرة في بعض المصادر العلمية) بأنه اللحام الذي يتم فيه إضافة مواد لا تتجاوز درجات انصهارها 450°C، تنصهر مواد الإضافة (الحشو) وتنتشر تحت فعل الخاصية الشعرية في منطقة التداخل لقُطع العمل المراد ربطها بهذه الطريقة، **لا يتم انصهار المعدن الأساس مطلقاً**. يجب أن تكون أسطح قطع العمل المراد قصدرتها نظيفة وخالية من الشوائب مثل الأكاسيد، والزيوت، وغيرها. تضاف لمنطقة اللحام مواد مساعدة للصهر مناسبة (Flux) وتسخن منطقة التداخل حال البدء بالقصدرة في أغلب التطبيقات. لحام القصدرة في التطبيقات الصناعية غالباً ما يستعمل لربط الأجزاء الإلكترونية وفي بعض الأحيان يستعمل لربط القطع الميكانيكية شريطة عدم تعرض الأجزاء المربوطة لإجهادات أو درجات حرارة عاليتين. وأغلب مواد الإضافة المستعملة هي سبائك من معدني القصدير والرصاص لكون درجات حرارة انصهارهم واطئةً، ومن هنا جاءت تسمية هذه العملية، أساليب لحام القصدرة متعددة، أهمها الآتي:

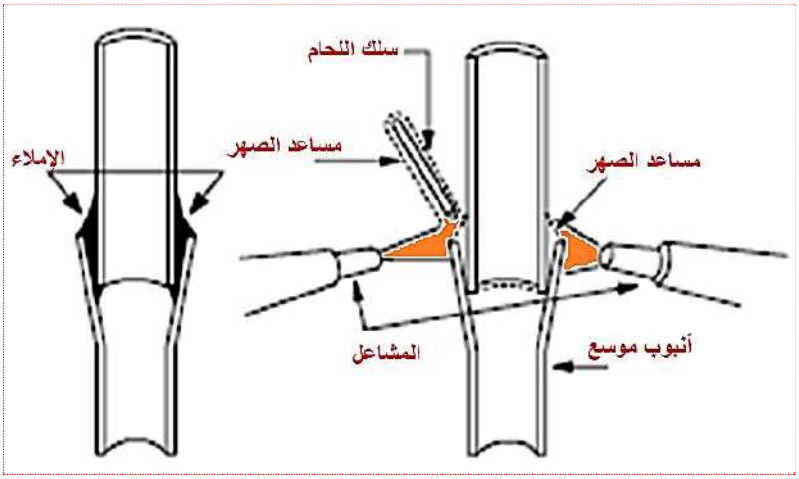
- القصدرة اليدوية، تتم العملية باستخدام الكاوية، لاحظ الشكل (1-10).
- القصدرة بالموجات، وهي تقنية لربط الأجزاء الإلكترونية آلياً في لوحات الدائرة الإلكترونية المطبوعة (Printed Circuit Board) وذلك بقصدرة أسلاك الرصاص البارزة من هذه الأجزاء.
- القصدرة بالانسياب، ولها نوعان، إما الانسياب بالبخار أو بالأشعة تحت الحمراء لسبيكة القصدرة، وتستعمل هذه التقنيات في ربط وتجميع وتثبيت عناصر اللوحات الإلكترونية أيضاً.

شكل 1-10 قصدرة رأس الكاوية

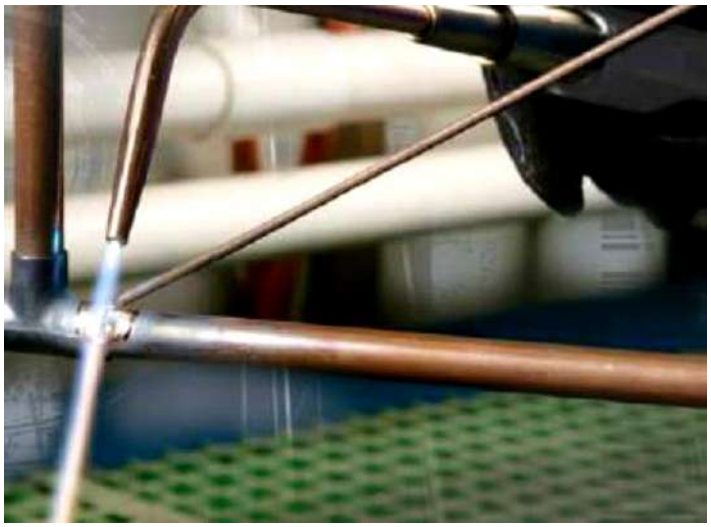
2-7-1 لحام المونة Brazing

لا يختلف كثيراً لحام المونة (يشار له الوصل بالمونة في بعض المصادر العلمية) عن لحام القصدرة إلا في أنواع المواد المضافة (الحشو)، إذ تستعمل سبائك النحاس والألمُنيوم والفضة والنيكل، ودرجات انصهار هذه السبائك تكون أعلى من درجة الحرارة 450°C وأقل من درجة انصهار المعدن الأساس. تنصهر مواد الإضافة بعد تسخين قطع العمل وتنتشر في الأسطح المتداخلة بفعل الخاصية الشعرية، الملحومات بالمونة تكون أقوى من معدن الحشو في حالة تصميم مفاصل الربط بشكل صحيح. تستعمل عمليات لحام المونة في الكثير من التطبيقات الصناعية وخصوصاً في ربط الأنابيب المعدنية، والمُعدات الكهربائية وربط الأسلاك الكهربائية والقابلوات، وأدوات القطع بتثبيت اللقم الكاربيدية، وصناعة المجوهرات، وغيرها. ووصلات لحام المونة تكون بنوعيها التناكبي والتراكبي (التداخلي)، تضاف مواد مساعدة للصهر (Fluxes) لها نفس الأغراض بتطبيقات اللحام بشكل عام. هنالك طرائق متعددة تستعمل في لحام المونة تختلف فيما بينها بحسب مصادر الحرارة اللازمة وهي كالآتي:

- لحام المونة بالمشعل، لها تطبيقات في ربط الأنابيب المختلفة من حيث نوع المعدن والحجم، كما مبين في الشكلين (1-11) و (1-12).
- لحام المونة بالفرن، تستعمل الأفران لتجهيز الحرارة اللازمة للعملية وهي مناسبة للعمليات الإنتاجية وخصوصاً الإنتاج بالوجبة.
- لحام المونة بالحث الكهربائي، وتستعمل المقاومة الكهربائية أو تيار كهربائي عالي التردد لتجهيز الحرارة، وهي مناسبة للمقاطع السميكة.
- لحام المونة بالتغطيس، حيث تغطس الأجزاء المراد لحامها بالمونة بحوض تغطيس فيه منصهر سبائك مواد الحشو المناسبة، التي تنتشر بين أسطح التداخل بفعل الخاصية الشعرية وتزود الحرارة للمعدن الأساس من منصهر مواد الإضافة، يحدث التصلب بعد إخراج قطعة العمل من حوض التغطيس، بالإمكان لحام مفاصل عديدة في كل مرة.
- لحام المونة بالأشعة تحت الحمراء، تستعمل في هذه الطريقة أشعة تحت الحمراء مركزة على قطع العمل لتجهيز الحرارة، هذه العملية بطيئة نسبياً.



شكل 1-11 مخطط للحام المونة بالمشعل



شكل 1-12 ربط أنبوبين من النحاس باستعمال لحام المونة بالمشعل

3-7-1 الربط باللصق Adhesive Bonding

لا يعدَ بعض المختصين هذا النوع من أحد أنواع اللحام، ويُشاع تسميته في العراق باللحام البارد وهي تسمية خاطئة علمياً، على الرغم من عدم تجهيز الحرارة خارجياً لإتمام العملية إلا أن الحرارة تتولد نتيجة تفاعل مواد الحشو والمواد الأساس (قطع العمل). وقد استخدمت هذه الطرائق قبل أكثر من 3300 سنة بتصميغ قطع الأخشاب وربطها معاً، وفي هذه الأيام يستعمل هذا النوع في تطبيقات واسعة لربط مواد متشابهة وأخرى غير متشابهة مثل المعادن، اللدائن، الحراريات، الأخشاب، الورق والورق المقوى وهي في طريقها للزيادة يوماً بعد آخر.

مواد اللصق (Adhesives) هي مواد غير معدنية تكون عادةً من اللدائن وتحتاج العملية إلى وقت إنضاج مناسب يختلف بحسب آلية عملية الإنضاج.

تعتمد قوة الملصوقة على نوع المادة اللاصقة وشكل وصلة الربط، إذ إن هنالك أشكالاً مختلفة للمفاصل تستعمل مع هذه الطريقة لها علاقة بشكل قطعة العمل ووظيفتها، وفي بعض الأحيان تستعمل هذه الطريقة مزدوجة مع طرائق ربط أخرى لزيادة قوة المفاصل. وتتوفر من مواد اللصق التجارية بأعداد كثيرة وتصنف إلى ثلاث فئات وهي كالآتي:

- مواد اللصق الطبيعية (Natural Adhesives)، مصادر هذه المواد طبيعية (نباتية وحيوانية)، لاحظ شكل (1-13).
- مواد اللصق غير العضوية (In Organic Adhesives)، أساساً هي سيليكات الصوديوم وكلوريدات المغنيسيوم، وهي ذات أسعار منخفضة وقوة منخفضة كذلك، ولهذا لها محددات لتطبيقها في المفاصل الهيكلية.
- المواد اللاصقة الاصطناعية (Synthetic Adhesives)، وهي من أهم فئات مواد اللصق في الصناعة وتتضمن لدائن مختلفة الأنواع وبآليات إنضاج مختلفة.

شكل 1-13 مادة لاصقة طبيعية (مصدر حيواني)

8-1 أنواع وصلات اللحام Types of Welded Joints

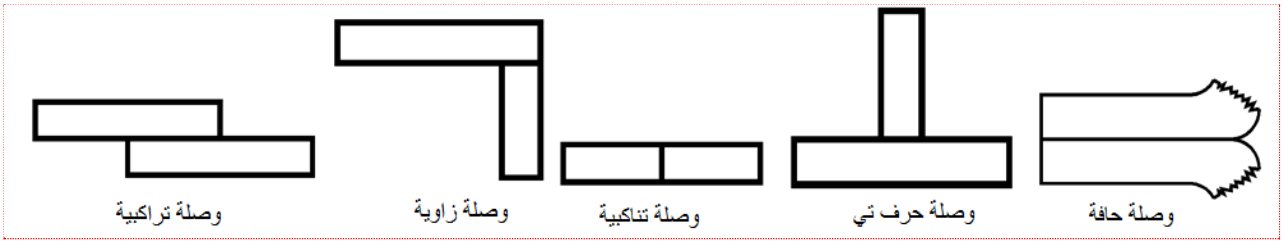
بعد ما تم توضيح تصنيف طرائق اللحام وتعريف مبسط لكل طريقة، في هذه الفقرة سيتم شرح وتوضيح أهم أنواع وصلات اللحام لقطع العمل وعلاقتها بنوع اللحام (Type of Welds). ويجب أن تصمم وصلات اللحام بإتقان للحصول على قوة اللحام المطلوبة لأداء الملحومة حسب ما هو صمم لها، وهنالك خمسة أنواع أساسية للمفاصل المراد لحامها وهي كالآتي:

1. وصلة تناكبية Butt Joint
2. وصلة زاوية Corner Joint
3. وصلة تراكبية Lap Joint
4. وصلة على شكل Tee Joint (T)
5. وصلة حافة Edge Joint

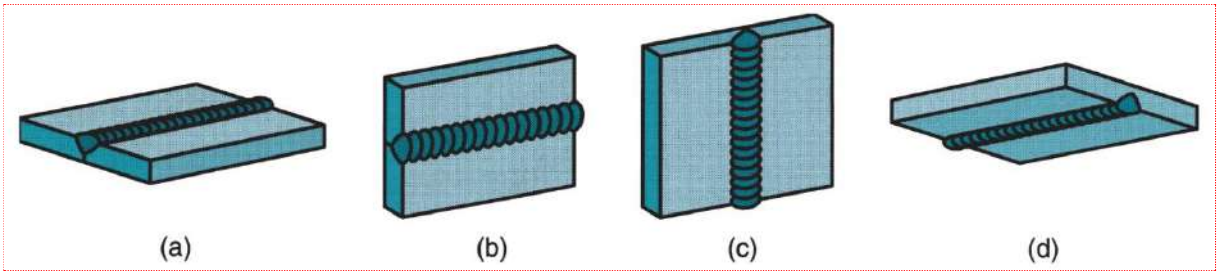
جميع وصلات اللحام المذكورة أعلاه والمبينة في الشكل (1-14) بالإمكان لحامها بنوع مفضل من أنواع اللحام وهي كالآتي:

a) لحام زاوي Fillet Weld متوافق مع وصلة زاوية ووصلة تراكبية ومناسب مع لحام القوس الكهربائي واللحام الغازي.
b) لحام حَزِّي (أخدود) Groove weld متوافق مع وصلة الحافة وله أشكال مختلفة، كما هو مبين في الشكل (1-15).
c) لحام سدادي Plug Weld مناسب مع ربط الصفائح باستعمال عدد من التجاويف والثقوب للصفيحة العليا والتي تُملأ باللحام، لاحظ الشكل (1-16).
d) لحام النقطة Spot Weld له علاقة بلحام المقاومة الكهربائية متوافق مع وصلة تراكبية.
e) لحام الدرز Seam Weld له علاقة بلحام المقاومة الكهربائية ومتوافق مع وصلة الحافة.
f) لحام الشَفَة Flange Weld متوافق مع وصلة الحافة وبالإمكان لحام أكثر من صفيحة.
g) لحام السطح Surfacing Weld ليس له علاقة بربط أجزاء إنما هو لترسيب مادة باللحام على سطح معين.

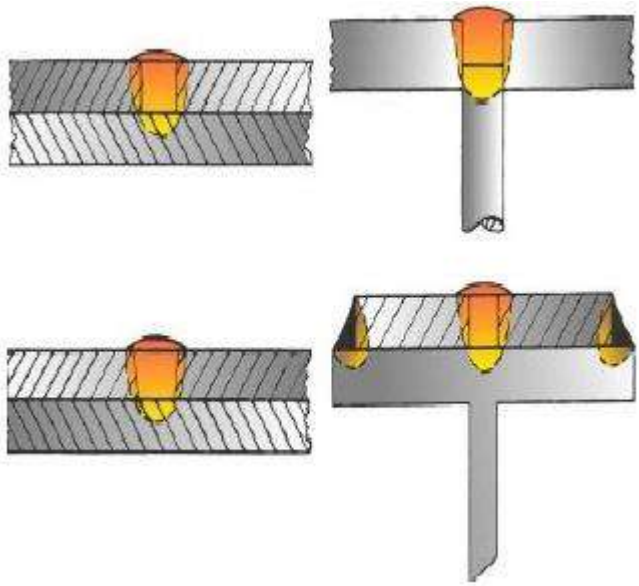
الشكل (1-17) يبين تفاصيل بعض أنواع اللحام المهمة موضح فيها بعض وصلات اللحام المعروفة.



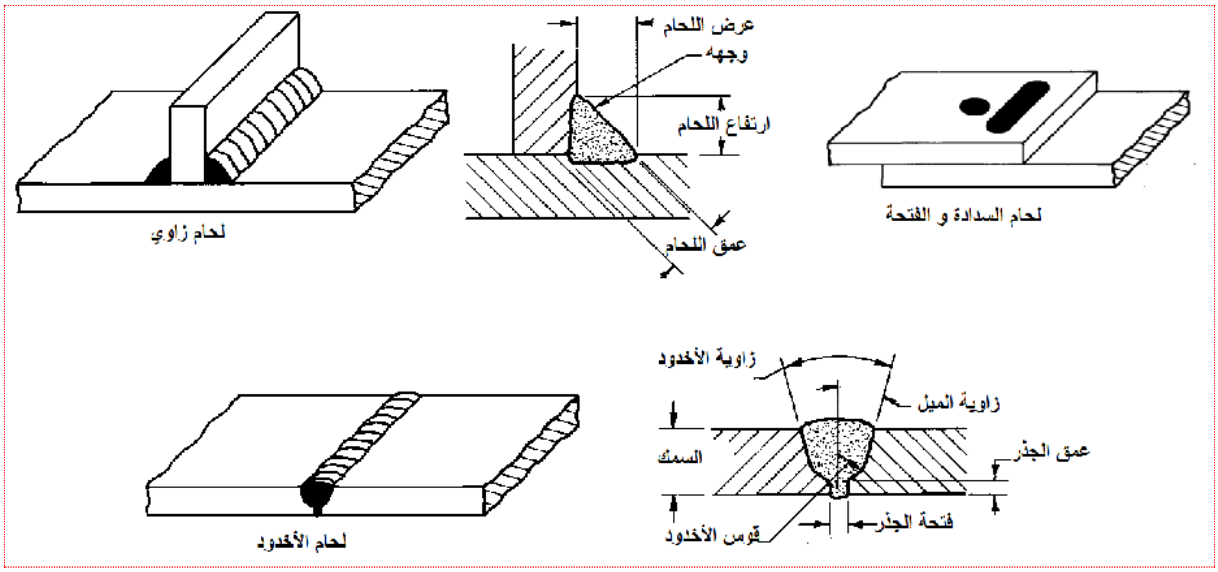
شكل 1-14 الأنواع الخمسة الرئيسة لوصلات اللحام



شكل 1-15 لحام الأخدود: (a) مستوي (مسطح) Flat، (b) أفقي Horizontal، (c) عمودي Vertical، (d) علوي Overhead



شكل 1-16 مقاطع في لحام سَدّادي



شكل 1-17 تفاصيل بعض أنواع اللحام المهمة

أسئلة الفصل الأول

س1) عرف عمليات التصنيع، أقسامها.

س2) عرف عمليات التجميع، واذكر أنواعها.

س3) عرف عملية اللحام، واذكر الأهمية التكنولوجية والتجارية لعمليات اللحام.

س4) اذكر المميزات والمحددات لعمليات اللحام.

س5) عدد طرائق اللحام بالقوس الكهربائي باستعمال الأقطاب المستهلكة.

س6) ما هو الثرمايت؟ وأين يستعمل.

س7) تكلم عن اللحام باستعمال الطاقة الضوئية.

س8) عرف لحام الحالة الصلبة، وإلى كم مجموعة يقسم؟ اذكرها.

س9) ما هو لحام الحالة السائلة – الصلبة؟ وما هي أهم طرائق هذه المجموعة؟

س10) ما هي أهم أنواع مفاصل وصلات اللحام؟

س11) املأ الفراغات الآتية:

1. تصنف طرائق اللحام إلى ثلاثة مجاميع رئيسة هي..... و ..... و .....
2. يمكن أن تتم عملية اللحام من دون إضافات وتسمى عندها العملية بـ .....
3. تقسم طرائق اللحام باستعمال الطاقة الكهربائية إلى ..... و .....
4. يستخدم في طرائق لحام المقاومة الكهربائية طاقة ..... و طاقة ..... لإنجاز عملية اللحام.
5. يتكون في معظم طرائق اللحام بالحالة الصلبة ..... من نوع معين بين ذرات المعدن الأساس لقطعة العمل.
6. تكون درجات الحرارة العاملة في لحام المونة ..... من 450°C وتكون درجات الحرارة العاملة ..... من 450°C في لحام القصدرة.
7. مصادر المواد اللاصقة هي ..... و ..... و .....
8. تعتمد قوة الملصوقة على ..... و .....
9. لحام السطح هو ..... مادة ما على سطح معين.

الفصل

الثاني

لحام القوس الكهربائي

Arc Welding

الأهداف

الهدف العام

في هذا الفصل سيتمكن الطالب من التعرف على طرائق لحام الحالة السائلة وتقنياته وأهمية كل طريقة في عمليات اللحام المختلفة، ويمكنه أن يميز بين هذه الطرائق ومميزات وسلبيات كل طريقة ليتمكن من تحديد الطريقة الصحيحة المناسبة لكل حالة من حالات اللحام ولكل نوع من أنواع المعادن وسبائكها.

الأهداف الخاصة

بعد إنهاء دراسة مفردات الفصل الثاني سوف يتمكن الطالب من فهم الآتي:

1. يعرف أهم مصادر الطاقة اللازمة لتوليد الحرارة المطلوبة لعملية اللحام.
2. يعرف لحام القوس الكهربائي، وآلية حدوث العملية وطرائقها.
3. يعرف أهم المتطلبات التكنولوجية العامة في لحام القوس الكهربائي.
4. يعرف مساعد الصهر وأهميته ووسائل إضافته.
5. يفهم كيفية ترقيم أنواع أقطاب (أسلاك) اللحام.
6. يعرف أنواع اللحام بالحالة السائلة.
7. يعرف أهم الأسباب التي تؤدي إلى حدوث خسائر في القدرة المجهزة من لحام القوس الكهربائي وكيفية معالجتها.
8. يعرف أهم طرائق لحام القوس الكهربائي باستخدام الأقطاب المستهلكة واستخدامات كل طريقة ومحدداتها.
9. يعرف أهم طرائق لحام القوس الكهربائي باستخدام الأقطاب غير المستهلكة واستخدامات كل طريقة ومحدداتها.

لحام القوس الكهربائي Arc Welding

1-2 مقدمة Introduction

تم تصنيف طرائق اللحام في الفصل السابق إلى ثلاثة أصناف رئيسة هي اللحام الانصهاري، لحام الحالة السائلة–الصلبة، ولحام الحالة الصلبة، وفي هذا الفصل سيتم تناول جزء من طرائق لحام الحالة السائلة التي تُعد من أكثر الطرائق استعمالاً وتطبيقاً في عمليات اللحام. تتم عملية اللحام في هذه المجموعة بترتيب قطع العمل بحسب نوع الوصلة المراد لحامها ومن ثم تسليط حرارة خارجية مناسبة ترفع من درجة حرارة المنطقة المتقابلة المحددة (طرفي أو حافتي) قطع العمل إلى أعلى من درجة انصهار المعادن، وبذلك يحدث انصهار جزئي في تلك المنطقة، أي بعبارة أخرى أن هنالك تحولاً في طور المادة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة في أثناء عملية اللحام. وبعد انتهاء العملية ستتجمد منطقة اللحام بسرعة وتعود إلى حالتها الأولى مكونةً ارتباطاً معدنياً وثيقاً، ومن هنا جاءت تسمية طرائق هذه المجموعة (لحام الحالة السائلة). ومن الجدير بالذكر أن المعادن أو السبائك عند اللحام تتعرض إلى تغير كبير في خصائصها نتيجة الحرارة العالية وخصوصاً في منطقة اللحام والمنطقة المجاورة لها والتي تسمى بالمنطقة المتأثرة باللحام (Heat Affected Zone) ويرمز لها بـ (HAZ)، لذا من الضروري أن تتم السيطرة على عملية اللحام وإجراء عمليات فحص متنوعة على الملحومات ومعالجة أية عيوب أو اختلاف في خصائصها التي صممت من أجلها، كذلك التأكد من صلاحيتها للخدمة قبل استخدامها. علماً أن عيوب منتجات عملية اللحام الانصهاري التي قد تحدث، هي مشابهة للعيوب المرافقة لعملية السباكة بسبب الانصهار والانجماد، ولذا تُعد عملية اللحام من قبل بعض المختصين بعملية سباكة موقعية (Local Casting). وتنقسم طرائق لحام الحالة السائلة إلى مجموعة أقسام بحسب نوع مصدر الطاقة اللازم لتوليد الحرارة المطلوبة لعملية اللحام، وهذه المصادر هي كالآتي:

- **الطاقة الكهربائية**
- **الطاقة الكيميائية**
- **الطاقة الضوئية**

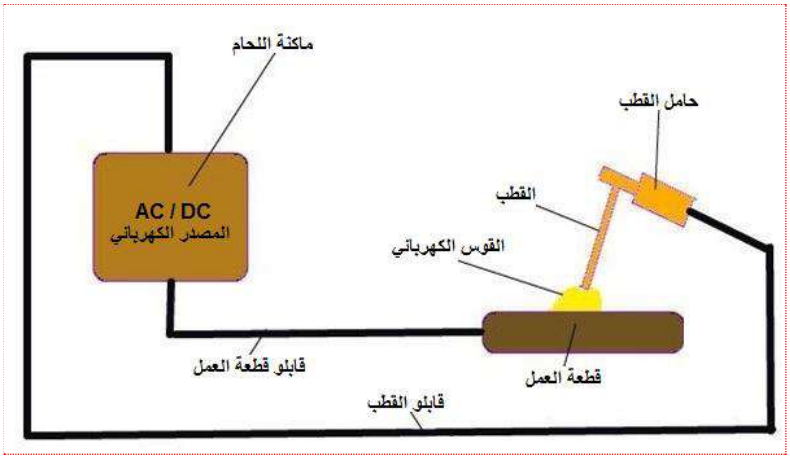
تُعد الطاقة الكهربائية إحدى أهم مصادر الحرارة المطلوبة لإجراء عمليات اللحام، لسهولة استخدامها وتوفرها مقابل الحرارة العالية المطلوبة التي يزودها هذا المصدر، فضلاً على بساطة مُعداتها اللازمة وقلة كلفها وخصوصاً في التطبيقات التقليدية مثل اللحام بالقوس الكهربائي الذي هو أحد أهم أنواعها وسيتم تناول طرائقه وتقنياته واستخداماته في هذا الفصل، في حين سيتم تناول اللحام بالنوع الآخر من مصادر الطاقة الكهربائية وهو اللحام بالمقاومة الكهربائية في الفصل الثالث من هذا الكتاب. أما مجموعة الطرائق الأخرى بمصادر الطاقة الكيميائية والضوئية فسيتم تناولها في فصولٍ أخرى.

2-2 لحام القوس الكهربائي Arc Welding (AW)

بدأ استخدام لحام القوس الكهربائي في أواسط القرن التاسع عشر، وبعدها انتشر استخدامه بشكل واسع جداً وتطورت طرائقه وتقنياته متزامناً مع تطور علم المعادن والسبائك (Metallurgy) لتلبي الحاجات التصنيعية المستحدثة. إن لحام القوس الكهربائي هو أحد أنواع لحام الحالة السائلة، إذ تتم عملية اللحام بالترابط المعدني الوثيق الناتج من انصهار المعادن لقطع العمل في منطقة الربط نتيجة الحرارة المتولدة من القوس الكهربائي بين قطب ماكنة اللحام وقطعة العمل ومن ثم انجماد بركة اللحام بسرعة عند الانتهاء مباشرة من عملية اللحام، علماً أنه بنفس أساس عملية القوس الكهربائي يمكن أن يتم قطع المعادن المختلفة، الشكلان (1-2)، (2-1) يوضحان مخطط عملية اللحام بالقوس الكهربائي الأساسية.

القوس الكهربائي عبارة عن تفريغ للتيار الكهربائي عبر فراغ صغير (خلوص) (gap) في الدائرة الكهربائية بين القطب والقطعة، والغاز المتأين بالحرارة حول منطقة اللحام يساعد باستمرار تفريغ التيار الكهربائي وبالتالي استمرار عملية اللحام. للشروع بعملية اللحام بالقوس الكهربائي، إذ لا بد في البداية أن يتم تماس القطب الكهربائي بقطعة العمل المراد لحامها بفترة وجيزة وعند حصول القدح يرفع القطب مباشرة بمسافة قليلة عن قطعة العمل بالخلوص المناسب الذي يؤدي إلى استمرار عملية القوس الكهربائي واستمرار عملية اللحام، علماً أن عملية القدح والبدء باللحام تتطلب مهارة عالية إذا كانت العملية يدوية من حيث متطلبات السرعة العالية في القدح ورفعه للخلوص المناسب وثبوت ذلك الخلوص بين قطعة العمل والقطب الكهربائي خلال عملية اللحام، وخصوصاً في عملية اللحام بالقوس الكهربائي بالأقطاب المستهلكة (أسلاك اللحام).

تنتج الطاقة الكهربائية المستهلكة بالقوس الكهربائي طاقة حرارية عالية بحيث ترفع درجات الحرارة في منطقة اللحام إلى أكثر من (5500°C) في بعض التطبيقات، ودرجات الحرارة العالية جداً هذه تكون كافية لتسخين قطع العمل من أي معدن وصهر منطقة اللحام، وبُركة منصهر المعدن المتكونة بالقرب من حافة القطب تحوي المعدن الأساس لقطع العمل زائداً معدن الإضافة في حالة استعماله، ومعدن الإضافة هذا (قد يكون سلكاً أو شيئاً آخر) يضاف إلى معظم تقنيات اللحام بالقوس الكهربائي لزيادة حجم وتحسين المقاومة في منطقة اللحام. بتحرك قطب اللحام وتقدمه على طول الوصلة، يتجمد مباشرة من خلفه منصهر اللحام، وتتم عملية تحرك قطب اللحام إما يدوياً أو آلياً بتقنيات مختلفة، وأهم معايير جودة اللحام اليدوي هو مهارة عامل اللحام، وبصورة عامة يتطلب اللحام اليدوي أو الآلي السرعة في تنفيذ العمل للمتطلبات الاقتصادية والإنتاجية، ولكن في حسابات زمن اللحام الفعلي نسبة إلى زمن وجبة العمل الواحدة (عدد ساعات العمل التي تتراوح بين 6 إلى 8 ساعة وبحسب نظام الشركة)، لا تتعدى هذه النسبة (20%) في اللحام اليدوي، أما في اللحام الآلي فتكون النسبة بحدود (50%).



شكل 2-1 مخطط عملية لحام القوس الكهربائي الأساسية

1-2-2 متطلبات تكنولوجية عامة General Technology Requirements

في هذه الفقرة سيتم توضيح أهم المتطلبات التكنولوجية العامة في لحام القوس الكهربائي:

1- الأقطاب Electrodes: تُصنف الأقطاب المستعملة في لحام القوس الكهربائي إلى مستهلكة وغير مستهلكة، وتكون الأقطاب المستهلكة هي المصدر لمعدن الإضافة المطلوب في اللحام بالقوس الكهربائي وهي متوفرة بشكلين، الأسلاك والأقطاب، وتتوفر أقطاب اللحام المغلفة بطول (225-450 mm) وبأقطار مختلفة أقل أو تساوي (9.5 mm)، تكمن مشكلة اللحام بالأقطاب المستهلكة في الوقت الضائع عند استهلاك القطب وإبداله بآخر جديد بشكل دوري طيلة استمرار عملية اللحام، في حين لا يوجد مثل هذا الضياع في الوقت في أسلاك اللحام التي تكون عادةً طويلة وتغذى باستمرار ببركة اللحام من لفة كبيرة. أما الأقطاب غير المستهلكة فعادةً تصنع من معدن التنكستن الذي يقاوم الانصهار بسبب القوس الكهربائي، وفي أحيان قليلة تصنع هذه الأقطاب من الكرافيت، وبالرغم من تسمية هذه الأقطاب بغير المستهلكة لكن في حقيقة الأمر أنها تستنفد قليلاً في أثناء اللحام بسبب آلية التبخر بحالة مشابه لاستهلاك أدوات القطع في عمليات التشغيل. في حالة اللحام بالأقطاب غير المستهلكة وحاجة العملية إلى معدن الإضافة يتم تزويده لبركة اللحام عن طريق سلك منفصل. ومن الجدير بالذكر أن هنالك أنواعاً كثيرة جداً من أقطاب وأسلاك اللحام الخاصة بلحام القوس الكهربائي مصنفة بحسب الجمعية الأمريكية للحام بنوعية المعدن ونوعية المادة المغلفة (مساعد الصهر) وأوضاع اللحام واستخدامات كل نوع. وترقيم أنواع أقطاب اللحام المغلفة تكون بالشكل الآتي، وتقرأ من اليسار:

E: تعني قطب اللحام المستخدم في لحام القوس الكهربائي.

XX: رقمان في حالة التصنيف الأربعة أرقام أو الثلاثة في حالة خمسة الأرقام، وتمثل قيمة مقاومة (تحمل) جهد الشد بعد ضرب المقدار بالألف (1000) ووحدة القياس على أساس باوند/إنج^2 (psi).

X: يمثل وضع اللحام المفضل، الرقم (1) يعني الأوضاع كافة ، الرقم (2) يعني اللحام بالوضع الأفقي المستوي فقط، بينما الرقم (3) يمثل اللحام بالوضع المستوي الأفقي والعمودي للأسفل وللأعلى.

XX: تمثل نوعية المادة التغطية (Coating) كمساعد صهر وبحسب الجدول (2-1) للحام الفولاذ غير السبائكي:

جدول 2-1 نوعية مواد التغطية

الرقم	مادة التغليف	نوع التيار الكهربائي المفضل والقطبية
0	صوديوم سيليلوزي	DC+
1	بوتاسيوم سيليلوزي	AC, DC+ or DC-
2	تيتانيوم صوديوم	AC, DC-
3	تيتانيوم بوتاسيوم	AC, DC+
4	مسحوق الحديد تيتانيوم	AC, DC+ or DC-
5	منخفض الهيدروجين صوديوم	DC+
6	منخفض الهيدروجين بوتاسيوم	AC, DC+
7	مسحوق الحديد-أوكسيد الحديد	AC, DC+ or DC-
8	مسحوق الحديد-منخفض الهيدروجين بوتاسيوم	AC, DC+ or DC-

مثال 1 : وضح أقطاب اللحام الآتية : E6010 ، E7024

E6010: أقطاب للحام القوس الكهربائي مقاومة الشد تساوي (60000 psi) للأوضاع كافة، مادة التغليف هي صوديوم سيليزي، وماكنة اللحام DC موجب.

E7024: أقطاب للحام القوس الكهربائي مقاومة الشد تساوي (70000 psi) يكون اللحام بالوضع المستوي الأفقي فقط ونوعية مادة التغليف هي مسحوق الحديد تيتانيوم، وماكنة اللحام DC أو AC.

هنالك أرقام وحروف أخرى غير التي ذكرت قد تذكر في بعض الأحيان على أقطاب اللحام لها علاقة بالتركيب الكيمياوي ومقاومة الرطوبة وأمور أخرى لا يتسع المجال لذكرها، وعلى المستخدم أن يتعرف عليها من خلال تعليمات الشركة المنتجة لأقطاب اللحام.

2- حجاب القوس الكهربائي: عند ارتفاع درجات الحرارة العالية في عملية اللحام بالقوس الكهربائي، المعادن المراد لحامها تتفاعل كيميائياً مع الأوكسجين، النتروجين، والهيدروجين الموجودين في الهواء الجوي الاعتيادي المحيط لمنطقة اللحام، ما يؤدي إلى ضعف شديد في الخواص الميكانيكية لوصلة اللحام بسبب هذا التفاعل، لذا يتم عمل حجاب (Shielding) لقوس اللحام وبركة منصهر اللحام وتغطية حافة الأقطاب بطبقة من غاز خامل أو بمساعد صهر أو بالاثنين معاً لمنع اتصال معدن اللحام بالهواء.

إن الغازات الخاملة شائعة الاستعمال لهذا الغرض هما الهيليوم والآركون، وفي بعض تطبيقات لحام القوس الكهربائي للسبائك الحديدية يستخدم ثاني أوكسيد الكاربون بالإضافة إلى الآركون أو الهيليوم أو معاً للغرض نفسه، فضلاً على السيطرة على شكل اللحام.

يستعمل **مساعد الصهر** كمادة لمنع تكون الأكسدة ومنع دخول أي مواد غريبة لبركة منصهر اللحام أو يستعمل لتحليل الأكاسيد والمواد الغريبة وإزالتها من تلك المنطقة، في أثناء عملية اللحام ينصهر مساعد الصهر ويصبح خبثاً سائلاً يطفو فوق بركة اللحام ليحميها، وبعد انتهاء عملية اللحام ينجمد الخبث ويمكن إزالته بسهولة بالفرشاة السلكية أو بأي وسيلة ميكانيكية أخرى، ويمكن حسر وظائف مساعد الصهر بالنقاط الآتية:

1. تغطية وحماية عملية اللحام من الهواء الجوي.
2. يعمل على استقرار القوس الكهربائي.
3. يقلل من التشظية.
4. يعطي الشكل الهندسي لبركة اللحام بعد التجمد.

هنالك عدة وسائل لإضافة مساعد الصهر تعتمد على نوع وتقنية عملية اللحام، تتضمن الآتي:

1. نثر حبيبات مساعد الصهر على طول خط اللحام في أثناء عملية اللحام.
2. استخدام أقطاب اللحام المغطاة بمساعد الصهر.
3. استخدام أقطاب مجوفة تحوي مساعد الصهر في تجويف الأقطاب.

هذه الوسائل سوف يتم شرحها بالتفصيل عند تناول طرائق لحام القوس الكهربائي.

3- مصادر التيار الكهربائي: يستخدم التيار الكهربائي المتناوب والمستمر في طرائق لحام القوس الكهربائي، مكائن اللحام التي تعمل بالتيار المتناوب تكون أقل كلفة (أولية وتشغيلية) من مثيلاتها التي تعمل بالتيار المستمر، ولكن مكائن التيار المستمر تكون ملائمة لجميع أنواع المعادن وبملحومات ذات جودة عالية بسبب السيطرة المثالية على القوس الكهربائي.

مكائن التيار المتناوب لا تتأثر بطريقة الربط لأن التيار المتناوب يغير اتجاهه (100) مرة بالثانية الواحدة لأن تردد الكهرباء في العراق تساوي (50) ذبذبة لكل ثانية. أما مكائن القوس الكهربائي التي تعمل بالتيار المستمر لها إمكانية الربط بطريقتين بقطبية مباشرة وبقطبية معكوسة:

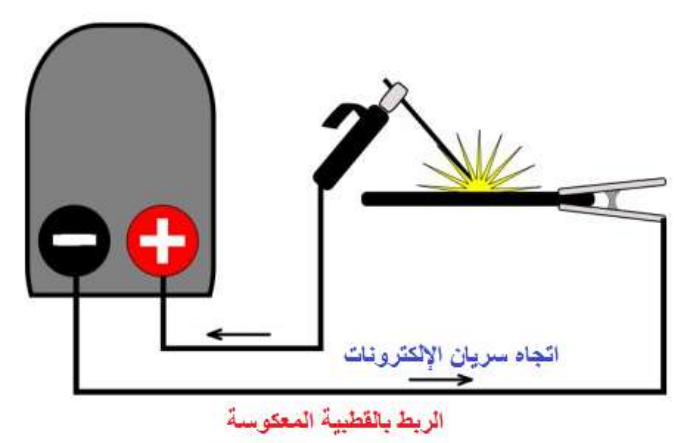
الربط بالقطبية المباشرة (DC^-)

يتم ربط قطب ماكنة اللحام (الإلكترود) بالقطب السالب وتربط قطعة العمل بالقطب الموجب عند الربط بالقطبية المباشرة في مكائن اللحام التي تعمل بالتيار المستمر. وفي هذا الربط يكون سريان الإلكترونات من قطب ماكنة اللحام باتجاه قطعة العمل، وتتركز الحرارة المتولدة من القوس الكهربائي في قطعة العمل وتتراوح حدودها (70%) نتيجة تصادم الإلكترونات في أثناء التفريغ بقطعة العمل وباقي نسبة الحرارة التي هي بحدود (30%) ستتمركز بالأقطاب. مميزات هذا الربط هو سرعة جيدة في عملية اللحام بسبب تركيز الحرارة في قطعة العمل، وشكل اللحام يكون عميقاً وضيقاً وهو المطلوب دائماً، والتشوهات المصاحبة في عملية اللحام بالمعدن الأساس تكون قليلة، وبالتالي جودة عالية للملحومات، فضلاً على استخدام أقطاب صغيرة الأقطار. ولهذا يُعد الربط بالقطبية المباشرة هو المفضل ويستخدم في لحام معظم المعادن. الشكل (2-2) يوضح الربط بالقطبية المباشرة في مكائن اللحام.

شكل 2-2 الربط بالقطبية المباشرة في مكائن اللحام التي تعمل بالتيار المستمر

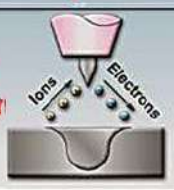
الربط بالقطبية المعكوسة (DC+)

يتم الربط بشكل معاكس عن الربط السابق، إذ يربط القطب (الإلكترود) بالقطب الموجب وقطعة العمل بالقطب السالب، وتسري الإلكترونات من قطعة العمل إلى القطب ولهذا تتمركز الحرارة بالأقطاب وهي بحدود (70%) نتيجة تصادم الإلكترونات بها، ما يسبب انصهارها المفرط وبالتالي يجب استخدام أقطاب بأقطار أكبر عند الربط بالقطبية المعكوسة، وتكون نسبة الحرارة بقطعة العمل بحدود (30%). كما هو موضح في الشكل (2-3). وشكل اللحام يكون واسعاً (عريضاً) وغير نافذ (نفوذيته قليلة). يستخدم هذا الربط بلحام المعادن غير الحديدية مثل الألمُنيوم، البرونز، النيكل، ويستخدم أيضاً في اللحام بالوضع العمودي والرأسي.



شكل 2-3 الربط بالقطبية المعكوسة في مكائن اللحام التي تعمل بالتيار المستمر

الشكل (2-4) يبين مقارنة بين الحالات الثلاث (التيار المتناوب، التيار المستمر بالقطبية المباشرة، التيار المستمر بالقطبية المعكوسة)، قابلية الأقطاب (الإلكترود) تعني مقدار ما يسمح به القطب بحسب قطره لسريان التيار من خلاله.

نوع التيار	مباشر DC	معكوس DC	AC
قطبية الإلكترود	سالب	موجب	
أتجاه سريان كل من الإلكترونات والأيونات			
الخصائص			
فعل تنظيف الأكسدة	لا يوجد	يوجد	يوجد وفي كل نصف دورة (ذبذبة)
نسبة حرارة القوس تقريباً	70% في قطعة العمل 30% في الإلكترود	30% في قطعة العمل 70% في الإلكترود	50% في قطعة العمل 50% في الإلكترود
نفاذية اللحام	عميق وضيق	قليل وواسع	وسط
قابلية الإلكترود	ممتاز 3.2 mm, 400A	ضعيف 6.4 mm, 120A	جيد 3.2 mm, 225A

شكل 2-4 مقارنة بين أنواع الربط المختلفة

2-2-2 التحليل الرياضي لعملية اللحام بالقوس الكهربائي

Mathematical Analysis for Arc Welding Process

القدرة المجهزة (P) وحدة قياسها واط (W) لجميع طرائق اللحام بالقوس الكهربائي عبارة عن حاصل ضرب شدة التيار الكهربائي (I) المار خلال القوس ووحدة قياسه (A) وفرق الجهد عليه (E) ووحدة قياسه (V)، وهذه القدرة ستتحول إلى حرارة ولكن ليست كل الحرارة المتولدة تنتقل لقطعة العمل بل إن جزءاً منها سيفقد عبر التوصيل والحمل والإشعاع إلى خارج منطقة اللحام وتُعد هذه طاقة مهدورة (خسائر)، وطالما زادت الخسائر قلت كفاءة العملية، وتعتمد كفاءة لحام القوس الكهربائي على التقنيات والطرائق الخاصة بالعملية، علماً أن مقدار القدرة الفعلية (تركيز القدرة) التي تعني حاصل قسمة القدرة المجهزة على مساحة منطقة اللحام هي قليلة في اللحام الغازي ($10\ W/mm^2$) ولحام القوس الكهربائي ($50\ W/mm^2$)، وتكون عالية جداً في أنواع أخرى من اللحام الانصهاري مثل اللحام بالمقاومة الكهربائية ($1000\ W/mm^2$) واللحام بالليزر ($9000\ W/mm^2$)، وكذلك تكون الخسائر أقل عند استعمال الأقطاب المستهلكة بسبب أن جزءاً كبيراً من الطاقة ستذهب لصهر القطب المستخدم نفسه والذي يكّون مع حافات قطع العمل بركة المنصهر المطلوبة للحام.

المعادلات الرياضية الخاصة بموضوع لحام القوس الكهربائي هي:

$$P = I \times E \qquad (2\text{-}1)$$

القدرة الفعالة لعملية اللحام (H) تستحصل من ضرب معامل الكفاءة (f) الذي يعتمد على طريقة عملية اللحام بالقدرة المجهزة.

$$H = f \times P \qquad (2\text{-}2)$$

هنالك جداول خاصة مثبت فيها مقادير وحدة الطاقة النوعية وهي الطاقة اللازمة لصهر المعادن المختلفة والتي يرمز لها بـ (U_m) ووحدة قياسها (J/mm^3)، سيتم ذكر هذه المقادير في المسائل مباشرة للطالب، ومنها سيتم استخراج معدل حجم انصهار المعدن ($\dot{V}$) ووحدة قياسه (mm^3/s).

$$\dot{V} = \frac{H}{U_m} \qquad (2\text{-}3)$$

ويمكن حساب سرعة عملية اللحام (v) والوقت اللازم لإنجاز عملية اللحام، من خلال معرفة مساحة مقطع اللحام (A).

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \qquad (2\text{-}4)$$

مثال 2: في إحدى عمليات لحام القوس الكهربائي كان مقدار التيار (200 A) وفرق الجهد (20 V)، جد مقدار القدرة المجهزة.

الحل:

$$P = I \times E$$

$$P = 200 \times 20 = 4000\,W = 4\,kW$$

مثال 3 : لنفس المثال السابق جد مقدار القدرة الفعالة، إذا علمت أن معامل الكفاءة لهذه الطريقة من لحام القوس الكهربائي تساوي (35%).

الحل:

$$H = f \times P$$

$$H = 0.35 \times 4000 = 1400\,W = 1.4\,kW$$

مثال 4 : لنفس المثال السابق جد معدل حجم انصهار المعدن، إذا علمت أن وحدة الطاقة النوعية لنوع معين من الفولاذ تساوي ($10\ J/mm^3$).

$$\dot{V} = \frac{H}{U_m}$$

$$\dot{V} = \frac{1400}{10} = 140\,mm^3/s$$

ملاحظة

يتبين من مثال 3 الفرق الكبير بين القدرة المستهلكة والقدرة الفعالة التي تم الاستفادة منها في تسخين وصهر قطعة العمل في لحام القوس الكهربائي، ومقدار الفرق هذا يمثل القدرة الضائعة (خسائر الطاقة) وبالتالي كفاءة العملية، والتي يمكن تحسينها باستخدام طرائق وتقنيات بديلة في لحام القوس الكهربائي، وخصوصاً في العمليات الإنتاجية المستمرة والكبيرة، إذ يستعاض عن اللحام بالقوس الكهربائي بالطريقة التقليدية بطرائق وتقنيات حديثة سيتم التطرق إليها في الفقرة القادمة من هذا الفصل. علماً أن الخسائر يمكن أن تقسم إلى خسائر بسبب طريقة اللحام نفسها وأخرى بسبب أسلوب ومتغيرات الطريقة، لذا يتم استبدال طريقة اللحام إذا كانت الخسائر عالية بسبب الطريقة، أو يتم تحسين الأسلوب والتأكد من متغيرات العملية إذا كان السبب هو من جرائها.

3-2 طرائق لحام القوس الكهربائي Arc Welding Methods

سيتم تقسيم طرائق لحام القوس الكهربائي إلى مجموعتين رئيستين هما:

- **طرائق لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المستهلكة**
- **طرائق لحام القوس الكهربائي بالأقطاب غير المستهلكة**

1-3-2 طرائق لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المستهلكة (Consumable Electrodes)

هنالك مجموعة مهمة من طرائق لحام القوس الكهربائي تستخدم فيها الأقطاب المستهلكة، وتتضمن:

1- لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المغلفة Shield Metal Arc Welding (SMAW)

تُعد هذه الطريقة من أقدم وأبسط الطرائق في لحام القوس الكهربائي وأكثرها استعمالاً سابقاً وحالياً وستبقى حتى في المستقبل بسبب المرونة العالية في تنفيذ الكثير من الأعمال فضلاً على كلفة مكائنها الواطئة نسبياً وسهولة الحصول على المصدر الكهربائي لتشغيل تلك المكائن، حالياً بحدود نصف أعمال اللحام بالمصانع والصيانة المختلفة تنجز بهذه الطريقة. يتكون القوس الكهربائي بعد تماس حافة القطب المغلف (المغطى) بمساعد الصهر بقطعة العمل وسحبه بسرعة بمسافة الخلوص المطلوبة لاستمرار القوس الكهربائي واستقراره. شكل الأقطاب عبارة عن قضبان (Sticks) نحيفة وطويلة ومغطاة بمواد كيمياوية معينة تساعد في عملية اللحام من خلال تكوينها للحجاب (الحماية) الغازي المطلوب لمنع تماس بركة منصهر اللحام بالهواء، فضلاً على سحبها للأكاسيد والمواد الغريبة وتكوين الخبث الذي يطفو فوق منصهر اللحام (لأنه أخف وزناً من منصهر اللحام) ويمكن إزالته بسهولة بعد إتمام عملية اللحام، مكونات هذه المواد عبارة عن مسحوق سيليلوزي (مساحيق القطن والأخشاب) تمزج مع أكاسيد وكاربونات معينة ومواد أخرى مقوّمة وتمزج بلاصق من السِلكيات، وفي بعض الأحيان تضاف مساحيق معدنية لغرض تكوين عناصر سبائكية في منطقة اللحام وبالتالي زيادة مقاومتها الميكانيكية. أقطاب اللحام تكون عادةً بطول يتراوح بين (225-450 mm) وبأقطار (2.5-9.5 mm)، يجب أن يكون معدن الإضافة (الحشو) المستعمل في القطب متوافق مع معادن قطع العمل المراد لحامها، ولهذا غالباً ما تكون مكوناته الكيميائية قريبة من مكونات معدن قطعة العمل، علماً أن هذا النوع من اللحام يتطلب أنواعاً محددة من الأقطاب.

الحرارة المتولدة من القوس الكهربائي تصهر جزءاً من قطب اللحام ومساعد الصهر الذي عليه والمعدن الأساس في منطقة القوس، اللحام يتكون مباشرة بعد انجماد المنصهر من تلك المواد في هذه المنطقة. الشكل (2-5) يوضح مخطط العملية مبيناً فيه اتجاه حركة اللحام نسبة للحام المتكون وصورة لعملية لحام حقيقية، إذ غالباً ما تنجز عملية اللحام بالقوس الكهربائي بالأقطاب المغلفة يدوياً.

شكل 2-5 لحام القوس الكهربائي بالقطب المغلف، يمين: صورة لتنفيذ العمل، يسار: مخطط العملية

في هذا النوع من لحام القوس الكهربائي كما هو مبين في الصورة أعلاه، الطرف الثاني من قطب اللحام يكون بدون تغطية بمواد مساعدة للصهر ويثبت بحامل القطب (فيه ماسك معزول كهربائياً) والذي يوصل بأحد قابلوات المصدر الكهربائي بينما يوصل القابلو الآخر ويثبت بقطعة العمل المراد لحامها. التيار الكهربائي المار بالقوس الكهربائي (التيار الخارج من الماكنة) تتراوح حدوده غالباً ما بين (50-300 A) وبفرق جهد بحدود (15-45 V)، لذا فإن القدرة المطلوبة لهذا النوع من المكائن تكون أقل من (10 kW) بصورة عامة. يستعمل تيار مستمر أو تيار متناوب في هذه المكائن، ويفضل التيار المستمر وخصوصاً مع لحام الصفائح وبعض المعادن لاستقرار القوس الكهربائي. إن اختيار القطبية في مكائن التيار المستمر مهمة والتي تعني اتجاه سريان التيار، وتعتمد على عوامل عدة منها نوع أقطاب اللحام، معادن قطع العمل، عمق اللحام المطلوب. يثبت القطب الموجب بقطعة العمل والقطب السالب يثبت بقطب اللحام (سلك اللحام) في **الربط الاعتيادي بالقطبية المباشرة**، ويستخدم في لحام الصفائح التي تحتاج إلى عمق عميق للحام وفي الوصلات ذات الخلوص الواسع. أما في **الربط المعاكس** (القطبية المعكوسة) فيربط قطب اللحام بالقطب الموجب وقطعة العمل بالقطب السالب والتي تستخدم في حالة اللحام بعمق قليل. تستخدم مكائن التيار المتناوب في لحام قطع العمل السميكة مع أقطاب لحام ذات أقطار كبيرة وتيار كهربائي عالٍ. وبصورة عامة يمكن لحام قطع عمل يتراوح سمكها ما بين (3-19 mm)، وفي حالة القطع بسمك أكبر من ذلك يتم إنجاز العمل بمراحل متعددة وليست بمرحلة واحدة.

المعايير لاختيار التيار المناسب أو القدرة المناسبة تتضمن الآتي:

- **نوع معدن قطعة العمل وسمكها.**
- **نوع قطب اللحام وقطره.**
- **عمق اللحام المطلوب.**
- **موضع اللحام**

التطبيقات الشائعة في لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المغلفة تتضمن الآتي:

- **المقاطع الفولاذية في الأبنية الإنشائية.**
- **خطوط الأنابيب.**
- **بناء السفن.**
- **أعمال ورش العمل الصغيرة.**
- **أعمال الصيانة بصورة عامة.**

لأن مكائن لحام هذه الطريقة رخيصة سهلة النقل والتحميل والتنصيب وبالإمكان تشغيلها بمولد كهربائي صغير نسبياً، استخدمت في الحقول والمناطق النائية. المعادن الملائمة لهذه الطريقة من طرائق لحام القوس الكهربائي تتضمن الفولاذ وسبائكه، الفولاذ المقاوم للتآكل، حديد الزهر، وبعض المعادن غير الحديدية، وهي غير مناسبة للحام الألمُنيوم وسبائكه والنحاس وسبائكه ومعدن التيتانيوم.

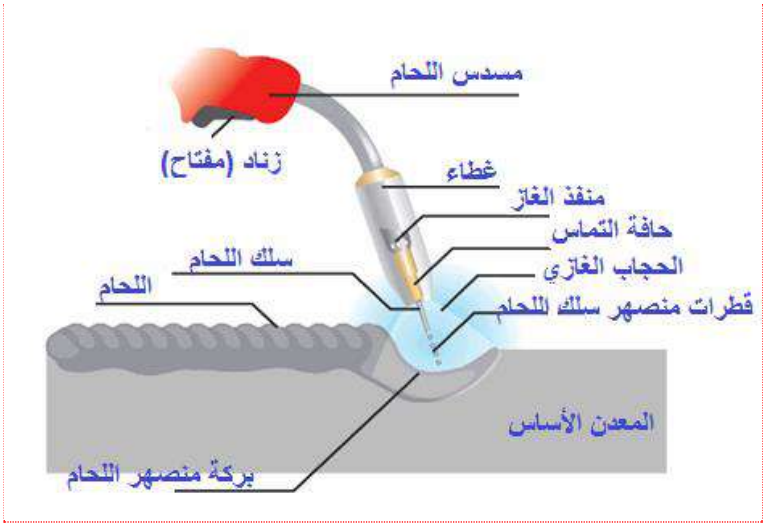
تتلخص مساوئ أو محددات هذه الطريقة بالنقاط الآتية:

1. غير ملائمة للعمليات الإنتاجية المستمرة بسبب ضرورة استبدال أقطاب اللحام بعد استهلاكها.
2. صعوبة الحفاظ على ثبوت مقدار التيار الكهربائي المطلوب بصورة مستمرة، بسبب نقصان المقاومة الكهربائية لقطب اللحام نتيجة استمرار استهلاكه وتغير طوله في أثناء عملية اللحام، ومع هذا يجب الحفاظ على مدى محدد ومناسب لمقدار التيار، ولذا تتطلب عملية لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المغلفة مهارة عالية جداً لعامل اللحام، وعليه أن يحرك يده بسرعة متزايدة مناسبة على طول خط اللحام متزامناً مع نقصان طول قطب اللحام لزيادة التيار الكهربائي نسبياً.
3. هذه الطريقة تتطلب إزالة الخبث المتكون على سطح منطقة اللحام مباشرة بعد الانتهاء من عملية اللحام، وبعدم إزالته بالكامل وتنظيف منطقة اللحام منه سيؤدي إلى تآكل شديد لتلك المنطقة ومن ثم فشل وصلة اللحام، وكذلك يجب إزالة الخبث كلياً بالفرشاة السلكية قبل البدء بعملية لحام أخرى في عمليات اللحام متعددة المراحل لأنها تشكل طبقة عازلة ضعيفة بين طبقات اللحام، ولهذا السبب أيضاً تتطلب عملية اللحام مهارة عالية للعامل مما يزيد من كلفة العمل وبالتالي كلفة الملحومات.

تتم معالجة المشاكل الناتجة عن تناقص طول أقطاب اللحام نتيجة استهلاكها وكذلك خسائر معدن سلك اللحام المتبقي في طرف تثبيته بالحامل بتقنيات وطرائق بديلة من طرائق لحام القوس الكهربائي، باستخدام أسلاك لحام تغذى باستمرار لعملية اللحام.

2- لحام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المحجوب بالغاز الخامل Gas Metal Arc Welding

الطريقة (GMAW) هي أحدى الطرائق المتطورة في عمليات اللحام بالقوس الكهربائي والتي تم استخدامها منذ سنة 1950 للحام الألمُنيوم وسبائكه باستعمال غاز الآركون والتي سميت تبعاً لذلك اللحام المعدني بالغاز الخامل (MIG). تستعمل في هذه الطريقة الأسلاك المستهلكة العارية (بدون تغطية بالمواد الكيمياوية المساعدة للصهر) مع حجاب غازي للحفاظ على بركة منصهر اللحام من الأكسدة والتماس بالهواء، وذلك عن طريق تدفق وغمر منطقة اللحام بغاز خامل مثل الآركون، الهيليوم، ثاني أوكسيد الكاربون، أو خليط من غازات أخرى، ويتم اختيار نوع الغاز أو الخليط الغازي بحسب نوع المعادن المراد لحامها، **الغازات الخاملة** تستعمل مع الألمُنيوم وسبائكه وكذلك الفولاذ المقاوم للتآكل، أما غاز ثاني أوكسيد الكاربون فيستعمل للفولاذ واطئ أو متوسط الكاربون. استعمال السلك العاري والغاز الخامل معاً يؤدي إلى عدم تكون طبقة الخبث فوق سطح اللحام، ما يساعد على عدم الحاجة لتنظيف سطح اللحام وبالتالي إمكانية إجراء لحام بطبقات متعددة مباشرة. باستعمال أسلاك لحام طويلة يمكن تغذيتها من بكرة الأسلاك وليس أقطاباً منفردة وكذلك عدم الحاجة إلى تنظيف أسطح اللحام، لذا تتميز هذه الطريقة عن سابقتها (SMAW) بالإنتاجية العالية نسبة لوقت اللحام إذا استعملت يدوياً، وإمكانية استخدامها بشكل آلي ومؤتمت بسهولة والذي يساعد أيضاً بالإنتاجية العالية، فضلاً على عدم وجود أية فضلات لأسلاك اللحام. الشكل (2-6) يوضح مخطط لعملية اللحام.



شكل 2-6 مخطط عملية اللحام بالأقطاب العارية والغاز الخامل

سلك اللحام المستعمل في هذه الطريقة يتراوح قطره بحدود (0.8-6.5 mm) بالاعتماد على سمك قطعة العمل ومعدل سرعة اللحام، ويغذى باستمرار لبركة اللحام وبشكل آلي من خلال مِدسرة (مسدس) اللحام كما مبين في الشكل (2-7).

شكل 2-7 ماكنة لحام الأقطاب العارية المغمورة بالغاز الخامل مع مسدس اللحام

3- لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة الحاوية على مساعد الصهر

Flux-Cored Arc Welding (FCAW)

طريقة مشابهة لسابقتها إلا أن قطب اللحام عبارة عن قطب مجوف يملأ بمساعد الصهر ويزود من لفة طويلة لتغذية منطقة اللحام بصورة مستمرة، القطب المجوف ينتج قوساً كهربائياً أكثر استقراراً، ويحسن من شكل خطوط اللحام، كذلك يحسن الخواص الميكانيكية للملحومة، مساعد الصهر يكون أكثر مرونة من مساعد الصهر في الأقطاب المغلفة ويضاف له عناصر معدنية سبائكية فضلاً على مواد مقوّمة لتكون الحجاب الغازي ولهذا تسمى هذه التقنية بالحجاب الغازي المتكون ذاتياً.

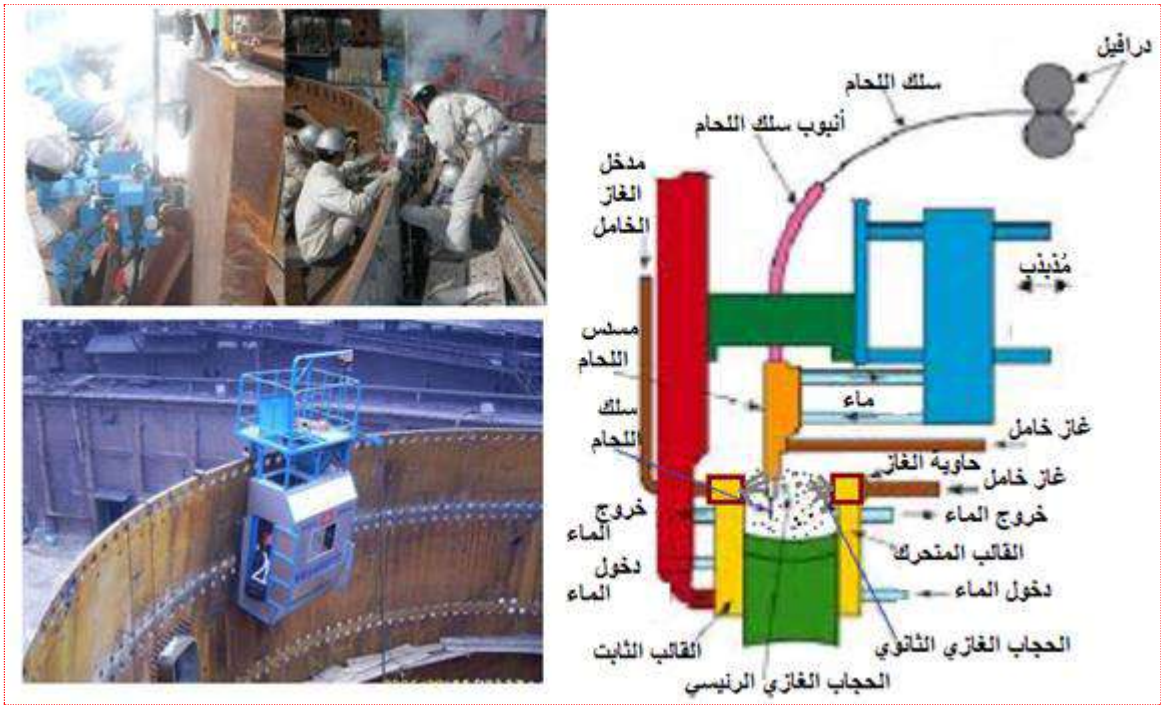
هنالك تقنية متطورة أخرى لتكوين الحجاب الغازي باستعمال غاز خامل وطريقة تدفق الغاز وغمر منطقة اللحام مشابهة للطريقة السابقة، يستعمل ثاني أوكسيد الكاربون لقطع العمل المصنوعة من الفولاذ أو يستعمل خليط غازي من غاز الآركون وثاني أوكسيد الكاربون للحام قطع الفولاذ المقاوم للتآكل، وتسمى هذه التقنية بالحجاب الغازي المجهز خارجياً. مميزات هذه الطريقة من طرائق اللحام بالقوس الكهربائي بالأقطاب المستهلكة المجوفة هي نفسها للطريقة السابقة (GMAW)، فضلاً على تحسن جودة اللحام من ناحية الأسطح الملساء والمنتظمة. الشكل (2-8) يوضح مخطط الطريقة.

شكل 2-8 مخطط عملية اللحام بالسلك المجوف مع ماكنة اللحام

4- لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المحاطة بالغاز الحاجب Electrogas Welding (EGW)

تستعمل هذه الطريقة بصورة رئيسة في لحام الحافات العمودية لقطع العمل وبمرحلة واحدة لوصلة اللحام التناكبية (Butt Joint) والأخدودي (Groove)، ماكنة اللحام المستعملة تكون كبيرة الحجم وذات ملحقات متعددة. تُعد هذه الطريقة كالطرائق السابقة من أنواع اللحام بالقوس الكهربائي بالأقطاب المستهلكة المستمرة والتي تكون إما مجوفة بمساعد الصهر أو عارية باستعمال غازات خاملة، يلحق بالماكنة قوالب حصر بشكل أحذية لغرض حصر منصهر المعدن وعدم خروجه إلى خارج منطقة اللحام، وهذه الحاصرات تبرد بالماء لمنع انصهارها كما هو موضح بالشكل (2-9). إن العملية تنجز آلياً باستخدام رأس لحام متحرك يتحرك شاقولياً للأعلى وإملاء التجويف باللحام بمرحلة واحدة، مع إمكانية استخدام أكثر من قطب واحد. مقدار التيار الكهربائي في هذه الطريقة عالي ويتجاوز (750 A) في حالة استخدام أقطاب مجوفة ويصل إلى (400 A) عند استخدام الأقطاب غير المجوفة، قدرة ماكنة اللحام بحدود (20 kW)، ولهذا يمكن لحام قطع عمل سميكة يتراوح سمكها (12-75 mm) من معادن مختلفة مثل الفولاذ، التيتانيوم، وسبائك الألمُنيوم. الغازات الخاملة المستعملة هي نفسها المستعملة بالطرائق السابقة واعتماداً على نوع المعدن المراد لحامه. هنالك تقنية مشابهة لهذه الطريقة تسمى لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المحاطة بمساعد الصهر (ESW).

تطبيقات هذه الطريقة تتضمن تشييد الجسور المعدنية، بناء السفن، الخزانات التي تتحمل ضغوط والخزانات الأرضية الكبيرة، حاويات الخزن، والأنابيب كبيرة الأقطار ذات الجدران السميكة.

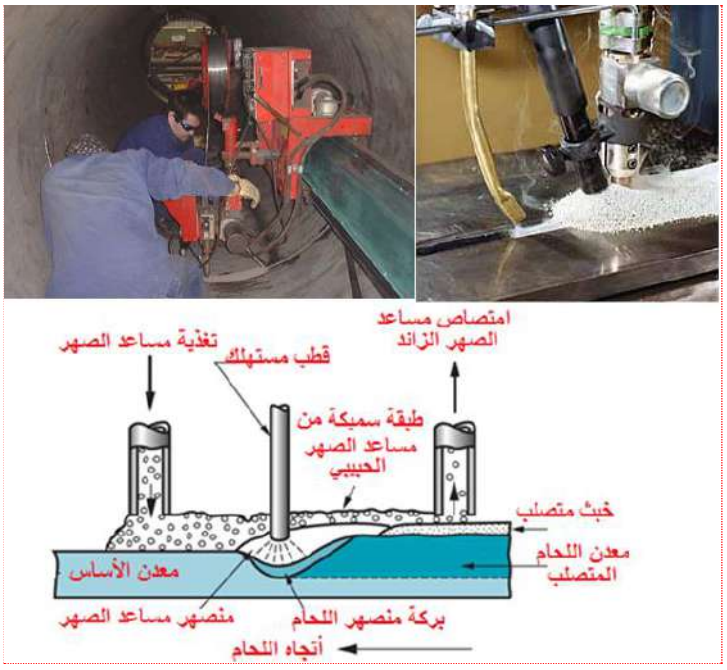


شكل 2-9 مخطط عملية اللحام بالغاز الحاجب مع صور للحام موقعي

5- لحام القوس الكهربائي المغمور بمساعد صهر حبيبي

Submerged Arc Welding (SAW)

استخدمت هذه الطريقة منذ سنة 1930 متزامنةً مع البدء بعمليات اللحام الآلية. يحجب قوس اللحام في هذه الطريقة بحبيبات مساعد الصهر المتكونة من الكلس، وسليكا، وأوكسيد المنغنيز، وفلوريد الكالسيوم، وعناصر أخرى والتي تحقن لمنطقة اللحام بالجاذبية، ولهذا السبب فإن هذه الطريقة لها محددات بالوضع الأفقي للحام. تغلف الطبقة السميكة من مساعد الصهر بشكل تام منصهر اللحام وتمنع من حدوث التطاير (طشار) والشرر (Sparks) وتعمل على كبت (كاتم) الأشعة فوق البنفسجية والدخان ولذا تُعد هذه الطريقة أكثر أماناً من الطرائق الأخرى، فضلاً على أنها تعمل كعازل حراري للمنطقة وبذلك تكون جودة الملحومات ومتانتها عاليتين. ويمكن معالجة مساعد الصهر الزائد وإعادة استعماله. إن **قطب اللحام** عبارة عن سلك عاري قطره بحدود (1.5-10 mm)، يغذى آلياً من ملف طويل من خلال مسدس اللحام. تتراوح قيمة التيار الكهربائي في هذه الطريقة (300-2000 A) ومكائن اللحام تعمل بمصدر كهربائي (400 V). مميزات هذه الطريقة تتضمن السرعة العالية للحام، وسهولة الأتمتة للعمل الإنتاجي المستمر إذ تصل إنتاجيتها إلى أكثر من إنتاجية لحام القوس الكهربائي الاعتيادي بعشر مرات ، ويمكن تنفيذها للمقاطع الإنشائية والمقاطع الأخرى الفولاذية السبائكية وغير السبائكية السميكة التي يصل سمكها إلى (25 mm) ومنها الفولاذ المقاوم للتآكل، **وهي غير ملائمة للفولاذ عالي الكاربون**، وفولاذ العُدد، ومعظم المعادن غير الحديدية. وتتضمن تطبيقاتها الخزانات الكبيرة، ومكونات المكائن الثقيلة، وغيرها. الشكل (2-10) يبين مخطط عملية لحام القوس الكهربائي لهذه الطريقة.



شكل 2-10 مخطط وصور لحام القوس الكهربائي المغمور بالحبيبات

2-3-2 طرائق لحام القوس الكهربائي بالأقطاب غير المستهلكة

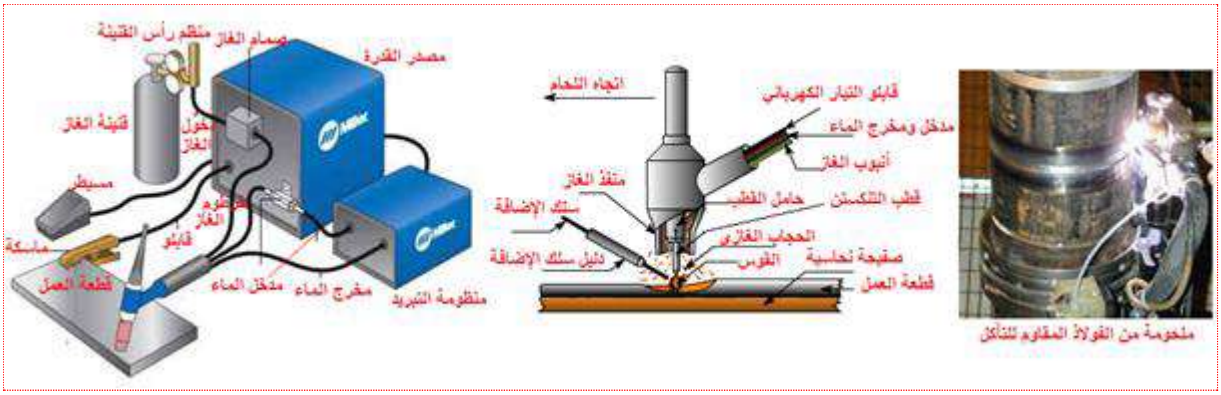
Non-Consumable Electrodes Arc Welding

الطرائق المذكورة أعلاه من لحام القوس الكهربائي جميعها تستهلك الأقطاب بجميع أشكالها ومسمياتها، سيتم في هذه الفقرة تناول طرائق أخرى للحام القوس الكهربائي ولكن بدون استهلاك الأقطاب وغالباً ما تكون مصنوعة من التنكستن وهي كالآتي:

1- لحام القوس الكهربائي بأقطاب التنكستن Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

هذه الطريقة لها تسمية شائعة وهي اللحام بالتنكستن والغاز الخامل (TIG)، يزود معدن الإضافة عن طريق سلك أو قضيب الحشو المنفصل، وفي بعض تطبيقاتها يتم اللحام بدون معدن الإضافة كما هو في لحام المفاصل المحكمة. مكونات معدن الإضافة يجب أن تشابه مكونات معدن الأساس، كما أن مساعد الصهر في هذه الطريقة لا يتم استخدامه بل يتم استخدام الغاز الخامل لأغراض الحجاب الغازي المطلوب في أثناء عملية اللحام، وغالباً ما يستعمل الآركون أو الهيليوم أو خليط من كليهما لهذا الغرض، ولذا لا تحتاج هذه الطريقة إلى تنظيف السطح بعد اللحام لعدم تكون الخبث. بسبب عدم استهلاك أقطاب التنكستن سيبقى الخلوص بين حافة القطب وقطعة العمل المراد لحامها ثابتاً وبالتالي سيعمل على استقرار قوس اللحام وثبوته، علماً أن سبب استعمال معدن التنكستن يعود إلى درجة انصهاره العالية التي هي بحدود (3410°C). تضاف معادن خاصة مثل الثوريوم والزركونيوم إلى معدن التنكستن عند صناعة الأقطاب لتحسين خصائص الانبعاث الإلكتروني. مشكلة تلوث حافة أقطاب التنكستن تكون مؤثرة وخصوصاً في التطبيقات المهمة بسبب حصول لحام غير مستمر، ولهذا يجب أن يمنع التماس بين الأقطاب ومنصهر اللحام. الشكل (2-11) يوضح مخطط طريقة اللحام بأقطاب التنكستن ومُعداتها.

مكائن اللحام تتوفر بقدرات تتراوح بين (8-20 kW) وقد تعمل بالتيار المستمر DC ومقداره (200 A) أو تعمل بالتيار المتناوب ويكون مقداره في هذه الحالة (500 A) بالاعتماد على معدن قطع العمل. وبصورة عامة يفضل **استخدام التيار المتناوب** عند لحام معادن الألمُنيوم والمغنسيوم بسبب فعل التنظيف الذاتي المصاحب لتناوب التيار الكهربائي وبهذا تزال الأكاسيد وبالتالي تتحسن جودة اللحام. تطبيقات هذه الطريقة كثيرة ومتنوعة تشمل لحام جميع المعادن وعلى وجه الخصوص الألمُنيوم، المغنسيوم، التيتانيوم، والمعادن ذات درجات الانصهار العالية (Refractory Metals)، وهذه الطريقة مناسبة جداً للحام قطع العمل الرقيقة، فضلاً على لحام المعادن غير المتشابهة، ومع هذا فإن بعض المعادن مثل حديد الزهر، الحديد المطروق، والتنكستن تكون صعبة اللحام بهذه الطريقة. الغازات الخاملة المستعملة مع هذه الطريقة غالية نسبياً لذا سترفع كلف العمل أعلى من طريقة لحام القوس الكهربائي الاعتيادية (SMAW) ولكن يتم إنتاج ملحومات عالية الجودة وذات أسطح جيدة الإنهاء.



شكل 2-11 مخطط ومُعدات لحام القوس الكهربائي بأقطاب التنكستن

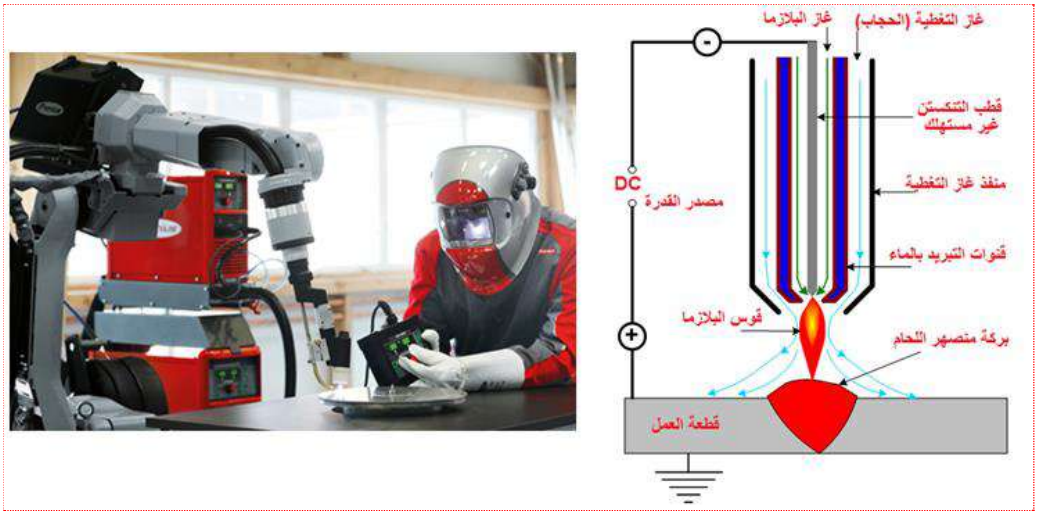
2- لحام القوس الكهربائي بالبلازما Plasma Arc Welding (PAW)

استخدمت هذه التقنية المتطورة من طرائق لحام القوس الكهربائي سنة 1960، وتُعد حالة خاصة من الطريقة السابقة لكونها تستخدم نفس أقطاب التنكستن غير المستهلكة، في هذه الطريقة يوجه قوس من البلازما المركز تجاه منطقة اللحام وبسرعة عالية، البلازما هو عبارة عن غاز ساخن متأين يحوي عدداً متساوياً تقريباً من الأيونات والإلكترونات متكوناً من الآركون أو خليط من الآركون والهيدروجين. مقدار التيار الكهربائي المستخدم واطئ نسبياً وعادةً يكون بحدود (100 A). ترتفع درجات الحرارة في منطقة اللحام ارتفاعاً كبيراً تصل لحد (28000°C) أو أكثر يسبب انصهار أي معدن معروف، وأن سبب الارتفاع العالي لدرجات الحرارة هو أن قوس لحام البلازما يتكون في منطقة ضيقة نسبياً ما بين قطب التنكستن وفتحة خروج الغاز الساخن الصغيرة. في بعض الأحيان يستخدم معدن الإضافة ويغذى بنفس أسلوب الطريقة السابقة، طبقة الحجاب الغازية تكون بشكل حلقة خارجية تغطي قوس البلازما ومنصهر اللحام وتستعمل غازات مثل الآركون والهيليوم. الشكل (2-12) يوضح مخطط العملية وصورة للماكنة.

هنالك طريقتان تستخدمان في لحام القوس الكهربائي باستخدام البلازما، في الطريقة الأولى التي تسمى انتقال القوس الكهربائي (Transferred Arc) تكون قطع العمل التي يتم لحامها جزءاً من الدائرة الكهربائية، إذ ينتقل القوس الكهربائي من القطب إلى قطعة العمل ومن هنا جاءت تسمية هذه الطريقة. الطريقة الأخرى هي القوس الكهربائي اللاانتقالي (Non-Transferred Arc) التي يكون فيها القوس الكهربائي بين القطب والنفاث، وتسلط الحرارة على قطعة العمل عن طريق غاز البلازما. **تطبيقات اللحام بالبلازما** تشمل تجميع مقاطع هياكل السيارات مثل مقاطع الأبواب والشبابيك وكابينة القيادة، فضلاً على الاستخدامات الأخرى التي تتطلب ملحومات بجودة ممتازة وتكون فيها مناطق اللحام ضيقة جداً. في هذه الطريقة يمكن لحام مختلف المعادن حتى المعادن صعبة اللحام مثل التنكستن، حديد الزهر، البرونز، الرصاص، والمغنسيوم، وبمفاصل تراكبية أو تناكبية. **محددات** هذه الطريقة تتضمن الكلفة العالية للمُعدات وكبر مسدس اللحام الذي يحدد استخدامها في مفاصل بأشكال معينة.

يتميز لحام القوس الكهربائي بالبلازما من باقي أنواع لحام القوس الكهربائي بالمميزات الآتية:

- تركيز أعلى للطاقة، يستخدم في الملحومات عميقة السمك وتكون منطقة اللحام فيها ضيقة.
- استقرارية قوس اللحام أفضل.
- انتشار حراري لباقي قطعة العمل أقل.
- سرعة لحام أعلى تصل إلى (120-1000 mm/min).
- جودة لحام ممتازة.



شكل 2-12 مخطط عملية اللحام بالبلازما مع صورة الماكنة

إلا أن الكلف العالية لمكائن لحام البلازما أحد أسباب تحديد استخدامها.

هنالك طرائق أخرى في لحام القوس الكهربائي ولكنها أقل أهمية، منها اللحام بأقطاب الكرافيت، لكن انحسر استعمال هذه التقنية في الوقت الحاضر بالرغم من كونها الأولى بالاستعمال بلحام القوس الكهربائي، ويرمز لها بـ (CAW)، وتجدر الإشارة إلى وجود تقنية خاصة من اللحام بالقوس الكهربائي لتثبيت براغي عديمة الرأس (وتد) أو ما شابه على قاعدة ويرمز لهذه التقنية بـ (SW)، لاحظ الشكل (13-2).

شكل 2-13 ماكنة لحام البراغي

أسئلة الفصل الثاني

س1) عرف المنطقة المتأثرة باللحام (HAZ).

س2) لماذا تُعد الطاقة الكهربائية أحد أهم مصادر الحرارة المطلوبة لإجراء عملية لحام الحالة السائلة؟

س3) عرف القوس الكهربائي، وكيف تحدث عملية اللحام عند استخدامه؟

س4) قارن بين أنواع الربط بالنسبة إلى نوع التيار والقطبية، موضحاً إجابتك بالرسم.

س5) عرف مساعد الصهر، وماهي أهم فوائده ووسائل إضافته؟

س6) ما هي أهمية الحجاب الغازي في لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المغلفة؟

س7) ما هي أهم المعايير لاختيار التيار المناسب في لحام القوس الكهربائي باستخدام الأقطاب المغلفة؟ وما هي أهم التطبيقات الشائعة لهذا النوع؟

س8) قارن بين طريقتي لحام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المحجوبة بالغاز الخامل والأقطاب المجوفة وفي داخلها مساعد الصهر.

س9) اشرح آلية عملية اللحام باستخدام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المحجوبة بمساعد صهر حبيبي، وما هي أهم مميزات هذه الطريقة وتطبيقاتها، ومحددات استخدامها.

س10) ما هي أهم تطبيقات لحام القوس الكهربائي بأقطاب التنكستن (TIG)؟ ولماذا يفضل استخدام التيار المتناوب فيها عند لحام معادن الألُمنيوم والمغنيسيوم؟

س11) ما هي أهم مميزات لحام القوس الكهربائي بالبلازما؟ وما هي محددات استخدام هذه الطريقة، وأهم تطبيقاتها؟

س12) املأ الفراغات التالية بما يناسبها:

1. أهم مصادر الطاقة اللازمة لتوليد الحرارة المطلوبة لعملية لحام الحالة السائلة هي: ..... و..... و..... و..... .
2. من أهم معايير جودة لحام القوس الكهربائي ..... .
3. تصنف الأقطاب المستعملة في لحام القوس الكهربائي إلى ..... و ..... .

4. تصنف أقطاب (أسلاك) اللحام بحسب الجمعية الأمريكية للحام استناداً إلى ..... و..... و..... و..... .
5. يمكن أن تقسم خسائر القدرة في لحام القوس الكهربائي إلى خسائر بسبب ..... وأخرى بسبب ..... .
6. يحدد قطر سلك اللحام المستخدم في لحام القوس الكهربائي باستخدام الأقطاب العارية المغمورة بالغاز الخامل بالاعتماد على ..... و..... .
7. يعتمد اختيار القطبية في مكائن التيار المستمر في لحام القوس الكهربائي باستخدام الأقطاب المغلفة على ..... و..... و..... .

س13) علل ما يأتي:

1. يحدث في لحام القوس الكهربائي ترابط معدني وثيق.
2. هنالك ضياع كبير للوقت في لحام القوس الكهربائي باستخدام الأقطاب المغلفة المستهلكة.
3. يتم عمل حجاب لقوس اللحام وبركة منصهر اللحام في لحام القوس الكهربائي.
4. تكون خسائر القدرة المجهزة لعملية اللحام قليلة عند استخدام الأقطاب المستهلكة.
5. أعمال لحام كثيرة تتم في المعامل والمصانع باستخدام لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المغلفة.
6. عدم الحاجة إلى تنظيف سطح اللحام في لحام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المغمورة بالغاز الخامل.
7. تُعد طريقة لحام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المغمورة بمساعد صهر حبيبي أكثر أماناً من طرائق اللحام الأخرى.
8. ضرورة منع التماس بين الأقطاب ومنصهر اللحام في لحام القوس الكهربائي بأقطاب التنكستن.

س14)

في عملية لحام مستمرة حول أنبوب فولاذي بقطر (14 cm) باستخدام اللحام بالأقطاب المغمورة تحت سيطرة آلية بفرق جهد يساوي (25 V) وتيار (300 A)، الأنبوب يدور بسرعة واطئة نسبة إلى رأس لحام ثابت، كفاءة عملية اللحام هي 65% ومساحة مقطع اللحام تساوي ($0.4\ cm^2$) ووحدة الطاقة النوعية لصهر هذا المعدن تساوي ($9.75\ J/mm^3$)، جد الآتي: 1- معدل حجم الانصهار، 2- سرعة اللحام، 3- زمن إنجاز اللحام. ج1: ($500\ mm^3/s$) ج2: (12.5 mm/s) ج3: (35.2 s)

الفصل

الثالث

لحام المقاومة الكهربائية

Resistance Welding

الأهداف

الهدف العام

سيتمكن الطالب من معرفة طرائق لحام المقاومة الكهربائية وتقنياتها وتطبيقاتها في الصناعة، ويدرك أهمية تزامن متغيرات العملية ومقاديرها ويرسم الدورة البسيطة لها، ويمكنه أن يحسب مقدار كمية الحرارة المتولدة في منطقة اللحام، كذلك يتمكن من معرفة المعادن المتوافقة مع لحام المقاومة الكهربائية.

الأهداف الخاصة

بعد إنهاء دراسة مفردات الفصل الثالث وفهمها سوف يكون الطالب قادراً على الآتي:

1. يعرف لحام المقاومة الكهربائية.
2. يعرف مميزات لحام المقاومة الكهربائية.
3. يفهم العلاقة بين متغيرات لحام المقاومة الكهربائية.
4. يعرف المقاومات السبعة ومواقعها.
5. يعرف قانوني أوم وجول لنظرية لحام المقاومة الكهربائي.
6. يفهم العلاقة بين قيمة المقاومة والحرارة المتولدة.
7. يتمكن من حساب مقدار الحرارة المتولدة في بقعة اللحام.
8. يعرف ظاهرتي التطاير والانغراس.
9. يعرف زمن العصر وزمن التثبيت.
10. يعرف المنطقة المتأثرة حرارياً.
11. يعرف طرائق لحام المقاومة.
12. يعرف مكائن لحام النقطة.
13. يعرف تطبيقات لحامي الدرز وذات البروز.

لحام المقاومة الكهربائية Resistance Welding

1-3 مقدمة Introduction

يُعد لحام المقاومة الكهربائية من مجموعة لحام الحالة السائلة (المنصهرة)، الذي يستخدم فيه طاقتان متزامنتان هما الضغط والحرارة لإنجاز عملية اللحام. الحرارة المتولدة ناتجة عن المقاومة الكهربائية لسريان التيار الكهربائي في منطقة التداخل (منطقة اللحام). مقدار شدة التيار الكهربائي عالية جداً قد تصل إلى 100 kA في بعض التطبيقات، ويعتمد هذا المقدار على نوع المعدن وعلى سمك قطعة العمل، وأن مقدار فرق الجهد واطئ نسبياً غالباً ما يكون أقل من 25 V، وكذلك مقدار المقاومة الكهربائية واطئة جداً.

لقد أوضح البروفسور Elihu Thompson من معهد فرانكلين في فيلادلفيا في الولايات المتحدة الأمريكية للمرة الأولى إمكانية لحام قطعتي معدن بوساطة لحام المقاومة الكهربائية، وقد اكتملت تجاربه سنة 1886م بهذا الخصوص، في هذه الأيام يتم استخدام لحام المقاومة الكهربائية بشكل واسع جداً لمرونة طرائقه في لحام المعادن مع مديات كبيرة من أحجام وأشكال قطع العمل وأنواع موادها، والسبب في ذلك هو توفر مكائن لحام المقاومة الكهربائية وبقدرات وأنواع مختلفة فضلاً على إمكانية عملها آلياً وبالسيطرة الرقمية المحوسبة (CNC)، لهذا ترى استخدام لحام المقاومة الكهربائية في الخطوط الإنتاجية لوسائط النقل المختلفة فضلاً على الخطوط الإنتاجية لمختلف البضائع.

المميزات المهمة للحام المقاومة الكهربائية هي كالآتي:

- عدم حاجة لحام المقاومة الكهربائية لمعادن الإضافة مثل أسلاك اللحام وغيرها.
- إمكانية الحصول على إنتاجية عالية.
- سهولة التصميم والإنتاج الآلي المؤتمت.
- لا يحتاج إلى مستوى عمالة ذوي مهارة عالية كما هو الحال في لحام القوس الكهربائي.

بالرغم من إمكانية تكرار (لألاف المرات في بعض الأحيان) عمليات لحام المقاومة الكهربائية يحافظ الإنتاج على نفس الجودة، وبنفس الوقت هنالك موثوقية عالية حتى في هذا التكرار

أما أهم محددات لحام المقاومة الكهربائية فهي:

- الكُلفة العالية للمكائن، عادة أعلى بكثير من مكائن القوس الكهربائي.
- وصلات اللحام محددة بنوع الوصلة التراكبية في معظم طرائق لحام المقاومة الكهربائية.
- لا يمكن تنبؤ استهلاك الأقطاب وعمرها أحياناً، والذي يؤثر على الجودة والإنتاجية.

2-3 متغيرات لحام المقاومة الكهربائية Resistance Welding Parameters

تعتمد الطاقة الحرارية المجهزة إلى عملية اللحام على سريان التيار الكهربائي، المقاومة الكهربائية الكلية للدائرة، وزمن سريان التيار الكهربائي، وعليه فإن مقدار الحرارة الكلية للعملية يمكن أن يعبر عنه بالمعادلة الآتية على وفق قانوني أوم وجول:

$$H = I^2 R t \qquad (3\text{-}1)$$

إذ أن

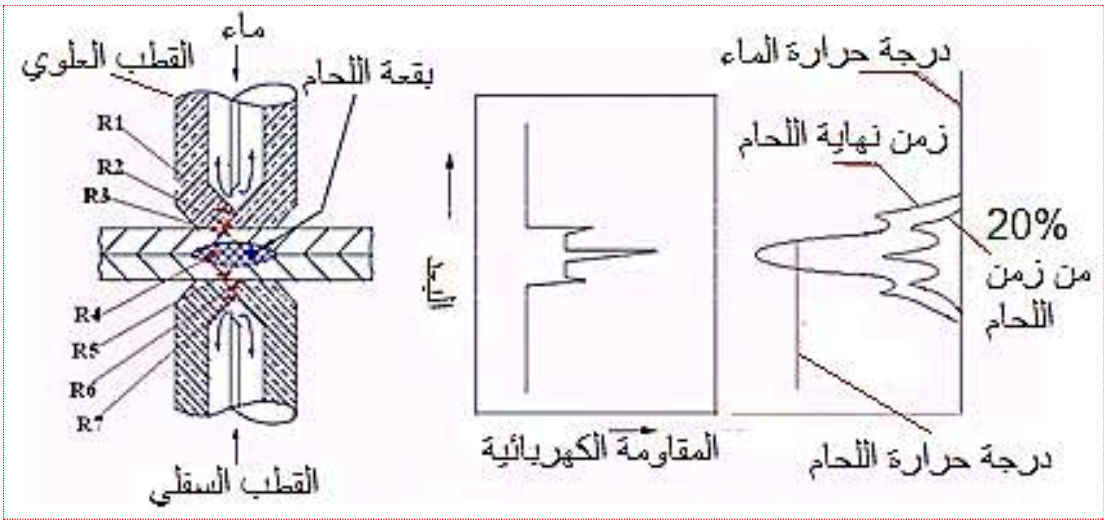
H	الحرارة الكلية	J
I	التيار الكهربائي	A
R	المقاومة الكهربائية الكلية	Ω
t	زمن سريان التيار الكهربائي	s

التيار الكهربائي المستعمل في لحام المقاومة الكهربائية عالٍ جداً ويتراوح بين (5000-100000 A)، مع أن فرق الجهد واطئ نسبياً عادة أقل من (25 V)، في حين أن زمن سريان التيار الكهربائي قصير جداً في معظم طرائق لحام المقاومة الكهربائية، لربما يكون ما بين (0.1-0.4 s) في التطبيقات النموذجية للعملية، ولهذا يتم قياسه في معظم تطبيقات لحام المقاومة الكهربائية بوحدات الذبذبة (cycle)، فعلى سبيل المثال إذا حدد زمن اللحام بـ (10 cycles) يعادل (0.2 s). كذلك أن مقدار المقاومة الكهربائية الكلية واطئ جداً ويكون ما يقارب (0.0001 Ω).

إن المقاومة الكهربائية الكلية في التطبيقات الاعتيادية هي حاصل جمع المقاومات الكهربائية السبعة الآتية:

1. مقاومة القطب العلوي.
2. مقاومة التماس بين القطب العلوي وقطعة العمل الأولى.
3. مقاومة قطعة العمل الأولى.
4. مقاومة التماس بين قطعتي العمل الأولى والثانية.
5. مقاومة قطعة العمل الثانية.
6. مقاومة التماس بين القطب السفلي وقطعة العمل الثانية.
7. مقاومة القطب السفلي.

للحصول على جودة عالية في الإنتاجية لعمليات لحام المقاومة الكهربائية من الضروري أن تكون قيمة المقاومة بتسلسل (4) مقاومة التماس بين قطعتي العمل (Contact Resistance) أعلى من جميع المقاومات المذكورة أعلاه، لأن المرغوب هو توليد أعلى قيمة للحرارة في منطقة التماس لصهر هذه المنطقة فقط دون غيرها وإنجاز عملية اللحام، وكذلك أن تكون مقاومات التسلسل (1 و 7) و (2 و 4) وهي مقاومة الأقطاب ومقاومة التماس ما بين الأقطاب وقطعتي العمل أقل ما يمكن. إذ إن زيادة مقادير هذه المقاومات ستسبب في توليد حرارة غير مرغوب فيها، وبالتالي تؤدي إلى قصر العمر التشغيلي للأقطاب. من هنا جاء استخدام أقطاب مصنوعة من النحاس النقي في معظم تطبيقات لحام المقاومة الكهربائية كونه ذا مقاومة واطئة جداً، فضلاً على فكرة التبريد المستمر للأقطاب بالماء لإطالة العمر التشغيلي لها. أما مقاومات التماس بين الأقطاب وقطعتي العمل فتعتمد على مجموعة من العوامل منها شكل وحجم حافة الأقطاب وحالة أسطح قطعة العمل من حيث خلوها من الأتربة والزيوت والرطوبة والأكاسيد وغيرها من الشوائب، فضلاً على قوة الضغط المسلطة من الأقطاب، ولذا يجب مراعاة جميع هذه العوامل لتقليل مقاومة التماس (2 و 4). والشكل (3-1) يوضح مخططاً لمناطق المقاومات الكهربائية وتوزيع درجات الحرارة في أثناء عملية لحام المقاومة النقطي التي تبين أن أعلى درجة حرارة هي في منطقة التلامس بين قطعتي العمل متوافقاً مع أعلى قيمة للمقاومة الكهربائية، وأقل درجة حرارة هي درجة حرارة ماء التبريد الداخل للأقطاب، وأن درجات الحرارة لبقية المناطق هي ما بين أعلى درجة وأوطأ درجة علماً أن المخطط يوضح درجات الحرارة لزمن 20% من البدء بسريان التيار الكهربائي وكذلك نهاية سريان التيار الكهربائي.



شكل 3-1 نطاق المقاومات الكهربائية وتوزيع درجات الحرارة لعملية لحام النقطة

مثال 1

في لحام المقاومة النقطي لصفيحتين من الفولاذ بسمك (1.2 mm) استخدم تيار قيمته (10000 A) بزمن مقداره (0.1 s)، كانت المقاومة الكهربائية الكلية بحدود (0.0001 Ω)، احسب مقدار الطاقة الحرارية المتولدة في هذه العملية.

الجواب

بتطبيق المعادلة (3-1):

$$H = I^2 R t$$

$$H = 10000^2 \times 0.0001 \times 0.1 = 1000 \text{ J}$$

ملاحظة

مقدار الطاقة الحرارية المتولدة يساوي (1000 J)، علماً أن جزءاً قليلاً نسبياً من هذه الحرارة المتولدة ستعمل على صهر نقطة اللحام (منطقة التماس) وباقي الحرارة ستفقد عبر قطعتي العمل، والأقطاب بالتوصيل، وجزء آخر سيفقد الحرارة إلى الهواء المحيط بالحمل الطبيعي والإشعاع.

تُعرف وحدة الطاقة النوعية (U_m) بكمية الحرارة اللازمة لصهر حجم واحد من معدنٍ ما، وتُحسب من درجة حرارة الغرفة التي هي بحدود (22-25°C) ووحدة قياسها هي (J/mm^3).

مثال 2

احسب خسائر الحرارة عبر قطعتي العمل والأقطاب والهواء المحيط في المثال (1) أعلاه، إذا كان قطر بقعة اللحام الناتجة (4 mm) وسمكها (2 mm) ومقدار وحدة الطاقة النوعية (U_m) لصهر الفولاذ هو ($12 J/mm^3$).

الجواب

حجم (V) بقعة اللحام المتكون عبارة عن قرص صلد، حجمه = مساحة الدائرة × الارتفاع

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 \times h$$

$$V = \frac{\pi}{4} 4^2 \times 2 = 25.1 \text{ mm}^3$$

الحرارة المطلوبة لصهر (H_m) هذا الحجم من المعدن تساوي:

$$\mathbf{H_m = V \times U_m}$$

$$\mathbf{H_m = 25.1 \times 12 = 301.2}\ \text{J}$$

خسائر الحرارة (H_l) تساوي الفرق بين الحرارة المتولدة الكلية والحرارة المطلوبة للصهر:

$$\mathbf{H_l = H - H_m}$$

$$\mathbf{H_l = 1000 - 301.2 = 698.8}\ \text{J}$$

مثال 3

احسب النسبة المئوية لمقدار خسائر الحرارة للمثالين أعلاه.

الجواب

النسبة المئوية لخسائر الطاقة:

$$\mathbf{H_l\% = \frac{H_l}{H} \times 100 = \frac{698.8}{1000} \times 100 \approx 70\%}$$

يتضح مما تبين أعلاه أهمية الحرارة في عمليات لحام المقاومة الكهربائية، إلا أنها لا تُعد العنصر الوحيد لإنجاح العملية، إذ إن تأثير تسليط الضغط لا يقل أهمية عن الحرارة. يُسلط الضغط عبر الأقطاب وعند الحسابات والتحليل الهندسي لمتغيرات عملية اللحام، عادة تعتمد قوة الأقطاب (F_E) بدلاً من الضغط (P). لمتغير الضغط وظيفتان أساسيتان الأولى ضمان الاتصال بين قطعتي العمل والأقطاب قبل سريان التيار والثانية استمرار ضغط منطقة التداخل (بقعة اللحام) لحين إنجاز عملية اللحام. وتجدر الإشارة هنا إلى أن الضغط المسلط من قبل الأقطاب على قطعتي العمل يؤثر بمقدار مقاومة التماس الكهربائية بين الأقطاب وقطعتي العمل ومقاومة التماس بين قطعتي العمل (Contact Resistance)، إذ إن زيادة القوى الضاغطة تؤدي إلى تقليل مقاومتي التماس وبالتالي تقليل الحرارة المتولدة والعكس صحيح. لم يتم إدراج متغير قوة الضغط في المعادلة (3-1) ولكنه يؤثر على قيمة المقاومة الكهربائية إحدى حدود هذه المعادلة، عليه يجب أن يتم اختيار قوة ضغط مناسبة بحسب نوع معدن قطعة العمل وسمكها فضلاً على نوعية اللحام.

يُسلط ضغط الأقطاب بحسب نوعية ماكنة اللحام المستعملة، وأساليب تسليط الضغط إما يدوياً وإما ميكانيكياً (نابض ضاغطي) وإما هيدروليكي أو هوائي (Pneumatic)، والنوعان الآخران هما المستعملان في الخطوط الإنتاجية الكبيرة والمؤتمتة.

لما تقدم أعلاه، فإن متغيرات عملية لحام المقاومة التي ترتبط مع بعضها ارتباطاً وثيقاً ويمكن التحكم بها للسيطرة على جودة اللحام والإنتاجية العالية هي:

1. مقدار التيار الكهربائي.
2. قوة ضغط الأقطاب.
3. زمن سريان التيار الكهربائي.

عند تسليط قوة ضغط عالية نسبياً ستقل المقاومة الكهربائية لمنطقة التماس بين قطعتي العمل والأقطاب وهذا بحده مفيد عملياً لتقليل الحرارة المتولدة في تلك المنطقة، وبالتالي تقليل كل من: حدوث تطاير لمنصهر المعدن (Expulsion) من بقعة اللحام، واستهلاك الأقطاب، والانغراس للأقطاب بقطعتي العمل (Embedding). ولكن في نفس الوقت ستقل مقاومة التماس لقطعتي العمل وبالتالي تقليل الحرارة المتولدة المطلوبة لتكوين بقعة اللحام، إذ إن العلاقة بين قوة الضغط والمقاومة الكهربائية لمنطقة التماس هي علاقة عكسية تقريباً، ولهذا فالسيطرة على تسليط القوى من الأمور المهمة جداً.

أما فيما يخص زمن سريان التيار الكهربائي، فعند زيادته بشكل غير اعتيادي سيؤدي إلى حدوث تبخر لمادة العمل وحدوث المسامية الغازية في منطقة اللحام فضلاً على حدوث التطاير لمنصهر المعدن مما يقلل وبشكل كبير قوة الملحومة، فضلاً على انغراس الأقطاب في قطعتي العمل وحدوث تآكل موضعي فيهما وبالتالي قصر عمرهما التشغيلي.

هنالك متغيرات أخرى للحام المقاومة الكهربائية مثل زمن العصر (Squeeze Time) الذي هو عبارة عن الزمن اللازم ما بين مسك قطعة العمل وسريان التيار الكهربائي ويعتمد على نوع معدن قطعة العمل وسمكها. أما زمن التثبيت (Hold Time) بعد توقف سريان التيار الكهربائي مهم جداً، ويجب السيطرة عليه لتبريد الملحومة وإعطاء الشكل النهائي لبقعة اللحام، إذ في حالة رفع الأقطاب مباشرة عند توقف التيار ومازالت منطقة اللحام في طور السائل أو كحد أدنى في الحالة اللدنة (العجينية) سيؤدي إلى عدم تشكيل منطقة اللحام بصورة صحيحة، وبالتالي سيؤدي إلى ضعف منطقة اللحام ويؤثر سلباً على جودة الملحومة. يعتمد وقت التثبيت على كمية الحرارة المتولدة فضلاً على نوع المعدن المستعمل لقطعة العمل. وهنالك متغيرات أخرى تخص كل نوع من أنواع لحام المقاومة الكهربائية المختلفة.

3-3 طرائق لحام المقاومة الكهربائية Resistance Welding Processes

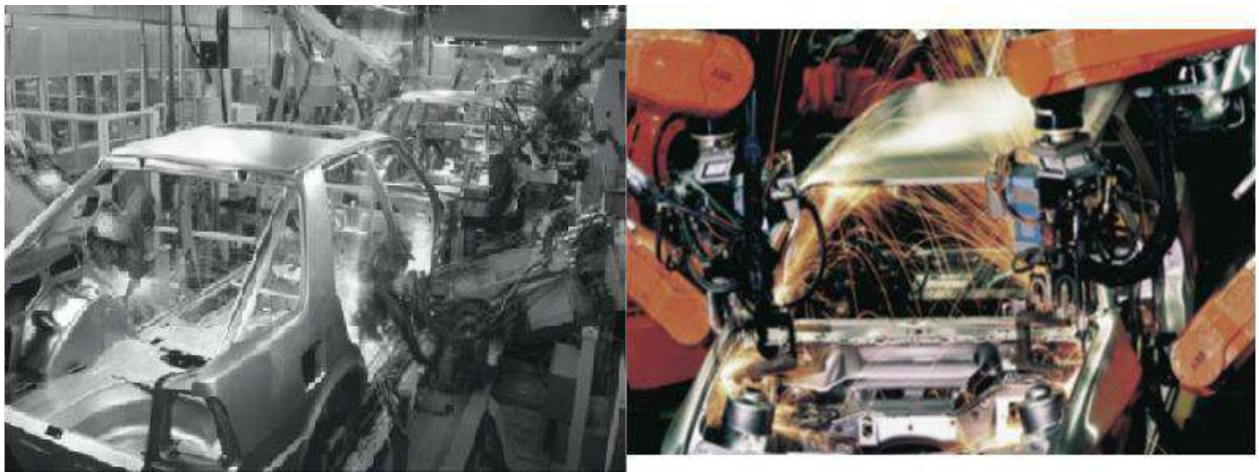
أهم طرائق لحام المقاومة الكهربائية إنتاجياً هي الآتي:

- لحام المقاومة النقطي Resistance Spot Welding (RSW)
- لحام الخط (الدرز) Resistance Seam Welding (RSEW)
- لحام البروز Resistance Projection Welding (RPW)

هنالك طرائق أقل أهمية إنتاجياً من الطرائق المذكورة، وهي لحام المقاومة التناكبي (المتقابل) (FW) الذي يستعمل في ربط الأجسام الأسطوانية وخصوصاً الأنابيب، ولحام المقاومة الكهربائي بالترددات العالية (HFRW) بحدود (10-500) kHz الذي فيه تقنية جديدة وذلك بتوليد الحرارة بوساطة التردد العالي بملف كهربائي حثي وتستعمل في تشكيل الأنابيب والذي يرمز له بـ (HFIW)، سيتم معرفة هذه الطرائق في مراحل دراسية لاحقة، في حين سيتم في الفقرات الآتية تناول الطرائق الثلاث المهمة المذكورة أعلاه.

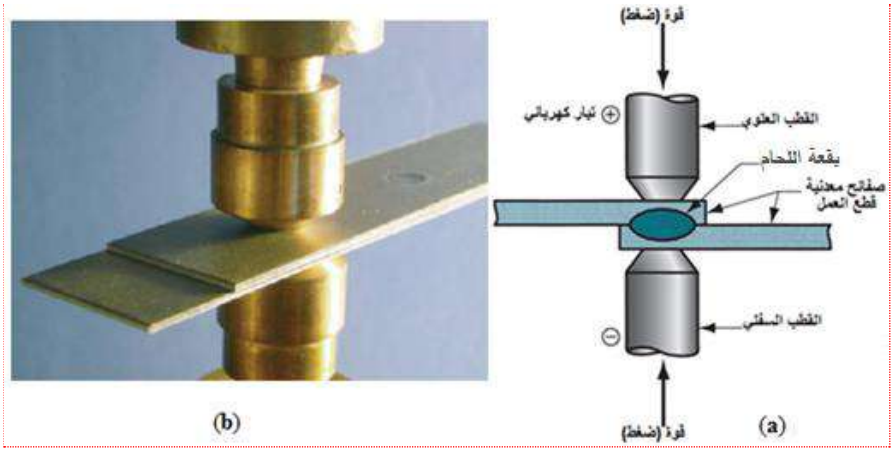
3-3-1 لحام المقاومة النقطي Resistance Spot Welding

تُعد هذه الطريقة من أهم طرائق لحام المقاومة الكهربائية صناعياً وتجارياً لكونها ذات تطبيقات واسعة جداً وخصوصاً في الخطوط الإنتاجية لصناعة وتجميع وسائط النقل وخصوصاً المركبات والأجهزة الكهربائية والأثاث المعدني وغيرها من التطبيقات الصناعية للصفائح المعدنية، ومن الجدير بالذكر أن هيكل المركبة النموذجية الصغيرة يحوي بحدود 10000 نقطة لحام من هذا النوع، وإن الإنتاج السنوي العالمي للمركبات يُعد بملايين الوحدات، ولهذا يمكن تصور أهمية عملية لحام المقاومة النقطي. الشكل (3-2) يوضح آلية لحام النقطة لإنتاج هيكل المركبات.

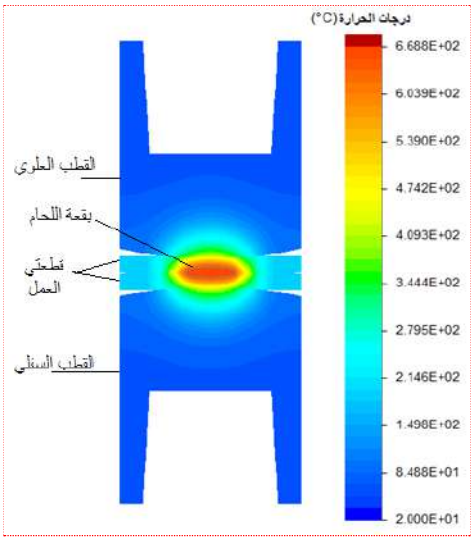


شكل 3-2 لحام النقطة لإنتاج هيكل المركبات

تتم في هذه العملية صهر الأسطح المتقابلة لوصلة تراكبية (Lap Joint) بموقع واحد بوساطة الأقطاب المتقابلة، هذه الطريقة تستعمل للحام الصفائح المعدنية بسمك (3 mm) أو اقل وباستعمال سلسلة من نقاط اللحام، الشكل (3-3) يوضح مخطط عناصر لحام المقاومة النقطي وصورة لعملية اللحام. حجم وشكل بقعة اللحام يتحدد من شكل ومساحة حافة الأقطاب ومن كمية الحرارة المتولدة في منطقة اللحام، لاحظ الشكل (3-4) الذي يمثل محاكاة رقمية لعملية لحام المقاومة النقطي لصفيحتي عمل مصنوعة من الألمُنيوم يوضح فيها حجم بقعة اللحام (Nugget) وتوزيع درجات الحرارة على صفيحتي العمل والأقطاب. إن معظم أشكال الأقطاب تكون دائرية المقطع، وفي بعض الأحيان تستعمل مقاطع أخرى مثل مربعة وسداسية وغيرها في تطبيقات خاصة. إن حجم بقعة اللحام (Nugget) الاعتيادية المتكونة في هذه العملية بأقطار تتراوح ما بين 4 mm و 10 mm مع المنطقة المتأثرة حرارياً (Heat Affected Zone) (HAZ) الممتدة قليلاً حول منطقة اللحام من المعدن الأساس، وعند تكوين بقعة لحام بصورة صحيحة يمكن الحصول على قوة للملحومة بنفس قوة المعدن الأساس تقريباً.



شكل 3-3 لحام المقاومة الكهربائية النقطي (a) عناصر لحام النقطة ، (b) صورة لعملية اللحام

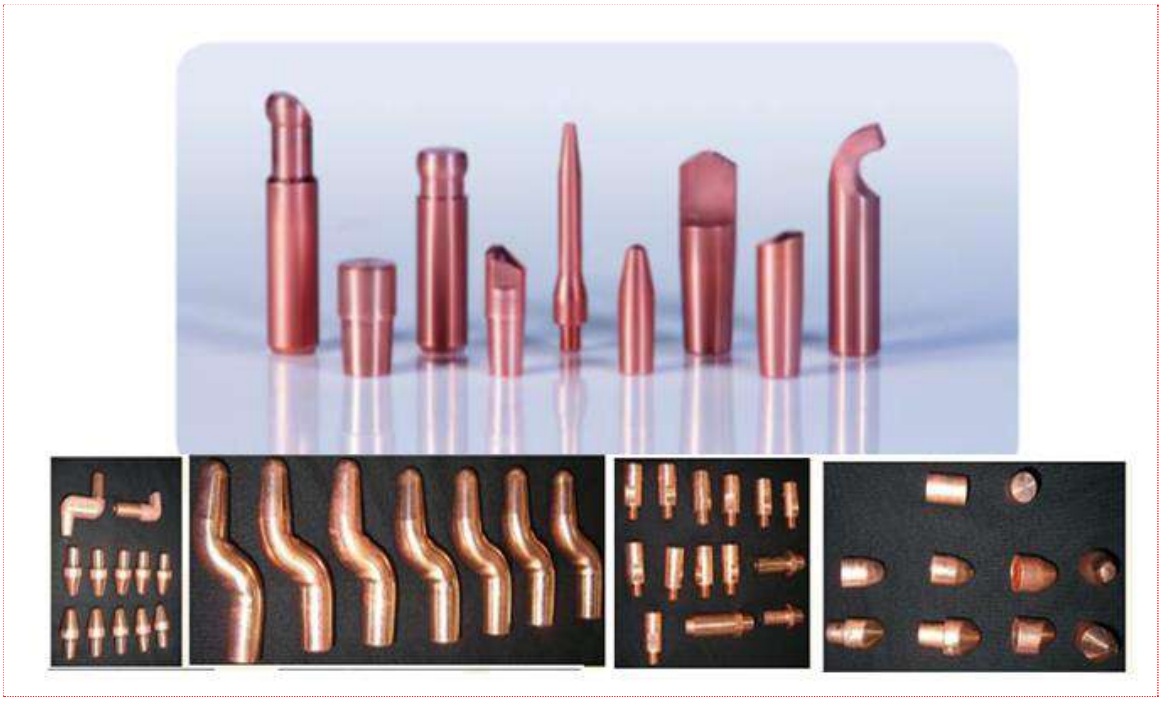


شكل 3-4 محاكاة رقمية للحام المقاومة الكهربائية النقطي

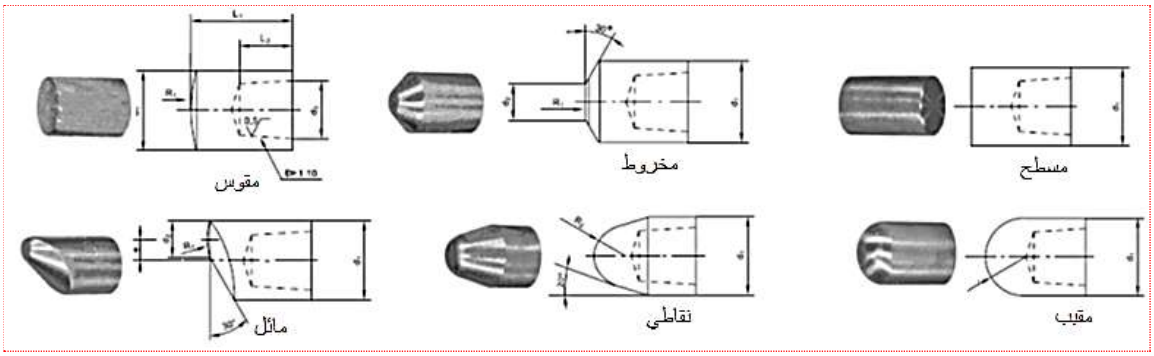
تصنع الأقطاب (Electrodes) من مجموعتين رئيستين هما سبائك النحاس وخليط معدني حراري مثل خليط معدني النحاس والتنكستن، تستعمل المجموعة الثانية لمقاومة السوفان (Wear) الفائق، إذ إن الأقطاب في المجموعة الأولى يصيبها السوفان التدريجي عند الاستعمال في معظم تطبيقات العمليات الصناعية. تصنع الأقطاب بشكل مجوف لغرض جريان ماء التبريد من خلالها لامتصاص الحرارة الناتجة من العملية. الشكل (3-5) يبين أشكال بعض الأقطاب المستعملة في لحام المقاومة النقطي، والشكل (3-6) يوضح الأنواع الرئيسة للأقطاب التقليدية.

وظائف الأقطاب هي كالآتي:

- إمرار التيار الكهربائي (تيار اللحام) إلى قطعتي العمل من خلال مقطع حافة الأقطاب المحددة، لتعيين شدة التيار في نقطة التلامس.
- تستعمل الأقطاب لتسليط قوى الضغط على قطعتي العمل تزامنياً قبل وفي أثناء وبعد سريان التيار الكهربائي لتكوين بقعة اللحام المطلوبة.
- امتصاص الحرارة الزائدة المتولدة في أثناء اللحام ونقلها إلى خارج قطعتي العمل.
- وأخيراً، وضع قطعتي العمل بالمحاذاة الصحيحة المناسبة لعملية اللحام.



شكل 3-5 أقطاب تقليدية وأخرى غير تقليدية مستعملة في لحام المقاومة النقطي

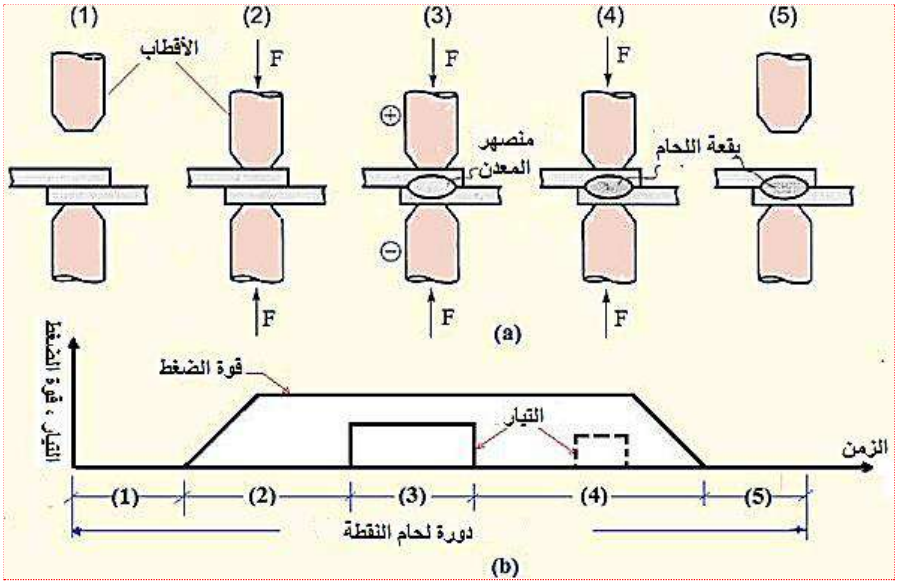


شكل 3-6 الأنواع الرئيسة لأقطاب لحام المقاومة النقطي

دورة لحام المقاومة النقطي الاعتيادية المبينة في الشكل (3-7) تتكون من الآتي:

1. إدخال قطعتي العمل ما بين الأقطاب.
2. تحريك الأقطاب باتجاه قطعتي العمل وتسليط الضغط المستمر عليهما.
3. سريان التيار الكهربائي.
4. قطع سريان التيار الكهربائي ولكن استمرار تسليط الضغط، وفي بعض الأحيان يتم زيادة القوى الضاغطة بعد قطع التيار، لتحسين جودة الملحومة وتخليصها من بعض العيوب.
5. تحرير الضغط وفتح الأقطاب وإخراج الملحومة.

هنالك دورات غير اعتيادية (معقدة) لبعض التطبيقات يتم فيها تسليط قوى ضاغطة أولية ومن ثم يتم زيادتها عند سريان التيار الكهربائي وكذلك يكون سريان التيار الكهربائي بشكل متقطع وأمور أخرى لا يتسع المجال لذكر تفاصيلها في هذه المرحلة الدراسية.



شكل 3-7 الدورة الاعتيادية في لحام المقاومة النقطي (a) خطوات الدورة، (b) مخطط لقوة الضغط والتيار الكهربائي

يجب أن تراعى المتطلبات التالية عند اختيار عملية لحام المقاومة الكهربائي النقطي:

1. إن الحجم المناسب لبقعة اللحام للحصول على لحام عالي الجودة:

$$4\sqrt{t} < D_N < 7\sqrt{t} \qquad (3\text{-}2)$$

إذ إن (D_N) قطر بقعة اللحام، (t) هو سمك قطعة العمل ويؤخذ السمك الأقل في حالة تباين السمك لقطع العمل.

2. تصميمياً يجب أن تكون نقاط اللحام متقاربة للحصول على قوة لحام عالية، ولكن أن لا تكون المسافة بين كل نقطة لحام والنقطة التي تليها ضمن المسافة التي تحدث بها ظاهرة تسرب التيار وتفرعه (Shunt Current) في حالة لحام المقاومة النقطي المستمر، علماً أن هنالك جداول توضح أقل مسافة مسموح بها بالاعتماد على سمك ومادة صفيحة العمل.

3. تترك مسافة عن حافة الصفيحة لا تقل عن ضعف قطر بقعة اللحام لأمور تتعلق بتحمل منطقة اللحام لقوة ضغط الأقطاب، وبعكسه سيؤدي إلى حدوث ظاهرة التطاير للمنصهر وجيوب هوائية وبالتالي لحام ضعيف وغير مستقر.

4. لحام المقاومة النقطي مناسب جداً للفولاذ وسبائكه بسبب المقاومة الكهربائية العالية نسبياً لهذا المعدن، التي هي أحد حدود معادلة الحرارة المتولدة (3-1)، مقارنة بمعادن جيدة التوصيل الكهربائي، إذ إن ذلك يتطلب اختيار تيار كهربائي عالٍ جداً وزمن قصير جداً عند لحام معادن جيدة التوصيل الكهربائي والحراري مثل النحاس والألمُنيوم. عند تطبيقات لحام الألمُنيوم تكون شدة التيار بحدود ثلاثة أضعاف شدة التيار عند لحام الفولاذ واطئ الكربون.

5. زيادة القوى الضاغطة على السبائك اللينة مثل الألُمنيوم حالة غير مفيدة، بل العكس ستؤدي إلى تقليص نطاق متغيرات اللحام (قابلية اللحام)، إضافة إلى حدوث انفصال (Separation) بين الصفائح، فضلاً على الإجهادات الداخلية الكبيرة نسبياً، ما يؤدي إلى إضعاف قوة اللحام.

6. هنالك تأثيرات معينة مع هذا النوع من طرائق اللحام مثل ظاهرة (Lorentz Force) التي لها علاقة بالحقل المغناطيسي الشديد بسبب استعمال تيارات كهربائية عالية، وكذلك ظاهرة (Peltier) التي لها علاقة بمكائن (DC) إذ تتولد حرارة من جهة سريان التيار الكهربائي أعلى من الجهة الأخرى، أي: إن الحرارة غير متناظرة ولهذا ستكون بقعة اللحام غير متناظرة أيضاً، إذاً، يجب أن تعالج هذه التأثيرات بما يناسبها للحصول على جودة عالية للملحومة.

3-3-1-1 أنواع مكائن لحام المقاومة النقطي Types of RSW Machines

تُعد عملية لحام المقاومة النقطي من العمليات المعقدة، وجودة اللحام تعتمد على متغيرات عديدة مثل نوعية القدرة الكهربائية المجهزة وطريقة عملها، وسبيكة معدن الأقطاب وأشكالها، ومتغيرات عملية اللحام (قوة ضغط الأقطاب، زمن سريان التيار ومقداره)، وخصائص مادة العمل المراد لحامها التي تتضمن نوع السبيكة وحالة السطح.

وتجدر الإشارة بأن هنالك ثلاثة أنواع رئيسة من مكائن لحام المقاومة النقطي بحسب نوع التيار الكهربائي المجهز لقطعة العمل، وهي كالآتي:

1. **أنظمة التيار المتناوب**، والتي يمكن تقسيمها إلى ثلاثة أقسام:
   i. مكائن الطور الواحد (1 ph)، وفيها محول لخفض فرق الجهد إلى أقل من (25 V) وتجهيز تيار كهربائي عالٍ قد يصل إلى (100 kA) بالاعتماد على سمك ونوع المعدن المراد لحامه.
   ii. مكائن ثلاثية الطور (3 ph)، فيها محول من نوع خاص يعمل بترددات واطئة.
   iii. مكائن الترددات العالية، يستعمل في هذا النوع ترددات عالية حداً قد تصل إلى (450 kHz).
2. **أنظمة التيار المستمر**، التي تحوي مقوماً للموجة لتحويل التيار المتناوب إلى تيار مستمر.
3. **أنظمة خزن الطاقة**، وهي على نوعين، الأول كهربائي والآخر مغناطيسي، وفي كليهما تسحب القدرة من مصدر ثلاثي الطور وتخزن في متسعات وتفرغ فجأة إلى شحنة لغرض إنجاز عملية اللحام.

وتتضمن مكائن لحام المقاومة النقطي عادة مجموعة من الأنظمة الأساسية التاليةً:

a) النظام الكهربائي.
b) النظام الميكانيكي.
c) نظام السيطرة.
d) نظام التبريد.

وبسبب الانتشار الواسع لتطبيقات لحام المقاومة النقطي في عمليات التصنيع المختلفة، وجدت عدد من مكائن اللحام بأنواع وتقنيات مختلفة لإنجاز متطلبات لحام المقاومة الكهربائية النقطي، الشكل (3-8) يوضح مكائن لحام المقاومة النقطي المستعملة، وهي كالآتي:

- مكائن الذراع المتأرجح (Rocker-arm)، تتكون من قطب سفلي ثابت وآخر علوي متحرك لتسليط الضغط على الصفائح والمثبت على الذراع المتأرجح التي جاءت اسم الماكنة منه.

- مكائن الضغط بنوعيها الهوائي والهيدروليكي، التي تستعمل لقطع العمل الكبيرة، القطب العلوي يكون على خط مستقيم الحركة مع الضاغطة العمودية التي تعمل على النظام الهوائي أو النظام الهيدروليكي، والتي لها قابلية ضغط عالية، والسيطرة تكون عادة مبرمجة رقمياً لدورات لحام معقدة.

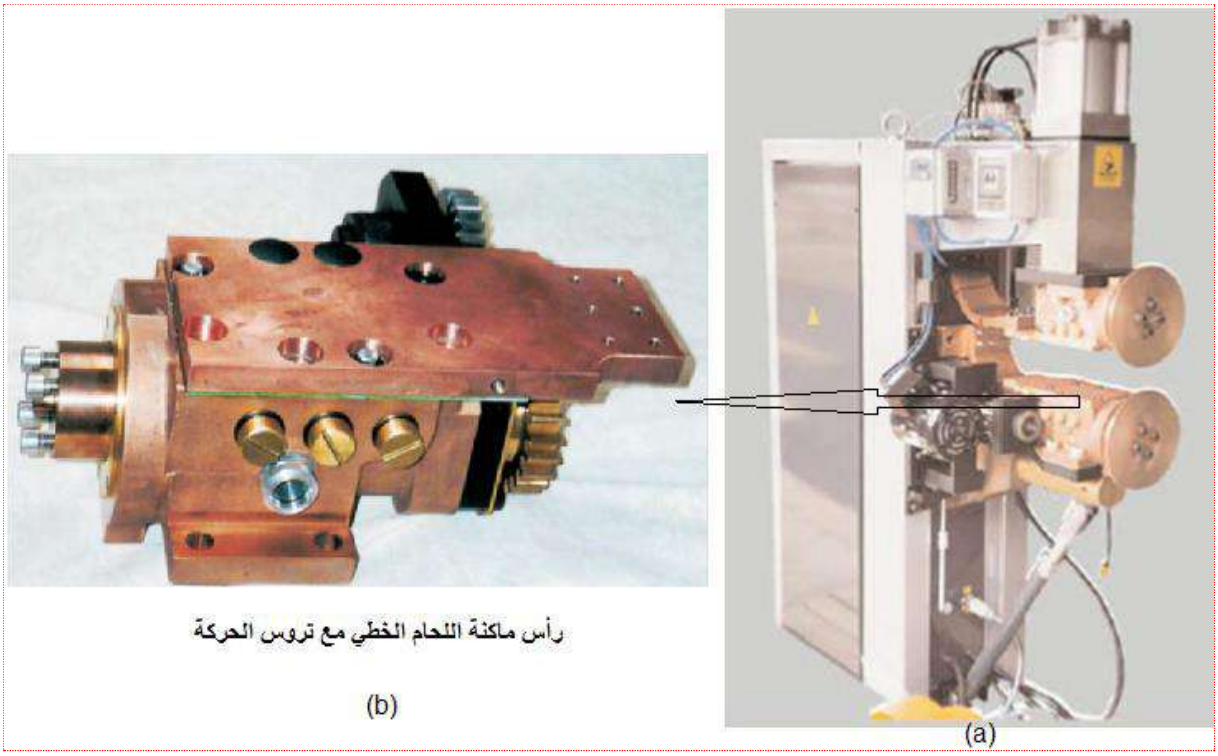
- مكائن لحام النقطة المحمولة، التي تتميز من سابقاتها بإمكانية حملها وإجراء عمليات اللحام موقعياً، تحوي هذه المكائن الصغيرة الحجم نسبياً على قطبين متقابلين بكماشة، ويمكن ربطها بأنبوب مرن لماء التبريد وأنبوب آخر للهواء إذا كانت تعمل بالضغط بالنظام الهوائي.

- لحام النقطة اليدوية، لا تختلف كثيراً عن سابقتها.

شكل 3-8 أنواع مكائن لحام المقاومة النقطي (a) مكائن الذراع المتأرجح، (b) مكائن الضغط، (c) المكائن المحمولة، (d) اليدوية

2-3-3 لحام المقاومة الكهربائية الخطي (درز) Resistance Seam Welding (RSEW)

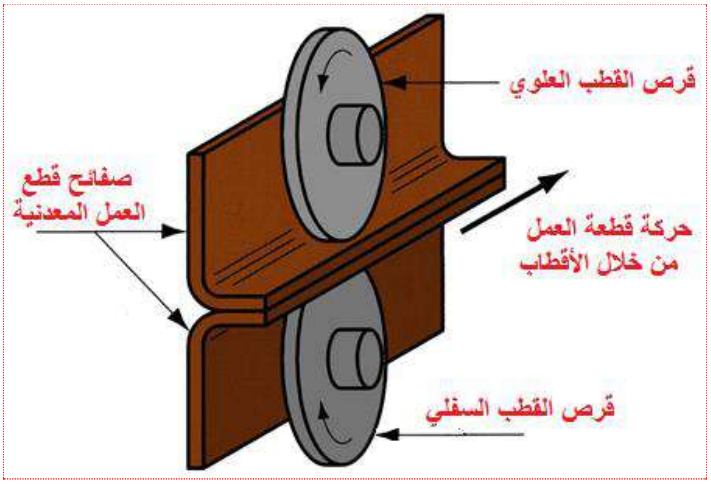
عملية لحام المقاومة الخطي (الدرز) مشابهة تقنياً إلى حد كبير للحام المقاومة النقطي، ومكائن لحام الدرز مشابهة لمكائن الضغط في لحام المقاومة الكهربائية النقطي، وتتميز بعمل سلسلة من نقاط اللحام دون رفع أو فتح الأقطاب لكون الأقطاب في هذا النوع من اللحام قد يكون أحدهما أو كليهما بشكل مستدير (أقراص) بدلاً من الأشكال الأسطوانية الاعتيادية، الشكل (3-9) يبين نموذجاً لماكنة لحام المقاومة الكهربائية الخطي (الدرز).



الشكل 3-9 (a) نموذج لماكنة لحام المقاومة الكهربائية الخطي، (b) رأس الماكنة

تصنع الأقطاب بأشكال مستديرة بهيئات وأحجام معينة تؤدي الغرض المطلوب منها للحام خطي مستمر، وتصنع عادة من سبائك النحاس عالية التوصيل الكهربائي وذات متانة جيدة تتحمل الضغوط المسلطة، كما هو مبين في الشكل (3-10).

إن التبريد في لحام المقاومة الخطي ضروري للأقطاب وقطع العمل كما هو في باقي طرائق لحام المقاومة الكهربائي، ويتم في هذه الطريقة بجريان الماء مباشرة على القسم العلوي والسفلي من قطعة العمل بالقرب من الأقطاب.



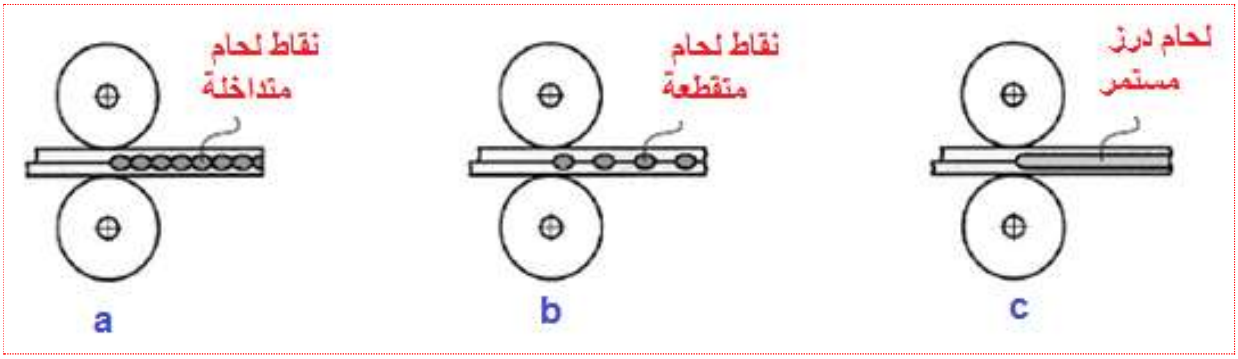
شكل 3-10 أقطاب لحام المقاومة الخطي (الدرز)

تتحرك الشغلة إلى الأمام وتعمل على دوران الأقطاب المستديرة ببطء، ونتيجة تسليط الضغط من قبل الأقطاب على قطعة العمل وسريان التيار الكهربائي بفترات زمنية متقطعة متقاربة تتكون سلسلة من نقاط اللحام وبشكل متقارب مشكلاً خطاً من اللحام للوصلة التراكبية، لذا يكون خط اللحام بحقيقة الأمر عبارة عن مجموعة متصلة من نقاط اللحام. تتم السيطرة على فترات سريان التيار الكهربائي من خلال مؤقت زمني خاص بحسب سمك قطعة العمل ونوعها. إن كمية الحرارة المتولدة عند سريان التيار الكهربائي تقل كلما زادت سرعة اللحام (سرعة دوران أقراص اللحام)، والمسافات بين بقع اللحام تتحدد بالاعتماد على حركة الأقراص (الأقطاب) نسبة إلى تجهيز التيار الكهربائي (تيار اللحام)، لذا يمكن الحصول على ثلاثة أنواع من تطبيقات اللحام بهذه الطريقة، وهي كالآتي:

1. لحام الدرز التقليدي (Conventional)، تكون نقاط اللحام متقاربة جداً (متداخلة)، وللحصول على هذا التطبيق تدور الأقراص بصورة مستمرة وثابتة السرعة، ويجهز التيار الكهربائي عن طريق التفريغ بفترات مناسبة بحسب التردد المثبت وبموجب الطلب على قرب المسافة البينية بين نقاط اللحام، ويستعمل على سبيل المثال في تصنيع حاويات السوائل، كما هو موضح في الشكل (3-11-a).

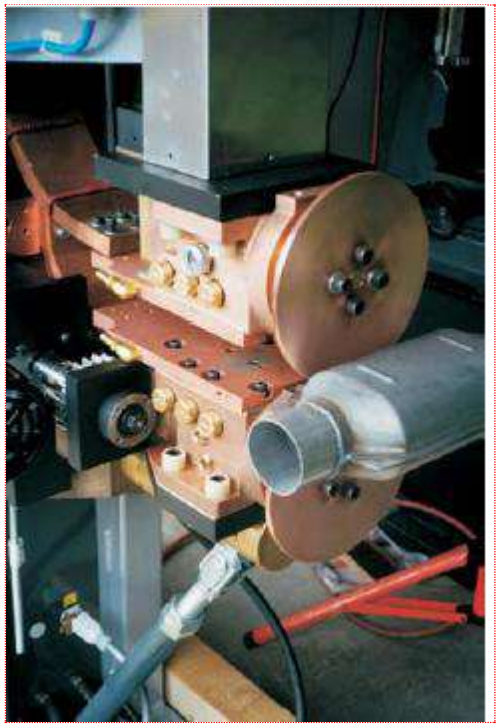
2. لحام الدرز المتقطع (Discrete)، ويسمى لحام النقاط المدلفن (Roll Spot Welding)، يتم الحصول على هذا التطبيق بخفض التردد بشكل واضح، ولذا سيكون مشابهاً للحام النقطة، ويستعمل هذا النوع لتطبيقات لحام الصفائح التي تتطلب إنتاجية عالية لو استعمل لحام النقطة، كما هو مبين في الشكل (3-11-b). هنالك تطبيق آخر مماثل لهذا التطبيق الأقطاب تدور بشكل متقطع وعند توقفها تشحن بالتيار لتكوين نقطة لحام، وتحدد فترات دوران الأقطاب وتوقفها المسافات المطلوبة بين نقاط اللحام.

3. لحام الدرز المستمر (Continuous)، وهو عبارة عن لحام خطي مستمر بدون أي انقطاع، يتم الحصول عليه بإبقاء التيار مستمراً بمستوى ثابت أي بدون نبضة (Pulse)، ويستعمل في تصنيع حاويات الغازات، كما هو موضح في الشكل (3-11-c).



شكل 3-11 تطبيقات لحام الدرز

يستعمل هذا النوع من لحام المقاومة الكهربائي في صناعة الحاويات المعدنية المختلفة، خزانات الوقود المختلفة، وأنابيب العادم لغازات احتراق المركبات، لاحظ الشكل (3-12)، تتميز ملحومات هذه الطريقة كونها محكمة الربط لتضمن عدم تسرب الموائع التي ستخزن فيها، وتكون بهيئة جيدة خالية من التشوهات والبروزات وغيرها.

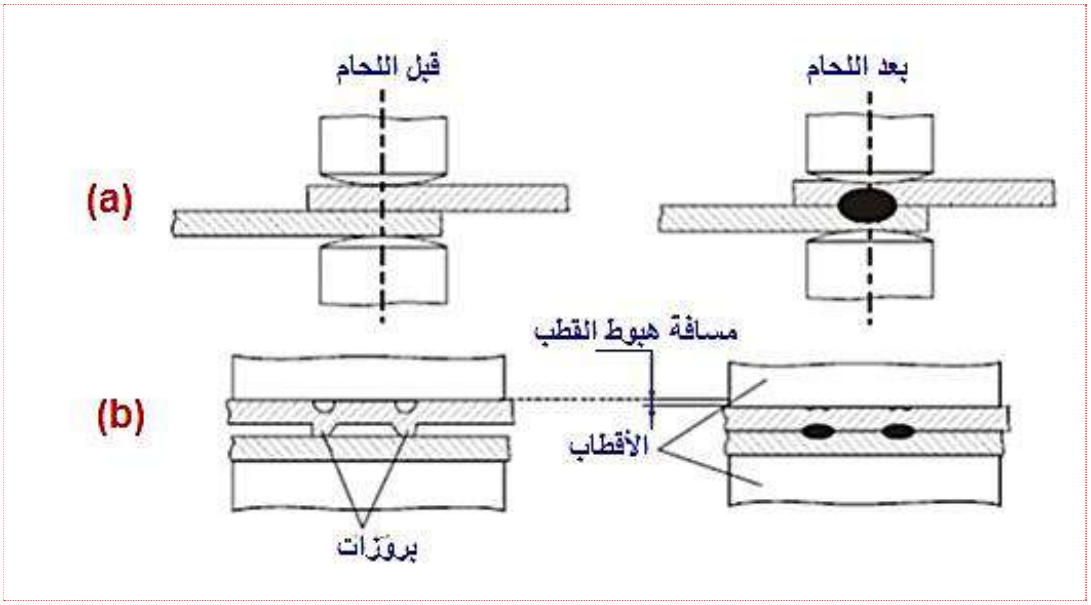


شكل 3-12 لحام خطي لخزان عادم مركبة

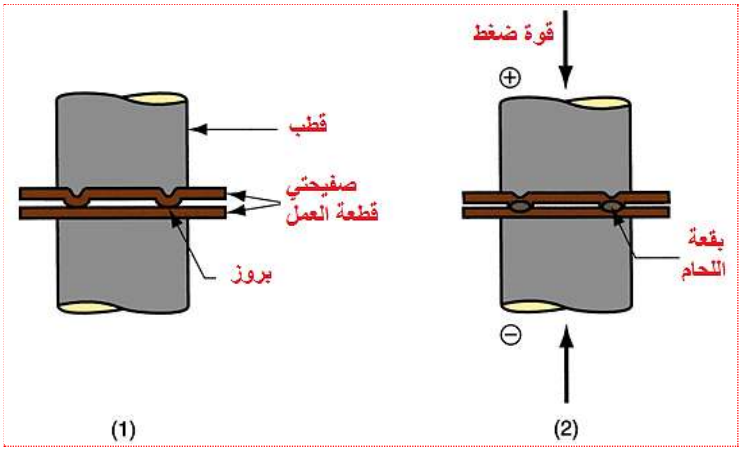
3-3-3 لحام المقاومة الكهربائية ذو البروز Resistance Projection Welding (RPW)

يشابه لحام البروز (النتوء) من حيث المبدأ لعملية لحام النقطة، كما هو مبين في الشكل (3-13) الذي يوضح مقارنة ما بين الطريقتين. ويحدث اللحام عند نقاط محددة مسبقاً في قطعة العمل وتحت ضغط مناسب بين القطبين، وتجهز الصفائح المعدنية العلوية المراد لحامها ببروزات صغيرة مصممة مسبقاً، تشكل بوساطة مكابس خاصة أو تكون بهيئة مقاطع معينة تأخذ شكلاً مشابهاً لشكل البروز، يكون قطر البروز مساوياً لسمك معدن قطعة العمل وبارتفاع مقداره 60% من سمكها، بهذه الطريقة يتم اللحام في جميع البروزات المشكلة مسبقاً في آنٍ واحد ولهذا تُعد إنتاجية هذه الطريقة عالية مقارنة بلحام النقطة، ومن أهم ما يميز لحام البروز من لحام النقطة، عدم حاجة هذه الطريقة إلى التصميم المتناهي في الدقة للأقطاب من حيث شكل حافة القطب وأبعاده لتركيز التيارات الكهربائية العالية في منطقة صغيرة محددة، لتكوين بقعة اللحام مما يسبب التآكل والتلف السريع للأقطاب، إما في حالة لحام البروز فإن كل من التيار والحرارة المتولدة في أثناء اللحام قد حُددت مسبقاً بالبروزات، ومن هنا يتضح جلياً عدم الحاجة إلى التصميم والاختيار الدقيق لشكل وحافة الأقطاب وإنما يتم الاكتفاء بالأشكال المستوية. الشكل (3-14) يبين مخططاً نموذجياً لهذه الطريقة من طرائق لحام المقاومة الكهربائية.

بالرغم من أن لهذه الطريقة كلفة إضافية لغرض عمل البروزات، لكنها تبقى أكثر اقتصادية من طرائق اللحام الأخرى بسبب عدم الحاجة إلى مواد مضافة كما هو في طرائق اللحام الأخرى من غير لحام المقاومة، وينتج عن هذه العملية وصلات لحام منتظمة الشكل وفي بعض الأحيان أفضل قوة من لحام النقطة.

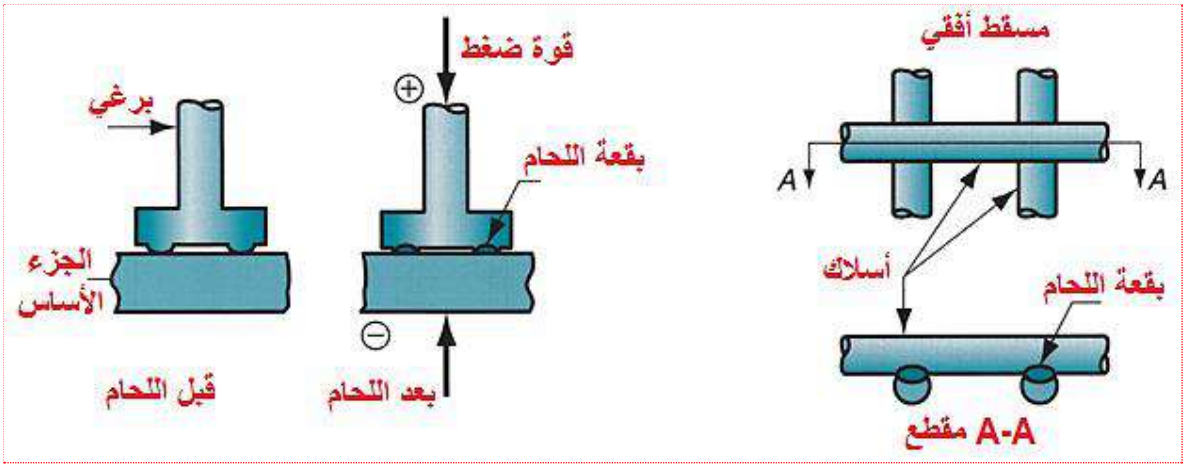


شكل 3-13 مقارنة بين لحام النقطة (a) ولحام البروز (b)، قبل اللحام وبعده



شكل 3-14 مخطط للحام المقاومة الكهربائية ذي البروز

هنالك تطبيقات عديدة للحام المقاومة ذي البروز أهمها، تثبيت البراغي أو ما شابه من قطع الربط الميكانيكي تثبيتاً دائمياً على صفائح معينة، والتطبيق الثاني المهم هو لحام الأسلاك المعدنية لتصنيع عربات التسوق ومشبكات المواقد والقضبان (BRC)، وفي هذا التطبيق تكون وظيفة الأسلاك وكأنها البروزات المشكلة مسبقاً للحام بهذه الطريقة، الشكل (3-15) يوضح التطبيقين المذكورين أعلاه.



شكل 3-15 تطبيقات لحام المقاومة ذي البروز، اليسار: تثبيت برغي على صفيحة، اليمين: لحام أسلاك

من أهم مميزات لحام البروز النقاط الآتية:

i. توزيع منتظم وسهل الحصول على الحرارة للمنطقة المراد لحامها.
ii. إنتاجية عالية جداً بسبب لحام أكثر من نقطة في آنٍ واحد.
iii. عمر تشغيلي أطول للأقطاب.
iv. إمكانية تقريب نقاط اللحام.
v. قطع العمل تلحم بسهولة، ولحام قطع بأشكال معينة لا يمكن لحامها إلا بهذه الطريقة.
vi. الشكل النهائي للسطوح يكون أفضل.

أسئلة الفصل الثالث

س1) أملأ الفراغات الآتية:

1. البروفسور ..... من معهد فرانكلين وضع الخطوط العريضة للحام المقاومة الكهربائية.
2. التيار الكهربائي المستعمل في لحام المقاومة الكهربائية مقداره ما بين A .....
3. زمن سريان التيار الكهربائي قصير جداً يتراوح ما بين .....
4. أعلى قيمة للمقاومة في لحام المقاومة الكهربائية هي .....
5. يستخدم .....لتبريد قطعة العمل والأقطاب في لحام المقاومة الكهربائية.
6. يتوافق لحام المقاومة الكهربائية أكثر مع المعادن ذات المقاومة .....
7. المتغيرات التي لها ارتباط وثيق ويمكن التحكم بها في لحام المقاومة الكهربائية هي .....و ..... و.....
8. أهم طرائق لحام المقاومة الكهربائية إنتاجياً هي .....
9. يتراوح عدد نقاط اللحام في مركبة صغيرة .....
10. إن الحجم المناسب لبقعة اللحام يتراوح ما بين .....و .....
11. لحام المقاومة النقطي مناسب جداً لمعدن .....وسبائكه بسبب .....

س2) ما هو لحام المقاومة الكهربائية؟ وبأي مجموعة يُصنف؟ ومتى بدأ العمل بهذا النوع من اللحام؟

س3) ماهي المميزات المهمة للحام المقاومة الكهربائية؟ وما هي محدداته؟

س4) اذكر بالتسلسل المقاومات الكهربائية في لحام المقاومة الكهربائية؟

س6) اذكر بالتسلسل دورة لحام المقاومة النقطي.

س7) ما هي ظاهرة تسرب التيار وتفرعه؟

س8) ما هي الأنواع الرئيسة للحام المقاومة النقطي؟

س9) قارن بين أقطاب عملية لحام المقاومة النقطي واللحام ذي البروز؟

س10) ما هي تطبيقات اللحام الدرزي؟

س11) وحدة الطاقة النوعية لصهر صفيحة معدنية معينة ($9.5\ J/mm^3$)، سمك كل من الصفيحتين المراد لحامهما باستعمال لحامة المقاومة النقطي (3.5 mm)، قطر بقعة اللحام (5.5 mm) وسمك (5.0 mm)، وزمن سريان التيار (0.3 s)، والمقاومة الكهربائية تساوي (140 μΩ)، والطاقة الحرارية التي استخدمت للصهر هي فقط ثلث الطاقة المتولدة، احسب أقل مقدار لشدة التيار المار. ج: 8978 A

الفصل

الرابع

لحام الوقود الغازي

Oxyfuel Gas Welding

الأهداف

الهدف العام

في هذا الفصل سيتمكن الطالب من معرفة لحام الوقود الغازي وطرائقه وأهمية كل طريقة في عمليات اللحام المختلفة، ويمكنه أن يميز بين أنواع الوقود الغازي المستعمل في اللحام ليتمكن من بعدها من تحديد الغاز المناسب لكل حالة من حالات اللحام ولكل نوع من أنواع المعادن وسبائكها، فضلاً على نسب خلط الغازات مع الأوكسجين وكمية الحرارة المتولدة من الاحتراق.

الأهداف الخاصة

بعد الانتهاء من دراسة مفردات الفصل الرابع سوف يتمكن الطالب من فهم الآتي:

1. يعرف كيفية الاستفادة من الطاقة الكيميائية لإنجاز عملية اللحام.
2. يعرف طرائق مجموعة اللحام باستخدام الطاقة الكيميائية.
3. يعرف لحام الوقود الغازي وأهم الغازات المستخدمة فيه وآلية توليد الحرارة.
4. يتمكن من حساب الحرارة المتولدة من الاحتراق.
5. يعرف أنواع شعلة الأوكسي- أستيلين.
6. يعرف المميزات والاستخدامات الرئيسة للحام الأوكسي-أستيلين وأهم المعدات المستخدمة فيه.
7. يعرف أهم الغازات البديلة عن الأستيلين في اللحام الغازي.
8. يعرف أهم تحوطات الأمان في اللحام باستخدام غاز الأستيلين.
9. يعرف الاستخدامات الأخرى للمشعل الغازي، ومنها قطع المعادن.

لحام الوقود الغازي Oxyfuel Gas Welding

1-4 مقدمة Introduction

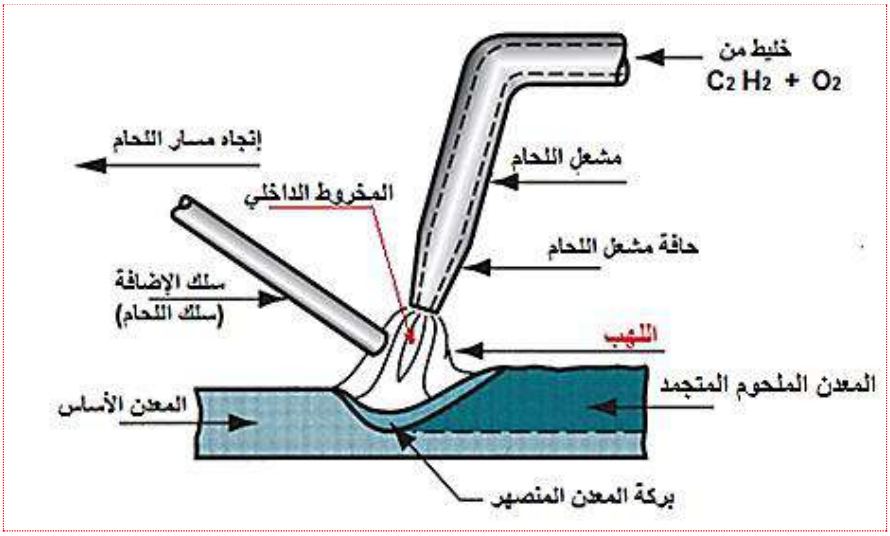
سبق وأن ذكر في الفصول السابقة بأن لحام الحالة المنصهرة (Fusion Welding) ينجز عن طريق صهر حافات قطع العمل وتكوين الرابط المعدني القوي فور الانتهاء من عملية اللحام وتجمد بركة اللحام المنصهرة، ولذا يجب توليد حرارة كافية وتسليطها بشكل مناسب لرفع درجات حرارة منطقة اللحام ومعدن الإضافة (في حالة استخدامه) إلى أعلى بقليل من درجات حرارة انصهار معادن تلك المنطقة. والحرارة المطلوبة لعملية اللحام عبارة عن طاقة، ومن المفاهيم المعروفة عن الطاقة أنها يمكن أن تأخذ أشكالاً متنوعة مثل الطاقة الحرارية، الكهربائية، الكيميائية، الحركية، الإشعاعية، النووية، وغيرها من أشكال أو صور الطاقة، وأن جميع أنواع الطاقة يمكن تحويلها من شكلٍ إلى آخر بمساعدة أدوات بسيطة أو في بعض الأحيان تحتاج إلى تقنيات معقدة. وفي الفصلين الثاني والثالث تم تناول طرائق اللحام من خلال الاستفادة من تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية لازمة لعملية اللحام، في حين سيتم في هذا الفصل تناول طرائق اللحام الخاصة من خلال الاستفادة من إحدى تحويلات الطاقة الأخرى المفيدة لعملية اللحام وهي تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة حرارية. إن طرائق هذه المجموعة يمكن أن تقسم إلى قسمين رئيسين هما لحام الوقود الغازي ولحام الثرميت، في كلا القسمين سيتم الاستفادة من الطاقة الكيميائية من خلال تفاعل كيميائي معين تتولد فيه حرارة عالية وكافية يتم تسليطها وتوجيهها بشكل مناسب لإتمام عملية اللحام عن طريق صهر حافات قطع العمل المطلوب لحامها. **ولحام الثرميت** عبارة عن تفاعل كيميائي للثرمايت المتكون من مسحوق الألمُنيوم وأوكسيد الحديد، وتتم العملية عند قدح مسحوق الألمونيوم وتفاعله مع أوكسيد الحديد مولداً حرارة عالية تصهر منطقة اللحام، تستخدم هذه الطريقة من اللحام عادةً في تصليح قضبان سكك الحديد وسيتم تناول هذا الموضوع بالتفصيل في المرحلة الدراسية اللاحقة.

يُعرف **لحام الوقود الغازي** بأنه أحد أنواع لحام الحالة السائلة، إذ تتم عملية اللحام عن طريق احتراق وقود غازي معين نتيجة تفاعل الغاز مع الأوكسجين وتكوين شعلة هي مصدر الحرارة اللازمة لصهر منطقة اللحام باستخدام مادة مضافة أو بدونها وفي بعض الأحيان يتم تسليط ضغط على منطقة اللحام. ولحام الوقود الغازي الذي يرمز له بـ (OFW) بدأ استخدامه منذ سنة 1900، وهو تعبير عام يطلق لأية عملية لحام تنجز من احتراق غاز معين، فضلاً على شيوع استخدام الوقود الغازي بعمليات قطع المعادن، والغازات المستعملة هي (الأستيلين، الهيدروجين، غاز MAPP، الغاز الطبيعي، البروبان، وغيرها). أهم غاز في هذه المجموعة هو غاز الأستيلين وأكثرهم استخداماً في عمليات اللحام، ومع هذا سيتم تناول خصائص بعض هذه الغازات من ناحية عملية اللحام في هذا الفصل.

2-4 لحام الأوكسي-أستيلين Oxyacetylene Welding

إن لحام الأوكسي-أستيلين هو أحد طرائق لحام الحالة المنصهرة، إذ تنجز عملية اللحام من احتراق غاز الأستيلين مع الأوكسجين وتكوين شُعلة بدرجات حرارة عالية توجه إلى وصلة اللحام عن طريق مشعل اللحام (Torch)، الشكل (4-1) يبين عملية اللحام بمشعل الأوكسي-أستيلين، والشـــكل (4-2) يوضح مخطط عملية اللحام التقليدية مع مصطلحاتها. يستخدم في بعض تطبيقات اللحام الأوكسي-أستيلين معدن الإضافة وعادةً يكون بشكل سلك أو قضيب قطره بحدود (1.5-9.5 mm)، وتركيبه الكيميائي يشابه معدن الأساس ويغلف بمادة مساعد الصهر غالباً لتنظيف سطوح منطقة اللحام ويمنع من حدوث الأكسدة وبالتالي تتحسن جودة اللحام، وأحياناً يسلط الضغط على وصلة اللحام في أثناء عملية اللحام في بعض تطبيقات لحام الأوكسي-أستيلين.

شكل 4-1 عملية لحام أوكسي-أستيلين، اليسار: مشعل، اليمين: شعلة اللحام



شكل 4-2 مخطط عملية لحام الأوكسي-أستيلين

1-2-4 آلية توليد الحرارة Heat Generated Mechanism

يُعد غاز الأستيلين (C_2H_2) أهم وقود غازي في مجموعة اللحام بالوقود الغازي، ويختلف عن باقي غازات المجموعة بتوليده حرارة عالية، إذ تصل درجات حرارة الشُعلة إلى (3480°C) ودرجات الحرارة المرتفعة هذه كافية لصهر جميع المعادن تقريباً، وإن عملية اللحام الانصهاري لابد أن تتطلب صهر حافات قطع العمل في وصلة اللحام لغرض إنجاز اللحام بشكل سليم. وتتولد شُعلة الاحتراق لنسبة خلط (1:1) من غازي الأستيلين والأوكسجين من التفاعل الكيميائي بين الأستيلين والأوكسجين زائداً الهواء بمرحلتين، وتُعرف هذه المرحلة الأولى من التفاعل الكيميائي الآتي:

$$C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2 + Heat \qquad (4\text{-}1)$$

يلاحظ من المعادلة أعلاه أن ناتج التفاعل الكيميائي الأولي هو حرارة وغازات قابلة للاشتعال (الهيدروجين وأول أوكسيد الكاربون)، ما يؤدي إلى تفاعلهم مع الأوكسجين الموجود في الهواء الخارجي بموجب المعادلة الآتية:

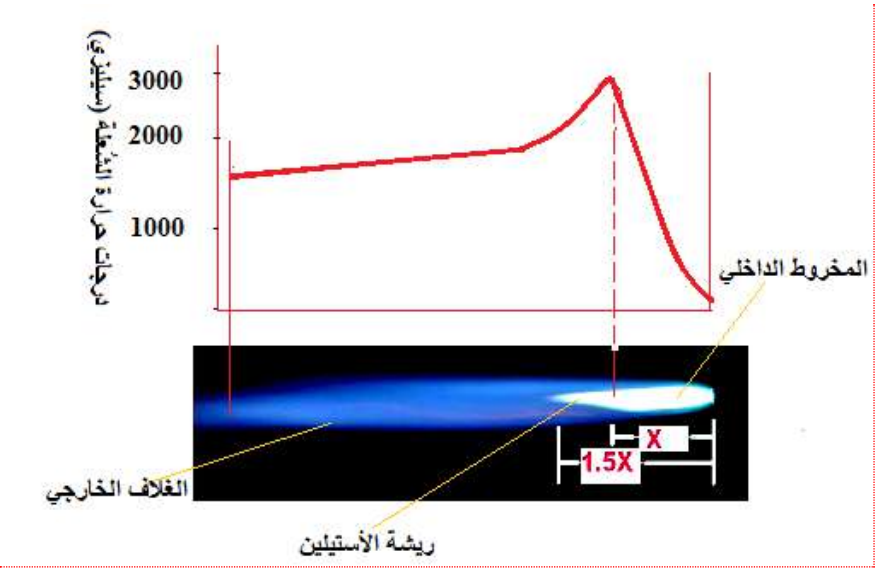
$$2CO + H_2 + 1.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O + Heat \qquad (4\text{-}2)$$

ناتج المرحلة الثانية من التفاعل هو ثاني أوكسيد الكاربون والماء، فضلاً على الحرارة. إن مرحلتي الاحتراق ترى بالعين المجردة في شُعلة الأوكسي-أستيلين التي تنبعث من مشعل اللحام. وتكون المرحلة الأولى من التفاعل بشكل المخروط الداخلي الذي يكون لونه أبيض لماعاً، بينما المرحلة الثانية من التفاعل تظهر بالغلاف الخارجي وتكون عديمة اللون أو بأثر باهت بين الأزرق والبرتقالي، ينتشر الغلاف الخارجي من الشُعلة الناتج من التفاعل الثانوي على سطح قطعة العمل المراد لحامها في وصلة اللحام ويؤدي دور الحجاب الغازي ويمنع اتصال منطقة اللحام بالجو المحيط بها وبالتالي يقلل من حدوث الأكسدة.

تذكر

من خلال المعادلتين أعلاه يلاحظ أن كمية الأوكسجين اللازمة لاحتراق جزيئة واحدة من الأستيلين هي جزيئتان ونصف، واحدة منها تستهلك من قنينة الأوكسجين والباقي يستهلك من الهواء الجوي، ولذا لا ينصح مطلقاً إجراء عمليات لحام بالأوكسي-أستيلين في مواقع مغلقة مثل الورش غير النظامية التي تنعدم فيها التهوية الضرورية، فضلاً على اللحام داخل الأنابيب أو الحاويات.

أن درجات الحرارة في شُعلة الأوكسي-أستيلين ليست ثابتة على طول الشُعلة بل متغيرة، وكذلك طبيعة احتراق الأستيلين متغيرة أيضاً في المواقع المختلفة للشُعلة. والشكل (4-3) يوضح العلاقة بين مواقع الشُعلة ودرجات حرارتها وشكل احتراق الغاز، إذ يتبين أن أعلى درجة حرارة تكون قرب حافة المخروط الداخلي وتدريجياً تنخفض باتجاه الغلاف الخارجي.



شكل 4-3 درجات حرارة شُعلة الأوكسي-أستيلين

4-1-2-1 كمية الحرارة المتولدة Heat generated Quantity

إن كمية الحرارة الكلية المتولدة خلال مرحلتي التفاعل الكيميائي (الاحتراق الأولي والثانوي) لغاز الأستيلين تساوي ($55\ MJ/m^3$) أي خمسة وخمسون مليون جول لكل متر مكعب واحد وتُعد كمية حرارة عالية جداً، ولكن درجات الحرارة تكون متوزعة على طول الشُعلة، والشُعلة نفسها تنتشر على قطعة العمل أي لا تكون مركزة بنقطة معينة، ويكون فقدان الحرارة إلى خارج منطقة اللحام عالياً جداً، لذلك فإن معامل الكفاءة (f) (يشير إلى فقدان الحرارة إلى خارج منطقة اللحام) في عمليات لحام الأوكسي-أستيلين لا يتجاوز (0.3).

معدل توليد الحرارة الناتجة من الاحتراق (Q) وحدة قياسها واط (W) يساوي حاصل ضرب كمية الحرارة المتولدة من احتراق الأستيلين في معدل التدفق الحجمي للغاز ($\dot{V}$) (m^3/s):

$$Q = 55 \times 10^6 \times \dot{V} \qquad (4\text{-}3)$$

معدل الحرارة الفعلية (H_R) الداخلة لمنطقة اللحام وحدة قياسها واط (W) وتساوي:

$$H_R = f \times Q \qquad (4\text{-}4)$$

مثال 1: مشعل لحام غازي يجهز الأستيلين بمعدل حجمي مقداره ($0.36\ m^3/h$) وبمثله أوكسجين في عملية لحام نافذ لقطعة عمل من نوع معين من الفولاذ مقدار سمكها (h) يساوي (2 mm)، جد مقدار الحرارة الناتجة من احتراق الأستيلين.

الجواب: معدل توليد الحرارة الناتجة من الاحتراق يساوي حاصل ضرب كمية الحرارة المتولدة من احتراق الأستيلين في معدل التدفق الحجمي للغاز بعد تحويل وحداته من متر مكعب بالساعة إلى متر مكعب بالثانية وذلك بتقسيمه على 3600 لغرض مجانسة الوحدات.

$$Q = 55 \times 10^6 \times \dot{V}$$

$$= 55 \times 10^6 \left(J/m^3\right) \times \frac{0.36}{3600}\left(m^3/s\right) = 5500\ W$$

مثال 2: من المثال السابق، جد معدل انتقال الحرارة الفعلي لقطعة العمل، إذا علمت أن معامل انتقال حرارة الاحتراق إلى قطعة العمل (مقدار الكفاءة لعملية لحام بالأوكسي-أستيلين) يساوي (**0.2**).

الجواب: $$H_R = f \times Q = 0.2 \times 5500 = 1100\ W$$

مثال 3: من المثال السابق، جد معدل انتقال الحرارة الفعلي لمنطقة اللحام فقط (H_{RW})، والتي تساوي f_w = (70%) من معدل انتقال الحرارة الفعلي المسلطة على عموم قطعة العمل.

الجواب: $$H_{RW} = f_w \times H_R = 0.7 \times 1100 = 770\ W$$

مثال 4: من المثال الأول والثالث، جد مقدار قطر المعدن المنصهر (بقعة اللحام) خلال ثانية واحدة إذا علمت أن مقدار معدل الحرارة النوعية اللازمة لصهر المعدن (U_m) تساوي ($10\ J/mm^3$).

الجواب: لكون عملية اللحام من النوع النافذ، لذا يكون شكل اللحام المتكون خلال ثانية واحدة عبارة عن أسطوانة ارتفاعها بمقدار سمك قطعة العمل ومساحة دائرتها هي المساحة السطحية لبقعة اللحام.

$$\dot{V} = \frac{H_R}{U_m} = \frac{770}{10}\ \left(\frac{\frac{J}{s}}{\frac{J}{mm^3}}\right) = 77\ mm^3/s$$

$$A = \frac{\dot{V}}{h} = \frac{77}{2}\ mm^2/s = \frac{\pi}{4} D^2 \rightarrow D = \sqrt{\frac{4\times 77}{2\times \pi}} \approx 7\ mm/s$$

2-2-4 أنواع الشُعلة Flame Types

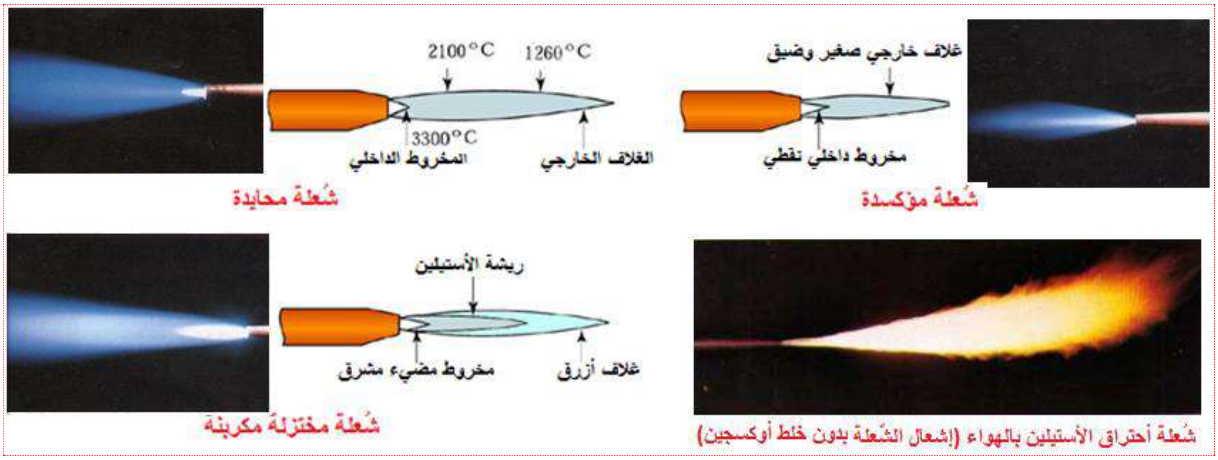
هنالك ثلاثة أنواع رئيسة من شُعلة الأوكسي-أستيلين:

- **الشُعلة المحايدة أو تسمى المتعادلة** وهي الشُعلة المفضلة للحام وتتولد عندما تكون نسبة خلط الأستيلين والأوكسجين بنسبة حجمية (1:1) وتكون الأعلى بدرجات الحرارة، ويكون فيها احتراق تام للأستيلين بمساعدة أوكسجين الهواء الخارجي، الشُعلة المحايدة تكون واضحة المعالم بمخروط داخلي مضيئ ذي لون أزرق فاتح، يحيط به غلاف خارجي بلون أزرق غامق. هذه الشُعلة ملائمة جداً للحام أنواع الفولاذ وحديد الزهر والنحاس والألمُنيوم، لعدم تأثير الشُعلة على التركيب الكيميائي لبركة منصهر معدن اللحام أي بعبارة أخرى لا تكون الشُعلة مؤكسدة ولا تكون مختزلة أو مكربنة.

- **الشُعلة المؤكسدة** التي تكون نسبة الخلط للأوكسجين أكبر من الأستيلين بحدود مرة ونصف تقريباً، حجم المخروط الداخلي يكون صغيراً وأكثر زرقة من الشُعلة المحايدة والغلاف الخارجي يكون أيضاً قصيراً وغير مدبب. إن الأوكسجين الإضافي في هذه الشُعلة سيعمل على أكسدة معدن اللحام، ولذا لا يوصي بلحام المعادن وخصوصاً الفولاذ بهذه الشُعلة لأضرارها الكبيرة على المقاومة الميكانيكية للملحومات ويقتصر استخدامها على النحاس وسبائكه، لتكوين طبقة رقيقة من الخبث تحمي منصهر المعدن.

- **الشُعلة المختزلة** وهي الشُعلة التي لا يتم فيها احتراق تام للأستيلين بسبب نقصان الأوكسجين أي نسبة الأستيلين أعلى من نسبة الأوكسجين، ولهذا تكون درجات حرارتها منخفضة. شكل الشُعلة على هيئة ريشة طير ويكون الغلاف طويلاً وبراقاً. عندما لا يحترق الأستيلين احتراقاً تاماً، تتوفر كميات من الكاربون في منطقة اللحام، قد تدخل إلى داخل منصهر المعدن فتزيد من صلادته وهذا ما يحدث غالباً مع الفولاذ، وبسبب ذلك لا ينصح استخدام هذه الشُعلة مع المعادن والسبائك التي لها قابلية على استيعاب الكاربون في بنيتها الداخلية، بل تستخدم فقط مع المعادن اللاحديدية التي لا تتفاعل مع الكاربون. أما الشُعلة المكربنة، التي تستخدم في لحام المعادن واطئة الانصهار مثل الرصاص أو تستخدم في عملية التصليد السطحي للفولاذ أي زيادة صلادة المعدن عن طريق استيعاب كميات عالية من الكاربون في البنية الداخلية للفولاذ فهي حالة ثانية من الشُعلة المختزلة في حالة استخدام نسبة أكبر من غاز الأستيلين.

الشكل (4-4) يوضح شكل وصور أنواع شُعلة الأوكسي-أستيلين، الشُعلة المحايدة تكون المفضلة لارتفاع درجات حرارتها، فضلاً على الاستفادة القصوى من الأوكسجين والأستيلين على حدٍ سواء.



شكل 4-4 أنواع شُعلة الأوكسي-أستيلين

4-2-3 المميزات والاستخدامات الرئيسة للحام الأوكسي-أستيلين

Oxy-Acetylene Welding Advantages and Major Uses

تتضمن مميزات واستخدامات لحام الأوكسي-أستيلين الآتي:

- مُعدات اللحام سهلة جداً بالنقل والتنصيب، وهي رخيصة وعمرها التشغيلي طويل.
- إمكانية اللحام بجميع الأوضاع، وبركة اللحام يمكن أن ترى من قبل عامل اللحام.
- بنفس المُعدات يمكن إجراء لحام المونة والقصدرة، فضلاً على اللحام الانصهاري.
- أمكانية استخدام مُعدات اللحام الأوكسي-أستيلين المناسبة لقطع المعادن، وكذلك يمكن استخدامها كمصدر حراري مناسب في عمليات الثني والتشكيل والتعديل وتصليد المعادن وبالأخص الفولاذ، وغيرها من المهام.

الاستخدامات المذكورة لمُعدات اللحام الأوكسي-أستيلين تنجز غالباً يدوياً ومع هذا هنالك إمكانية جعلها تعمل بشكل نصف آلي ولكنها محدودة التطبيق، ويستخدم للصناعات الخفيفة ولأعمال الصيانة. أهم مشكلة للحام بالأوكسي-أستيلين هي سرعة لحام بطيئة (الأقل سرعة من باقي طرائق اللحام)،

ولحام الأوكسي-أستيلين ملائم للحام جميع المعادن تقريباً، وعند لحام معدن معين يجب أن يتم اختيار سلك اللحام (معدن الإضافة) المناسب لذلك المعدن الذي يجب أن يكون متوافقاً مع المعدن الأساس ومشابهاً لتركيبه الكيميائي ويحوي عادةً مواد تساعد على عدم حصول الأكسدة لمنصهر المعدن في أثناء اللحام للحصول على ملحومات خالية من العيوب، كذلك يجب استخدام مساعدات الصهر للحام معادن معينة. الجدول (4-1) يوضح نوع المعدن المضاف ومساعد الصهر ونوع الشُعلة لأهم المعادن التي يمكن لحامها بالأوكسي-أستيلين.

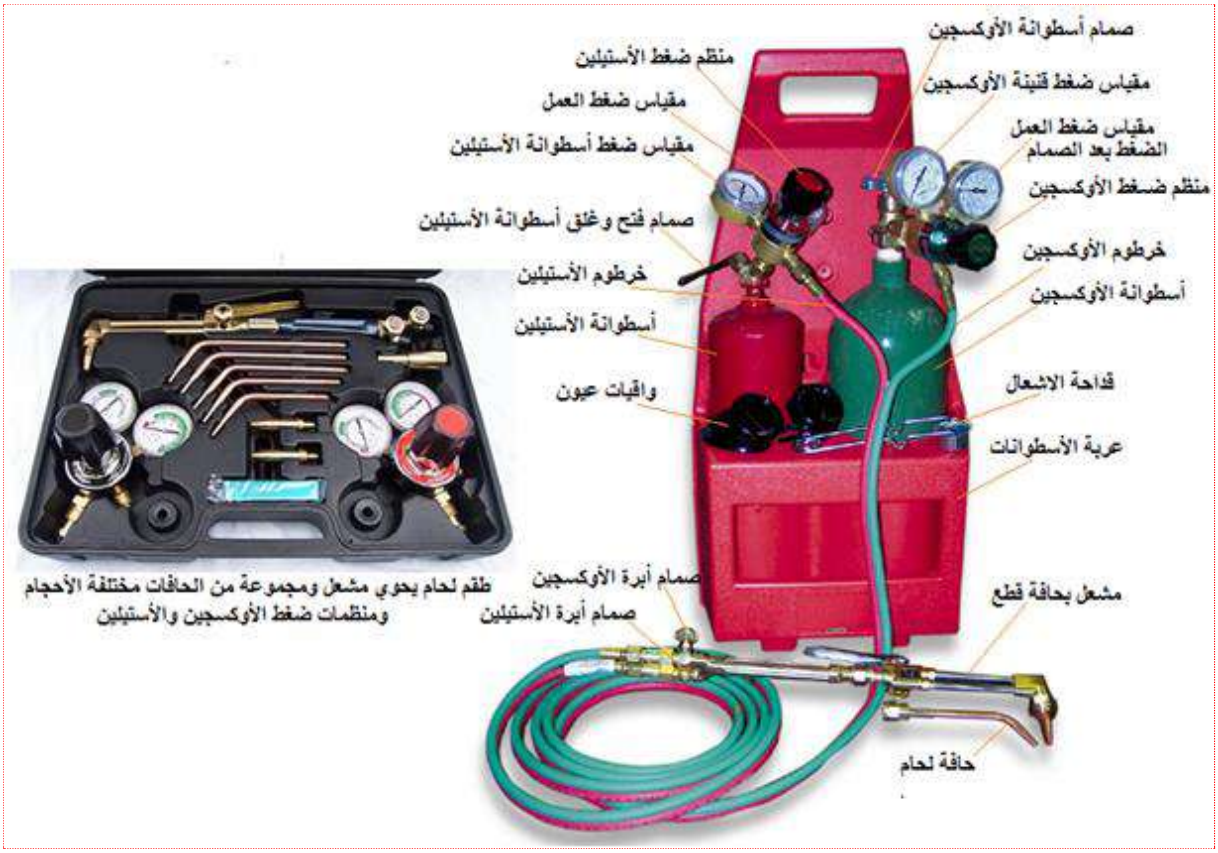
جدول 4-1 المعادن التي لها قابلية اللحام بالأوكسي-أستيلين

المعدن الأساس	معدن الإضافة (الحشو)	نوع الشُعلة	نوع مساعد الصهر
الألمُنيوم وسبائكه	مشابه لمعدن الأساس	مختزلة قليلاً	خليط من (ليثيوم وبوتاسيوم والصوديوم)
سبائك البراص	براص أصفر	مؤكسدة قليلاً	بوراكس
سبائك البرونز	سبيكة نحاس-قصدير	مؤكسدة قليلاً	بوراكس
نحاس	نحاس	محايدة	بدون
سبائك نحاس- نيكل	مشابه لمعدن الأساس	مختزلة	بدون
سبائك الإنكونيل	مشابه لمعدن الأساس	مختزلة قليلاً	فلوريدات
سبائك المونيل	مشابه لمعدن الأساس	مختزلة قليلاً	مساعد صهر مونيل
حديد مسبوك	حديد زهر	محايدة	بوراكس
حديد مطروق	فولاذ	محايدة	بدون
رصاص	رصاص	مختزلة قليلاً	بدون
نيكل	نيكل	مختزلة قليلاً	بدون
سبائك نيكل- فضة	سبيكة نيكل	مختزلة	بدون
فولاذ (قليل تسبيك)	فولاذ	مختزلة قليلاً	بدون
فولاذ عالي الكاربون	فولاذ	مختزلة	بدون
فولاذ واطئ الكاربون	فولاذ	محايدة	بدون
فولاذ مقاوم للتآكل	مشابه لمعدن الأساس	مختزلة قليلاً	مساعد صهر SS

4-2-4 مُعدات اللحام Welding Apparatus

إن مُعدات وأدوات لحام الأوكسي-أستيلين مبينة في الشكل (4-5)، وتتضمن الآتي:

1. **مشعل اللحام والمنفث (حافة المشعل).**
2. **خراطيم الأوكسجين والأستيلين.**
3. **منظمات ضغط الأوكسجين والأستيلين.**
4. **أسطوانات الأوكسجين والأستيلين.**
5. **قداحة الإشعال.**

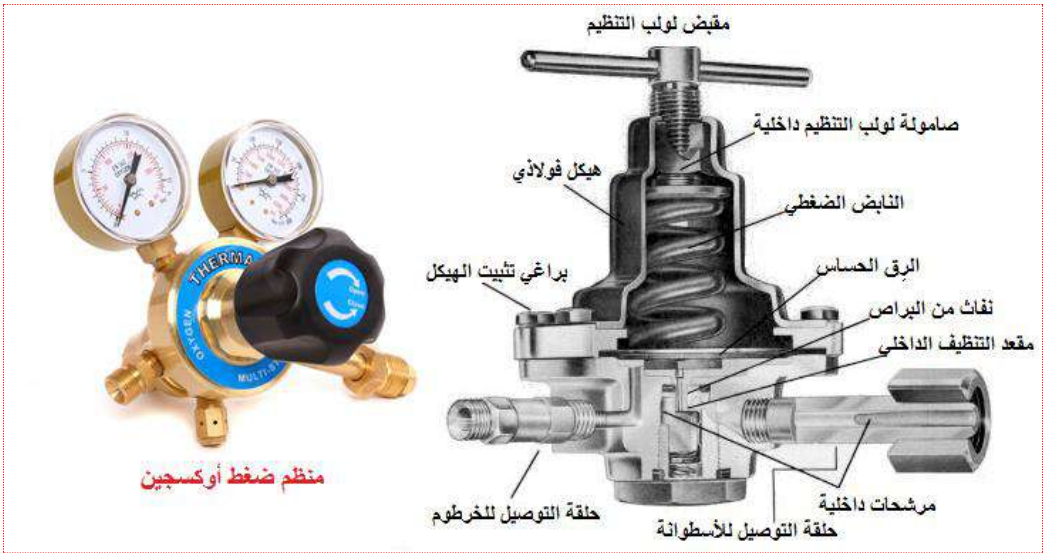


شكل 4-5 مجموعة مُعدات لحام الأوكسي-أستيلين

يُعد **مشعل اللحام** أهم جزء في مجموعة اللحام، إذ يعمل على خلط الوقود الغازي مع الأوكسجين ويجهز نوع الشُعلة المطلوبة وحسب الرغبة، ويتكون من مقبض يحوي موصلات الخراطيم وصمامات الوقود الغازي والأوكسجين وحجرة الخلط وحافة المشعل (المنفث) وملحق إضافي للقطع، وهنالك نوعان رئيسان من المشاعل ذو الضغط المتوسط وهو شائع الاستعمال والمشعل ذو الضغط الواطئ. عند استخدام النوع الأول (ذي الضغط المتوسط) يكون ضغط الأوكسجين وضغط الأستيلين متساوياً تقريباً، وهو بحدود (1-10 psi) تعادل (0.07-0.7 bar) وبالاعتماد على حجم المنفث، أما النوع الثاني الحاقن (واطئ الضغط) فيكون ضغط الأستيلين أقل من (1 psi) وضغط الأوكسجين أعلى من ذلك. تعمل صمامات الضغط في المقبض على تنظيم كميات دخول الأوكسجين والأستيلين إلى حجرة الخلط لتوليد الشُعلة المرغوبة للحام. **وحافة المشعل** عبارة عن منافث للخليط وتتوفر بأحجام مختلفة بحسب فتحة خروج الغازات، كلما كبرت الفتحة زادت كمية خروج الغازات وبالتالي شُعلة أكبر ومن ثم توليد حرارة أكبر والعكس صحيح، واختيار حجم حافة المشعل يتم بالاعتماد على نوع المعدن المراد لحامه، وهنالك حافة بتركيبة خاصة تستعمل لقطع المعادن إذ توفر كميات أكبر من الأوكسجين، الشكل (4-6) يبين مشعل لحام للوقود الغازي مع أجزائه.

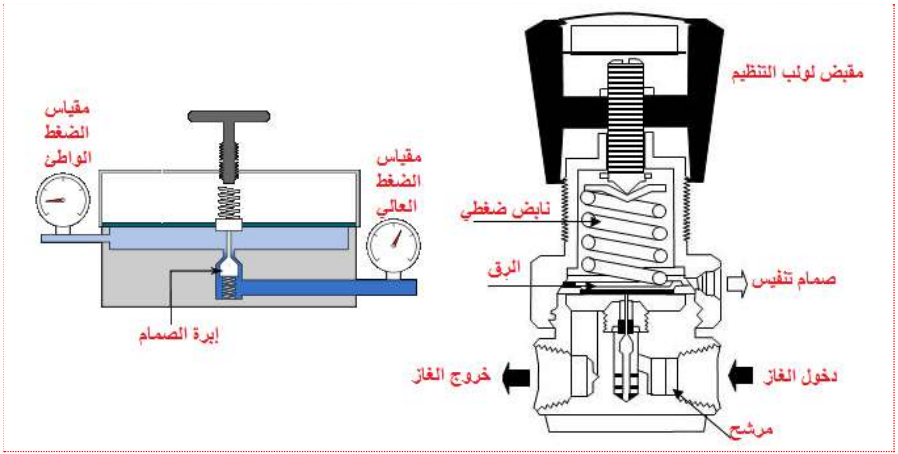
شكل 4-6 مشعل لحام الوقود الغازي وأجزاءه

تقوم **منظمات الضغط** لأسطوانتي الأوكسجين والأستيلين أو أي وقود غازي آخر بتخفيض الضغط من ضغط القنينة إلى ضغط العمل، وقد يصل الضغط في أسطوانة الأوكسجين إلى (150 bar) ويجب أن يخفض إلى ضغط العمل، أما ضغط أسطوانة الأستيلين قد يصل إلى (17.5 bar) ويجب أيضاً أن يخفض بمنظم الضغط إلى ضغط العمل. في حالة تزويد الغازات عبر أنابيب من محطة ضخ مركزية إلى ورشة العمل تكون الضغوط أقل مما ذكر أعلاه، ومع هذا تبقى الحاجة مستمرة لمنظمات الضغط. **إن وظيفة منظم الضغط** هي تزويد معدل حجمي ثابت للغازات وبشكل آلي إلى مشعل اللحام (أي لا يؤثر على عمله مقدار كمية الغاز داخل الأسطوانة أو ضغطه). وتختلف منظمات الضغط فيما بينها بحسب نوع الغاز أو الوقود المستعمل من ناحية التركيب الداخلي، وهي تستعمل فقط للغاز المصممة له، وهي على نوعين الأول يتم تنظيم الضغط بمرحلة واحدة ويحتاج إلى تعيير بين فترة وأخرى، والآخر يعمل بمرحلتين إذ يقوم بتنظيم الضغط من ضغط الأسطوانة إلى ضغط متوسط ومن ثم من هذا الضغط إلى ضغط العمل (أي بعبارة أخرى أنه يتكون من منظمين بجسم واحد) وهذا النوع يكون أكثر دقة ولا يحتاج إلى إعادة تنظيم. تتعشق منظمات الضغط مع رأس الأسطوانة بصامولة مسننة ولا يمكن تركيب المنظمات بصورة خاطئة وذلك لكون منظم الأوكسجين ذا سن باتجاه اليمين ومنظم الأستيلين باليسار. تحوي منظمات الضغط على مقياسين الأول لقراءة ضغط الأسطوانة الداخلي والآخر لقراءة ضغط التصريف. الشكل (4-7) يبين منظم ضغط مقطوعاً لتوضيح تركيبه الداخلي. إن عملية تركيب المنظمات يجب أن تكون بشكل دقيق والتأكد بعدم وجود تسرب بالغاز ولا يسمح مطلقاً بتزييت أسنان المنظمات عند تعشيقها لتفاعل الأوكسجين مع الزيت والذي يؤدي إلى انفجار الأسطوانة. وعلى كل حال هنالك تعليمات للسلامة المهنية خاصة في موضوع لحام الأوكسي-أستيلين يجب اتباعها بشكل محكم وعدم التهاون معها لخطورة الموضوع على حياة العاملين وسلامتهم، وستذكر في كتاب التدريب العملي.



الشكل 4-7 منظم ضغط بقطع جزئي وصورة لمنظم يستعمل لغاز الأوكسجين

يحوي منظم الضغط على رِق (غشاء) مرن مسيطر على إبرة صمام بين منطقة الضغط العالي ومنطقة الضغط الواطئ، النابض الضغطي وللولب الضبط (التعيير) فيه قبضة ويقومان بموازنة ضغط الغاز ضد الرِق، يكون موقع الصمام الإبري بمواجهة ضغط الغاز العالي بينما النابض واللولب يكون موقعهم في الجهة الأخرى المواجهة للجو الخارجي. في حالة غلق الصمام يكون الرِق بوضعه المسطح والإبرة تغلق فتحة التصريف بالصمام من جهة الضغط العالي وحالة النابض الضغطي يكون بدون تحميل. عند تدوير قبضة للولب الضبط باتجاه عقرب الساعة سيضغط النابض الذي يعمل على دفع الرِق لفتح الصمام الإبري ويسمح بدخول الغاز بضغط عالٍ في حجرة الرِق، ما يدفع الرِق بالاتجاه المعاكس ويعيد غلق إبرة الصمام، وبموازنة النابض الضغطي مع ضغط الغاز الداخلي ستنفتح إبرة الصمام بفتحة تسمح بتصريف الكمية المطلوبة من الغاز بجهة الضغط الواطئ. الشكل (4-8) يوضح مخطط عمل منظم الغاز بمرحلة واحدة.

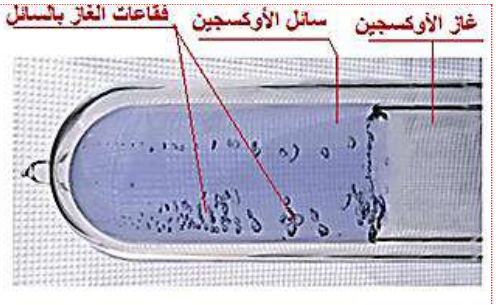


شكل 4-8 مخطط عمل منظم الغاز

إن **خراطيم توصيل الغازات** بين صمام الأسطوانات ومشعل اللحام عبارة عن خراطيم مطاطية مقوّى بالكتان قطرها عادةً يكون بقياس ربع إنج (6.4 mm) وطولها لا يقل عن (5 m) لتسمح بمرونة العمل. والخراطيم معّرفة بالوان معينة بحسب نوع الغاز وغالباً ما يستعمل اللون الأحمر أو البرتقالي للوقود الغازي واللون الأخضر أو الأزرق أو في بعض الأحيان الأسود لغاز الأوكسجين ويعتمد اللون بحسب مواصفات الدول. ويجب المحافظة على الخراطيم دائماً بحالة جيدة لأن تلفها سيتسبب بفقدان الغاز نتيجة التسرب وبالتالي قد يسبب حوادث كارثية.

5-2-4 تجهيز الغازات Gasses Supply

يجهز الأوكسجين لعملية اللحام بالوقود الغازي عن طريق تعبئة الأوكسجين وهو بالحالة السائلة بأسطوانات فولاذية ذات تحمل للضغط العالي وترسل الأسطوانات إلى مواقع اللحام، وفي حالة المصانع أو الورش الكبيرة التي فيها محطات عديدة للحام وقطع المعادن يتم تجهيز الأوكسجين عن طريق منظومة أنابيب يضخ الأوكسجين إليها عبر محطة تجمع أسطوانات الأوكسجين وقد يضخ الأوكسجين للأنابيب وهو بالحالة السائلة عند الاحتياج لكميات كبيرة من الأوكسجين. يتم الحصول على الأوكسجين النقي، لاحظ الشكل (4-9) الذي يوضح لون سائل الأوكسجين وبعض خواصه، تعتمد درجة النقاوة بحسب الاستعمال على أن لا تقل عن (90%) وفي الاستخدامات الطبية يجب أن لا تقل عن (98%) من معامل إنتاج الغازات، وعملية الحصول على الغازات النقية (الأوكسجين والنتروجين) من الهواء تتم بطريقة الضغط والتبريد، إذ يتم ترشيح الهواء الجوي من الأتربة والعوالق الأخرى ويجفف (تسحب الرطوبة) ومن ثم يضغط بضواغط ترددية بضغط عالٍ جداً بحدود (200 bar) أو أكثر على عدة مراحل يتخللها تبريد، ويعاد تنقيته وتجفيفه مرة أخرى ويمرر بصمام لغرض تمدده ثم يمرر عبر مبادل حراري بتدفق عكسي لتبريده تبريداً فائقاً ويتحول معظم الهواء إلى الحالة السائلة والجزء المتبقي يعاد إلى الضاغط لغرض ضغطه مرة أخرى، هنالك عدة منظومات لهذا الغرض أكثرها شيوعاً هي منظومة تدعى لند (Linde). والسائل يضخ إلى أسطوانة بشكل برج وفيها يتم عزل السوائل (الأوكسجين والنتروجين) بسبب الفرق بالكثافة وتسحب من فتحات خاصة وتعبأ بالأسطوانات تحت الضغط العالي.



خصائص الأوكسجين (ثنائي الذرة):

كثافة الغاز (1.43 g/l) كثافة السائل (1.14 g/cm³)
عديم اللون بالحالة الغازية وذو لون أزرق بالحالة السائلة
نقطة الغليان (-183°C) ، النقطة الحرجة (-118°C)
يمكن الحصول على أوكسجين أحادي الذرة أو ثلاثي الذرة والذي يسمى بالأوزون.

شكل 4-9 لون سائل الأوكسجين وخصائصه

يجهز غاز الأستيلين عادةً بأسطوانات تؤخذ إلى مواقع العمل، وفي بعض الأحيان تجهز عن طريق منظومة الأنابيب كما هو في حالة تجهيز الأوكسجين عندما يكون هنالك طلب كبير على الغاز بسبب كثرة مواقع اللحام أو القطع في موقع العمل، وفي كل الأحوال يجب أن يكون التعامل مع هذا الغاز الشديد الاشتعال بحذر شديد وتطبيق شروط واجبة التنفيذ بالمواصفات ومعايير السلامة المهنية. وخواص الغاز بالإضافة إلى قابليته العالية على الاشتعال فهو متسامٍ عديم اللون وذو رائحة مميزة كريهة، سام وقليل الذوبان بالماء ولكنه يذوب في المذيبات العضوية مثل الأسيتون، وكثافة الغاز أقل من كثافة الهواء وهي بحدود ($1.1\ kg/m^3$)، درجة انصهاره (-80.8°C) وغليانه (-84°C).

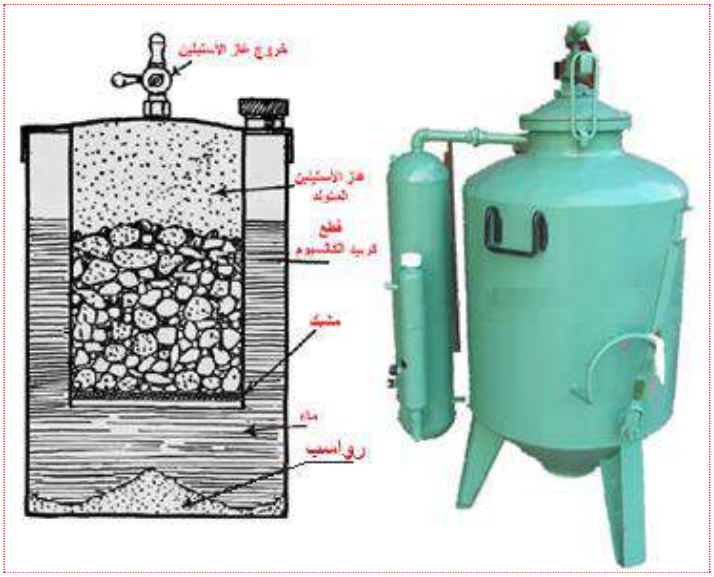
يستخدم كربيد الكالسيوم في **إنتاج غاز الأستيلين** الذي ينتج من تفاعل كربيد الكالسيوم والماء بمولدات خاصة تسمى مولدات الأستيلين، تم تحضيره لأول مرة من قبل (فريدرش فولر) عام 1862، سيتم شرح تفاصيل تحضير الأستيلين ومواصفات المولدات وأسطوانات تعبئته بكتاب التدريب العملي، لاحظ الشكل (4-10). المعادلة الكيميائية الخاصة بتحضير الأستيلين هي:

$$CaC_2 + 2H_2O \rightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2 \qquad (4\text{-}5)$$

ويكتسب كربيد الكالسيوم أهمية خاصة كمصدر للحصول على غاز الأسيتيلين المستخدم في عمليات اللحام، **يحضر صناعياً** من مواد طبيعية هي أوكسيد الكالسيوم (CaO) وفحم الكوك، ولإنتاج طن واحد من كربيد الكالسيوم يستهلك (950 kg) من أوكسيد الكالسيوم و (650 kg) من فحم الكوك وإلى (2.9-3.3 MWh) طاقة كهربائية، تصل درجات حرارة الأفران إلى (2100°C) كافية لتفاعل وصهر المركبات المذكورة، يتم التفاعل الكيميائي بموجب المعادلة الآتية:

$$CaO + 3C \rightarrow CaC_2 + CO \qquad (4\text{-}6)$$

يستخرج كربيد الكالسيوم من الأفران بشكل حجر يبرد ومن ثم يطحن في كسارات خاصة ويصنف الناتج بحسب الحجم الحبيبي، ويعبأ ببراميل محكمة الغلق لا تسمح بدخول الماء كما هو مبين في الشكل (4-11)، وينبغي الحذر الشديد عند فتح البراميل لأنه بمجرد دخول الهواء الجوي المحمل بالرطوبة يتولد غاز الأستيلين، ولذا ينصح باستخدام أدوات خاصة لفتح البراميل لا تسبب بعمل أية شرارة مثل العُدد المصنوعة من سبائك النحاس- بريليوم، لاحظ الشكل (4-12). إن كربيد الكالسيوم المتوفر بالأسواق مادة صلبة مسامية ويكون لونها رمادياً إلى رمادي مسود نتيجة آثار فحم الكوك كثافته بحدود ($2.22\ g/cm^3$) ودرجة حرارة انصهاره تساوي (2200°C)، وتعود الرائحة الكريهة لكربيد الكالسيوم إلى تكون الفوسفين (PH_3) لتعرض آثار فوسفيد الكالسيوم الموجودة في الحجر للرطوبة الجوية.



شكل 4-10 مولد الأستيلين سعة صغيرة (3 m^3/h)، اليسار مخطط المولد

الشكل 4-11 حجر كربيد الكالسيوم وبرميل تعبئته

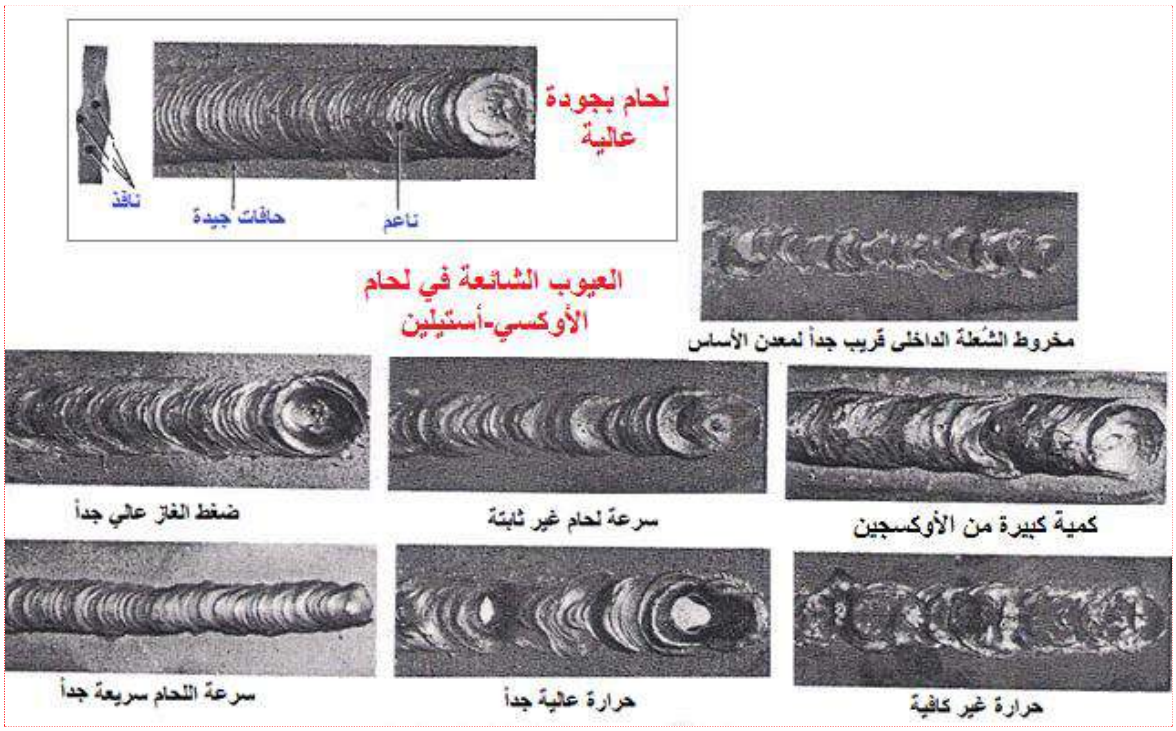
شكل 4-12 أدوات عمل يدوية بدون شرر مصنوعة من سبيكة نحاس– بريليوم

6-2-4 جودة الملحومات Quality of Welds

إن جودة معدن لحام الأوكسي-أستيلين قد يساوي جودة معدن قطع العمل المراد لحامها، وهذا يعتمد على استعمال وبشكل صحيح (الاختيار الأفضل) لكل من معدن الإضافة (سلك اللحام)، مساعد الصهر المناسب، فضلاً على مهارة عامل اللحام. للحصول على ملحومات ذات جودة عالية، ويجب اتباع جداول خاصة لكل نوع من أنواع طرائق اللحام وإلا ستظهر عيوب معينة في الملحومات، الشكل (13-4) يوضح العيوب الشائعة في لحام الأوكسي-أستيلين مقارنة مع لحام جيد باتباع التعليمات الصحيحة.

1-6-2-4 جداول اللحام Welding Schedules

هنالك جداول (تعليمات) خاصة لعمليات اللحام المختلفة ومنها اللحام بالأوكسي-أستيلين وهي مخصصة بحسب نوع المعدن الأساس، جدول (2-4) كنموذج يوضح تعليمات لحام الفولاذ المطاوع (واطئ الكربون) بحسب السمك لقطع العمل من الرقيق إلى السميك، موضح فيها قطر سلك اللحام (المعدن المضاف) وهذا الجدول يمكن استخدامه لأوضاع اللحام كافة، ومهارة عامل اللحام تكمن بالسيطرة على بركة اللحام بحسب الأوضاع، والجدول صمم على أساس أن تكون قطع العمل نظيفة واستخدام شُعلة محايدة وبدون مساعد صهر. وبالإمكان الرجوع إلى مثل هذه الجداول التي تخص نوعية أخرى من المعادن الشائعة بلحام الأوكسي-أستيلين.



شكل 13-4 العيوب الشائعة في لحام الأوكسي-أستيلين

جدول 4-2 جدول تعليمات لحام فولاذ مطاوع بالأوكسي-أستيلين

السمك (mm)	قطر سلك اللحام (mm)	فتحة منفث الحافة (mm)	طول مخروط الشُعلة (mm)	ضغط العمل (psi)		استهلاك الغاز (ft^3/h)	
				الأستيلين	الأوكسجين	الأستيلين	الأوكسجين
1.6-1.2	1.5	0.075	4.8	1	1	2	2
3.2-1.6	2.4	0.9	6.4	2	2	4	4
4.8-3.2	3.0	1.1	8.0	3	3	10	10
8.0-4.8	3.0	1.3	9.5	4	4	20	20
11.0-8.0	4.0	1.6	11.0	5	5	45	45
12.7-11.0	4.8	1.85	12.7	6	6	60	60
19.0-12.7	4.8	2.0	12.7	7	7	70	70
25.4-19.0	6.4	2.4	14.3	8	8	80	80
أكبر من 25.4	6.4	2.7	15.6	9	9	90	90

4-2-7 تحوطات الأمان Safety Precautions

يُعد اللحام بالأوكسي-أستيلين عملية لحام أمينة إذا تم الأخذ بمعايير وشروط الأمان والسلامة المهنية حسب، وهذه الشروط لها علاقة بشُعلة الاحتراق، والغازات المضغوطة الشديدة الاشتعال، فضلاً على سخونة معدن قطع العمل. وغاز الأستيلين النقي بدون رائحة وبدون لون ولكن النوع التجاري منه يضاف له مواد لغرض الرائحة لأمور لها علاقة بالسلامة، ومع هذا فإن الغاز عند الضغوط العالية أعلى من (1 bar) يكون غير مستقر، ولذا يخزن الغاز مع مواد مسامية مثل نشارة الخشب، أسبستوس، الصوف، ويشبع بمادة الأسيتون التي لها إمكانية إذابة الأستيلين بحجم (25) مرة بقدر حجم الأسيتون وهذه الحالة تعطي نوعاً من الأمان عند خزن الغاز.

يجب استعمال واقيات العيون وواقيات جلد الإنسان عند العمل مع الغازات واللحام على حدٍ سواء، وهي تختلف عن باقي الأنواع المستعملة بعمليات اللحام الأخرى لكون شُعلة اللحام ليس بنفس لمعان قوس اللحام الكهربائي. وتستخدم واقيات العيون الملونة عادةً ولا حاجة لاستخدام واقيات الرأس (الخوذة). إن طريقة تنصيب مُعدات اللحام يجب أن تكون دقيقة ومحكمة، وتُعزل أسطوانات الأوكسجين عن أسطوانات الأستيلين في حالة الخزن وبمناطق مختلفة ومنعزلة وكذلك يجب أن يخزن بشكل سليم مشاعل اللحام عند عدم الاستخدام بعد تنفيسه وخراطيم نقل الغازات من الغازات المتبقية المحصورة فيهما، ويمنع استخدام أي نوع من الزيوت أو الشحوم في مُعدات اللحام. لا بد من الإشارة هنا إلى ضرورة التأكد من صلاحية مانعات الحريق الراجع (Back Fire) الموجودة في مُعدات اللحام.

3-4 غازات بديلة في اللحام الغازي Alternative Gases for Oxyfuel Welding

هنالك مجموعة من غازات الوقود التي من الممكن استخدامها كغازات بديلة عن الأستيلين في طرائق لحام الوقود الغازي، تتضمن الهيدروجين، وبروبلين، وبروبان، والغاز الطبيعي، وغاز MAPP، والجدول (4-3) يوضح درجات حرارة الشُعلة لهذه الغازات ومقدار حرارة الاحتراق لكل متر مكعب. يُعد الأستيلين من أكثر الغازات المستعملة في لحام الوقود الغازي ولحام القصدرة والمونة التي سيتم ذكرها في الفصل القادم من أنواع لحام الحالة السائلة-الصلبة، فضلاً على استخدامه في قطع المعادن المختلفة، إلا أن لكل من غازات لحام الوقود الغازي المذكورة لها استخداماتها المحددة مثل لحام الصفائح الرقيقة أو لحام المعادن ذات درجات انصهار الواطئة، فضلاً على أن بعض المستخدمين يفضلون استخدام هذه الغازات بدلاً عن الأستيلين لأسباب تخص السلامة والأمان.

جدول 4-3 غازات لحام الوقود الغازي ودرجات حرارتها وحرارة الاحتراق

نوع الوقود الغازي	الرمز الكيمياوي	درجة حرارة الشُعلة المحايدة °C	كمية حرارة الاحتراق MJ/m^3
الأستيلين	C_2H_2	3087	55
غاز MAPP	C_3H_4	2927	91.7
بروبلين	C_3H_6	2900	89.4
بروبان	C_3H_8	2526	93.1
هيدروجين	H_2	2660	12.1
الغاز الطبيعي	$CH_4 + C_2H_6$	2538	37.3

ملاحظة: ذُكرت درجة حرارة الشُعلة المحايدة كونها الأكثر استخداماً في عمليات اللحام المختلفة

4-3-1 غاز MAPP

يُعد غاز (Methylacetylene-Propadiene) المستخدم كوقود للحام الغازي الأكثر قرباً من غاز الأستيلين في درجة حرارة الاحتراق ومقدار الحرارة المتولدة من عملية الاحتراق. الرمز MAPP هو الرمز التجاري المعروف به نسبة لمكوناته، وخصائص الاحتراق مشابهة جداً لخصائص احتراق غاز الأستيلين. إن المشاكل المصاحبة المعروفة في خزن الأستيلين بالحالة السائلة والتي ذكرت سابقاً، غير موجودة في هذا النوع من غازات الوقود، إذ يتم تعبئة الغاز بأسطوانات خاصة بحالة سائلة تحت ضغط مناسب وبدون مشاكل، وتتوفر أسطوانات من هذا الغاز بحاويات صغيرة من النوع المستهلك (لا يعاد تعبئتها) يمكن استخدامها بسهولة في أي ظرف كان، كما هو موضح في الشكل (4-14).

شكل 4-14 أسطوانات تعبئة غاز MAPP

احتراق الغاز يشبه احتراق الأستيلين ويتم بمرحلتين كالآتي:

$$2C_3H_4 + 3O_2 \rightarrow 6CO + 4H_2 + Heat \qquad (4\text{-}7)$$

يلاحظ من المعادلة أعلاه أن ناتج التفاعل الكيميائي الأولي هو حرارة وغازات قابلة للاشتعال (الهيدروجين وأول أوكسيد الكاربون)، ما يؤدي إلى تفاعلهم مع الأوكسجين الموجود في الهواء الخارجي بموجب المعادلة الآتية:

$$6CO + 4H_2 + 8O_2 \rightarrow 6CO_2 + 4H_2O + Heat \qquad (4\text{-}8)$$

والغاز سهل الاستعمال وفي نفس الوقت درجة الأمان أفضل من الأستيلين ويمكن استخدامه في لحام المونة والقصدرة مباشرة أي بدون الحاجة إلى الأوكسجين إذ يتم الاحتراق بالهواء الجوي.

4-3-2 غاز الهيدروجين Hydrogen

عند احتراق الهيدروجين كوقود غازي مع الأوكسجين تسمى العملية بلحام الأوكسي-هيدروجين ويرمز لها بـ (OHW)، إن درجة حرارة شُعلة الاحتراق هي أقل من لحام الأوكسي أستيلين كما هو مبين في الجدول السابق، ولون الشُعلة لا يتأثر بنسبة خلط غاز الهيدروجين وغاز الأوكسجين وحتى لا ترى بالعين المجردة، ولذا يلاقي العامل باللحام صعوبة في تنظيم المشعل بما يناسب عملية اللحام، نسبة الخلط للشُعلة المحايدة هي (2:1) واحد أوكسجين، معادلة الاحتراق كالآتي:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + Heat \qquad (4\text{-}9)$$

وبهذه النسبة يكون احتراق الهيدروجين احتراقا تاماً وفي حالة زيادة نسبة الأوكسجين لا يفيد في زيادة درجة حرارة الشُعلة بل تكون العملية زيادة في أكسدة المعادن المراد لحامها وخسائر زائدة لكمية الأوكسجين المصروفة. ويستخدم هذا النوع من اللحام للمعادن ذات درجات الانصهار المنخفضة مثل الألمُنيوم والرصاص وكذلك يستخدم في لحام المونة لهذه المعادن.

4-3-3 غاز البروبان Propane

هذا الغاز يستعمل في كثير من الأحيان في التسخين الأولي لعمليات اللحام المختلفة ولحام المونة والقصدرة، فضلاً على قطع المعادن وخصوصاً المقاطع الإنشائية الفولاذية. يحترق الغاز بمرحلة واحدة وبموجب المعادلة الآتية:

$$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + Heat \qquad (4\text{-}10)$$

4-3-4 الغاز الطبيعي Natural Gas

الغاز الطبيعي يحوي في أغلب الأحيان على غازي الميثان (CH_4) والإيثان (C_2H_6)، ويتم الحصول عليه طبيعياً بعملية مشابهة لعملية استخراج النفط وأحياناً يكون الغاز مصاحباً لعملية استخراج النفط، عند احتراق الغاز الطبيعي مع الأوكسجين تنتج شُعلة بدرجة حرارة عالية يمكن الاستفادة منها بعمليات اللحام بالورش الصغيرة. إن احتراق غاز الميثان يتم بمرحلة واحدة كالآتي:

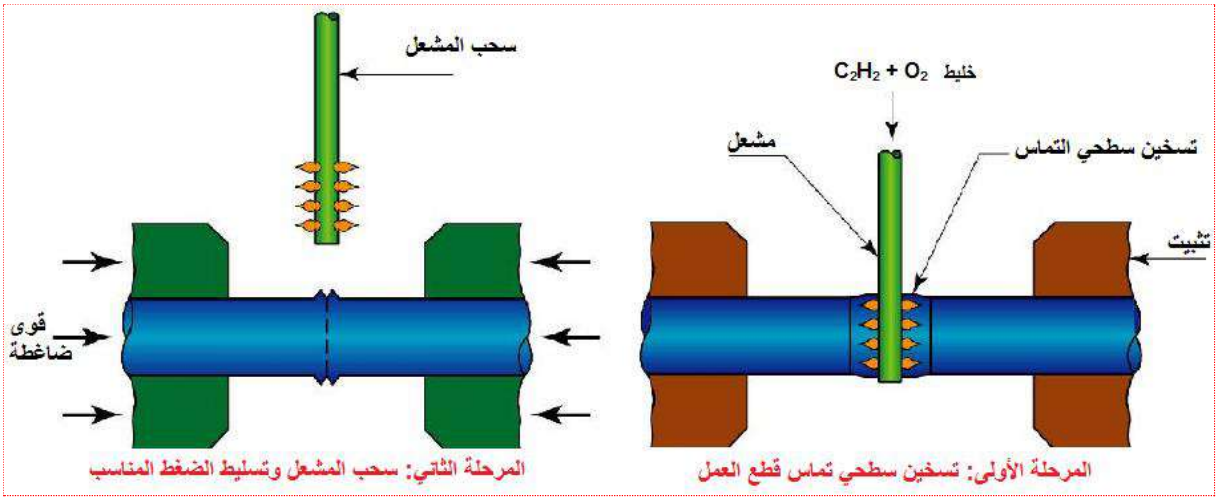
$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + Heat \qquad (4\text{-}11)$$

4-4 تطبيقات أخرى للمشعل الغازي Other Applications of Gas Torch

هنالك تطبيقات أخرى للمشعل الغازي غير التي ذكرت بخصوص اللحام بالوقود الغازي الاعتيادية إن كان الغاز أستيلين أو غازات بديلة، من هذه التطبيقات اللحام الانصهاري بالمشعل الغازي والضغط وقطع المعادن.

4-4-1 اللحام الغازي الضغطي Pressure Gas Welding (PGW)

هذا النوع من اللحام الانصهاري هو حالة خاصة من طرائق اللحام بالوقود الغازي، الذي تتم فيه عملية اللحام بتسليط الضغط على طول مساحة التماس بين قطعتي العمل بعد تسخينهم بمشعل غازي مناسب مستخدماً غاز الأستيلين أو أي وقود غازي آخر. يستمر تسليط الضغط إلى أن يتم تصلب الملحومة وإنجاز عملية اللحام، لا يستخدم في هذه العملية معدن إضافة، استخدامات هذه الطريقة هي لحام الأنابيب والقضبان وسكك الحديد، الشكل (4-15) يبين مخطط العملية.



شكل 4-15 مخطط اللحام الغازي مع الضغط

4-4-2 القطع بلهب الغاز Gas Flame Cutting

يمكن استخدام مشعل اللحام الغازي لقطع المعادن وهي طريقة واسعة الاستعمال في قطع المقاطع الفولاذية المختلفة الأشكال ومختلفة القياسات، إذ يركب أنبوب إضافي على المشعل الاعتيادي أو مشعل خاص للقطع يسمى بالمشعل الحاقن، الذي يسمح بزيادة كميات الأوكسجين والأستيلين الذي يكون هو الوقود الغازي المناسب لهذه العملية علماً أنه هنالك إمكانية استعمال غاز الطبخ المتكون من مزيج غازي البروبان والبيوتان، تكون حافة المشعل الغازي للقطع مختلفة من ناحية الشكل عن حافة اللحام فضلاً على الحجم الكبير نسبياً لها، والضغط المناسب لعملية القطع هي تقريباً بحدود (25 psi) للأوكسجين و(5 psi) للأستيلين. خطوات عملية القطع هي نفسها لعملية اللحام والشُعلة تكون من النوع المحايدة أيضاً، إلا أن كمية الحرارة المتولدة بعملية القطع تكون أكبر، الشكل (4-16) يوضح عملية قطع المعادن.

شكل 4-16 عملية قطع المعادن بالمشعل الغازي

أسئلة الفصل الرابع

س1) علل ما يأتي:

1. استخدام مساعد الصهر في لحام الأوكسي- أستيلين.
2. لا يُنصح مطلقاً بإجراء عملية اللحام بالأوكسي- أستيلين في مواقع مغلقة.
3. لا يُوصى بلحام بعض المعادن بشُعلة مؤكسدة أو مختزلة وخصوصاً الفولاذ.
4. لا يُسمح مطلقاً بتزييت أسنان منظمات الضغط في مشاعل لحام الأوكسي- أستيلين.
5. الرائحة الكريهة لكربيد الكالسيوم.
6. يلاقي العامل باللحام بواسطة غاز الهيدروجين صعوبة في تنظيم المشعل وبما يناسب عملية اللحام.

س2) عرف لحام الوقود الغازي وما هي أهم استخداماته.

س3) كيف تتم آلية توليد الحرارة في لحام الأوكسي- أستيلين، سانداً إجابتك بالمعادلات الكيميائية.

س4) قارن بين الأنواع الثلاثة لشعلة الأوكسي- أستيلين، موضحاً إجابتك بالرسم وما هي مميزات واستخدامات عملية لحام الوقود الغازي بهذه الشُعلة؟

س5) ما هي مميزات غاز الأستيلين؟ وكيف يتم إنتاجه، سانداً إجابتك بالمعادلات الكيميائية.

س6) ما هي أهم شروط السلامة المهنية الواجب اتباعها في لحام الأوكسي- أستيلين؟

س7) قارن بين أنواع الغازات المستخدمة في لحام الوقود الغازي وقطع المعادن.

س8) املأ الفراغات الآتية بما يناسبها:

1. يمكن أن تقسم طرائق اللحام الكيمياوي إلى.....و..... .
2. ميزات اللحام بغاز MAPP هي .....و ..... و..... .
3. يعمل صمام الضغط في مقبض لحام الأوكسي- أستيلين على.....إلى حجرة الخلط لتوليد الشعلة المرغوبة للحام.
4. يتكون الغاز الطبيعي في أغلب الأحيان من غازي.....و..... .

س9) استخدمت شُعلة محايدة من لحام أوكسي-أستيلين للحام قطعتي حديد زهر على طولهما الذي يساوي (60 cm) والحرارة النوعية للمعدن تساوي ($7.8\ J/mm^3$)، شكل منطقة اللحام عبارة عن مثلث مقلوب ارتفاعه (5 mm) وقاعدته (4 mm)، إذا كانت كفاءة عملية اللحام ضعيفة وتساوي (10%) فقط ونسبة الحرارة الفعلية التي صهرت منطقة اللحام إلى مجموع الحرارة المنتقلة لقطعتي العمل تساوي (75%)، جد الآتي: 1- حجم منطقة اللحام، 2- مقدار الحرارة اللازمة لصهر هذا الحجم، 3- مقدار حجم استهلاك الأستيلين والأوكسجين. ج1/ $6000\ mm^3$ ، ج2/ 46.8 kJ ، ج3/ $0.011\ m^3$

الفصل

الخامس

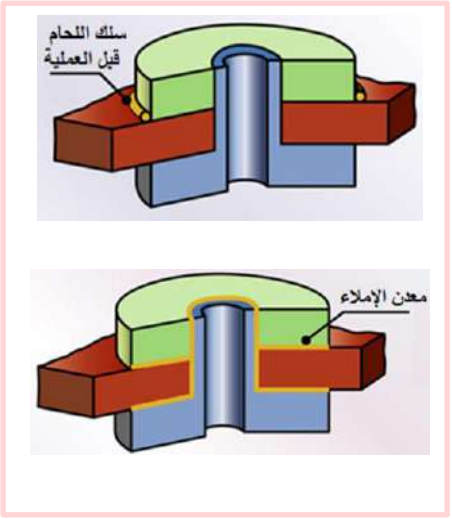
لحام الحالة السائلة ـ الصلبة

Liquid-Solid State Welding

الأهداف

الهدف العام

سيتمكن الطالب من معرفة طرائق لحام الحالة السائلة – الصلبة وتقنياتها وتطبيقاتها في الصناعة، ويدرك أهمية درجة الحرارة في تحديد نوعية اللحام، كذلك يتمكن من معرفة أنواع مواد الإضافة وتوافقها مع معدن أو مادة الأساس، يميز بين لحام القصدرة والمونة والربط باللصق.



الأهداف الخاصة

بعد إنهاء دراسة مفردات الفصل الخامس وفهمها سوف يكون الطالب مؤهلاً بالآتي:

1. يعرف لحام الحالة السائلة – الصلبة.
2. يعرف طرائق لحام الحالة السائلة - الصلبة.
3. يعرف مميزات لحام القصدرة ولحام المونة.
4. يعرف آلية حدوث اللحام.
5. يعرف أطوار عملية اللحام.
6. يفهم مصطلح التندية وكيفية حدوثه.
7. يعرف أنواع مساعدات الصهر في لحامي القصدرة والمونة ويميز بينهما.
8. يفهم أهمية تحديد الخلوص وتأثيره على جودة اللحام.
9. يحدد مجال لحام القصدرة عن لحام والمونة.
10. يعرف سبائك لحام المونة ولحام القصدرة.
11. يعرف أنواع الوصلات.
12. يعرف أهم طرائق لحام المونة والقصدرة.
13. يعرف مميزات ومحددات الربط باللصق.

لحام الحالة السائلة – الصلبة Liquid-Solid State Welding

1-5 مقدمة Introduction

يطلق مصطلح اللحام (Welding) تعبيرياً على طرائق هذه المجموعة، لأن هذا المصطلح يستخدم علمياً فقط في حالة الطرائق التي ينصهر فيها المعدن الأساس (قطع العمل) كما هو في حالة طرائق اللحام بالحالة السائلة، أما في هذه المجموعة فسيتم صهر المواد المضافة (الحشو) فقط، وغالباً ما تنتشر هذه المواد المضافة المنصهرة بين منطقة التداخل للمعدن الأساس على وفق مبدأ الخاصية الشعرية. ومن الجدير بالذكر أنه يتم تضمين مصطلح وصل المعادن في بعض المصادر العلمية، ويستعاض عنه في بعض الأحيان بمصطلحات أخرى تعتمد على ماهية المادة المضافة. وطرائق هذه المجموعة لها تطبيقات واسعة جداً وبالإمكان تصنيفها على ثلاثة أقسام وكالآتي:

1. لحام القصدرة Soldering
2. لحام المونة Brazing
3. الربط باللصق Adhesive Bonding

إن لحام القصدرة واللحام بالمونة يشابهان أساليب اللحام الأخرى من حيث إنتاجهما لوصلات مترابطة قوية نوعاً ما، ويستخدمان إذا كان تصميم الشغلة لا يسمح بلحامها بالضغط أو بالصهر (كأن تكون معقدة الشكل صغيره المقطع مثلاً)، يقع اللحام بالقصدرة والمونة ما بين لحام الانصهار ولحام الحالة الصلبة مقارنة مع طرائق اللحام الأخرى، ويتميز عنهم بإمكانية وصل المعادن التي لها قابلية متدنية للحام وللمعادن المتشابهة وغير المتشابهة، ولا تستخدم فيهما حرارة عالية تتلف المعدن الأساس.

وللوصلات الملحومة بالقصدرة أو بالمونة وظائف مختلفة، فإذا كانت تستخدم مثلاً في نقل القوى فينبغي أن تكون الملحومات ذات مقاومة ميكانيكية عالية ولهذا تربط هذه الوصلات بلحام المونة، ويتمثل ذلك في لحام أجزاء الهياكل المعدنية ولحام اللقم الكاربيدية المسمنتة بالمونة على عُدد القطع (أقلام الخراطة والتفريز)، فضلاً على لحام الأنابيب التي تنقل الموائع (المواد السائلة أو المواد الغازية) المختلفة وخصوصاً عندما تكون تحت ضغط أعلى من الضغط الجوي. أما لحام القصدرة فيستخدم للحام الحاويات المانعة للتسرب كخزانات الماء، فضلاً على لحام الوصلات الكهربائية المختلفة التي تضمن التوصيل الكهربائي الجيد واستمراره كما هو في الأجهزة الإلكترونية ولوحات السيطرة والتطبيقات الهندسية لأجهزة الاتصالات المختلفة وغيرها.

سيتناول هذا الفصل أهم طرائق اللحام بالحالة السائلة – الصلبة وتطبيقاتها المختلفة.

2-5 لحام القصدرة ولحام المونة Soldering and Brazing

لحام القصدرة ولحام المونة يختلفان عن لحام الانصهار fusion welding بعدم حدوث انصهار طرفي وصلة اللحام، بل يتم الربط بصهر المادة المضافة (مادة الحشو أو سبيكة اللحام)، وانسيابها الحر على مدى واسع من درجات الحرارة أقل بكثير من درجة حرارة انصهار معدن طرفي وصلة اللحام، وتؤدي الخاصية الشعرية إلى جريان سبيكة مادة الحشو المنصهرة بين السطوح المجهزة بشكل مترابط لقطع العمل. مجموعة طرائق لحام القصدرة تحدد حسب الجمعية الأمريكية للحام (AWS) بتلك التي تنصهر فيها المادة المضافة بدرجة انصهار أقل من 425°C، في حين أن مجموعة طرائق لحام المونة تنصهر فيه المادة المضافة بدرجات حرارة أعلى من تلك النقطة.

مميزات لحام القصدرة ولحام المونة:

- إمكانية ربط أجزاء مختلفة السمك أو المعدن على حدٍ سواء.
- أمكانية ربط أكثر من قطعتين وبأشكال مختلفة في آنٍ واحد.
- لا تحتاج هذه الأنواع من الربط إلى معالجة حرارية لاحقة لعملية اللحام للتخلص من الإجهادات الداخلية كما يحدث في عمليات لحام الانصهار، ولهذا يمكن أن تؤتمت عملية اللحام مع الخط الإنتاجي.

محددات لحام القصدرة ولحام المونة:

- كلفة عمليات اللحام قد تكون عالية.
- صعوبة الفحص والتفتيش للأجزاء المربوطة.
- قوة ملحومات واطئة نسبياً وخصوصاً في حالة سبائك المادة المضافة ذات درجات انصهار واطئة.
- لا تستخدم مع الأجزاء التي قد تتعرض إلى درجات حرارة عالية في أثناء الخدمة.

1-2-5 آلية حدوث اللحام

انصهار معدن اللحام (الحشو) وانتشاره وتغلغله ما بين الأسطح المتقابلة للقطع المراد لحامها بوساطة الخاصية الشعرية واتصاله بهما لها متطلبات معينة، مثل تهيئة منطقة اللحام التي تعني تثبيت قطع العمل وتنظيف الأسطح جيداً قبل اللحام مباشرة، فضلاً على اختيار سبيكة اللحام المناسبة. ومن الشرط اللازم توفره لكي تنجح عمليه اللحام حدوث ظاهرة التندية (ترطيب بالمعدن المنصهر) Wetting لسطحي وصلة اللحام بسبيكة اللحام ولكي يحدث ذلك يجب أن تذوب بعض مكونات طرفي المعدن.

عندما تصل درجة الحرارة الدرجة المناسبة لانصهار سبيكة اللحام تبتدئ سبيكة اللحام بالانسياب ويندى سطح المنطقة ويسيل عليه ليتصل بالمعدن الأساس، ولهذا أن عملية اللحام ذاتها تتم في أطوار ثلاثة هي: (الانصهار، الانتشار, الاتصال).

- **الانصهار Melting**

درجات انصهار المعادن النقية تكون بدرجة واحدة محددة مثل درجة انصهار الرصاص 327°C ودرجة انصهار القصدير 232°C، ولكن السبائك دائماً تنصهر وتتجمد بمدى من درجات الحرارة بالاعتماد على نسبة مكونات السبيكة وتكون أقل من درجات انصهار معادنها النقية، وهنالك نسبة معينة من المكونات تكون درجة انصهار السبيكة أقل بكثير من درجات الانصهار والتي تسمى بسبيكة اليوتكتك، فعلى سبيل المثال سبيكة اليوتكتك لنظام الرصاص – قصدير والتي تكون نسبة القصدير بحدود 62% تنصهر بدرجة حرارة هي 183°C وتتصرف هذه السبيكة على غرار المواد النقية من ناحية انصهارها بدرجة حرارية واحدة محددة، وسيتم تناول الموضوع بمراحل دراسية قادمة.

- **الانتشار Spreading**

التندية (الترطيب بمعدن القصدرة) Wetting يشمل بالضرورة التفاعلات المعدنية بين سبيكة الإضافة والمعدن الأساس. هذا التفاعل في منطقة التداخل البينية (منطقة اللحام) يمكن أن يؤدي إلى طبقة آصرة تساهمية من مركبات شبه معدنية. المركبات شبه المعدنية ذات خصائص مغايرة لخصائص بلورات المعادن والسبائك، حيث إنها مواد صلبة هشة لها درجات انصهار عالية ولها مقاومة عالية للتآكل الكيمياوي. وتكون هذه المركبات بشكل مفرط قد يؤدي إلى تعرض الوصلات الملحومة للفشل الميكانيكي.

في لحام القصدرة ولحام المونة، تكون المركبات شبه المعدنية بطبقة نظامية نحيفة تمثل المادة اللاصقة التي تكون الرابطة بين معدن الأساس ومعدن الإضافة، ولهذا يجب أن يكون هنالك توافق معدني على الأقل مع أحد عناصر سبيكة القصدرة (معدن الإضافة)، مثلاً عند استعمال سبيكة القصدرة (قصدير–رصاص) مع المعدن الأساس النحاس، سيكون التفاعل بين القصدير والنحاس. وانتشار سبيكة اللحام المنصهرة بين سطوح قطع العمل بفعل الخاصية الشعرية فضلاً على مبدأ الانتشار إذ تتحرك جزئيات المادة من منطقة التركيز الأعلى إلى الأقل تركيزاً، وكأن المنصهر ينجذب من درجة حرارة معدن اللحام المنصهر إلى المنطقة (معدن الأساس) ذات درجات الحرارة الأعلى نتيجة التسخين. علماً أن درجات الحرارة العالية جراء التسخين للمعادن تعمل على تنشيط ذرات معدن الإضافة للتغلغل بين ذرات المعدن الأساس.

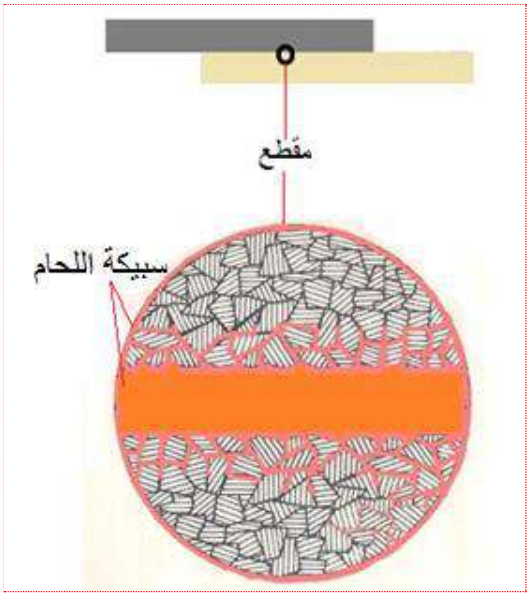
- **الاتصال Bonding**

يمكن أن يعرف على أنه التداخل بالانتشار Diffusion لسبيكة اللحام بمعدن القطعة الأساس، إذ يمكن لسبيكة اللحام المنصهرة (أو جزء منها) النفوذ داخل المعدن الأساس الصلب (غير المنصهر) للقطعة الملحومة وتكوين اتصال ثابت ببنيتها الداخلية، وبعد أن يبرد موضع اللحام يحصل اتصال ثابت بين أجزاء القطعتين بشكل يناسب نوعية معدن القطعتين الملحومتين، والشكل رقم (5-1) يوضح تداخل سبيكة اللحام مع المعدن الأساس.

1 ، 2 قطعتا العمل (معدن الأساس)،

3 طبقة التداخل (تغلغل قطعتي العمل بسبيكة القصدرة أو المونة)، 4 طبقة التداخل تغلغل سبيكة اللحام في قطعة العمل)

(a) مقطع طولي



(b) مقطع مكبر

شكل 5-1 اتصال سبيكة اللحام بمعدن الأساس

يجب أن تكون أسطح قطع العمل المراد لحامها نظيفة وخالية من الشوائب مثل الأكاسيد، الزيوت، وغيرها، وتتم عملية تنظيف الأسطح بطرائق ميكانيكية مختلفة وأخرى كيميائية.

تضاف إلى منطقة اللحام **مواد مساعدة للصهر** مناسبة (Flux)، ولمساعد الصهر ثلاث فوائد، هي:

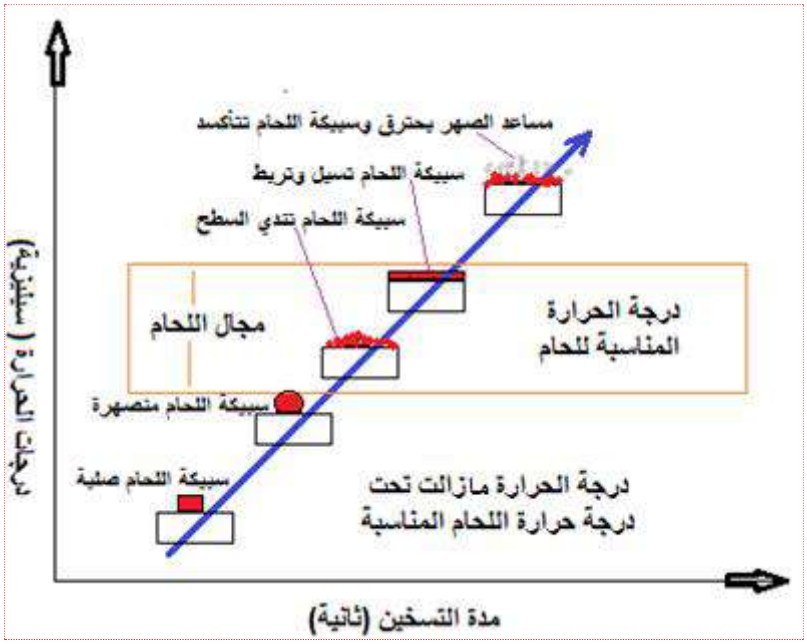
- ❖ تنظيف سطح قطعة العمل كيميائياً.
- ❖ عزل منطقة اللحام عن الهواء الجوي وتمنع حدوث الأكسدة.
- ❖ تعزز من حدوث ظاهرة التبلل (الترطيب) بمعدن الإضافة.

مساعد الصهر يجب أن يكون متوافقاً مع المعدن الأساس ومعدن الإضافة. هنالك ثلاثة أنواع (حالات) شائعة من مساعدات الصهر السائلة والعجينية والمساحيق (Powder)، لاحظ الشكل (5-2).

شكل 5-2 الأنواع الشائعة لمساعدات الصهر

وتسخن منطقة التداخل حال البدء باللحام في أغلب التطبيقات بتسليط حرارة مناسبة لرفع درجة حرارة المعدن الأساس إلى أعلى من درجة حرارة انصهار المادة المضافة (سبيكة اللحام). يتم تحديد المصدر الحراري بالاعتماد على كتلة المنطقة المراد تسخينها وعلى توفر المُعدات اللازمة لذلك، بمعنى آخر أن الكتلة الكبيرة حتماً ستحتاج إلى تسليط كمية حرارة كبيرة. ومن الجدير بالذكر أن جميع المعادن موصلة جيدة للحرارة تقريباً ولهذا فإن الحرارة التي تسلط لن تبقى في منطقة اللحام (مجال اللحام)، بل تنتقل إلى باقي قطعة العمل وبسرعة عالية في بعض المعادن، ومع هذا فإن الحرارة المفرطة تؤدي إلى احتراق مساعد الصهر فضلاً على تأكسد قطعة العمل والتي تتطلب إعادة تنظيفها مرة ثانية وقبل البدء في عملية اللحام، وعندما تكون درجة الحرارة أقل من درجة حرارة اللحام اللازمة فإن سبيكة اللحام لا تسيل وإن كانت في الحالة السائلة، ولهذا فان المعدن الأساس لا يندى أو تكون التندية بشكل غير كامل (في هذه الحالة أن قطع العمل لا تتصل بسبيكة اللحام المنصهرة)، لاحظ الشكل (5-3).

إن أسلوب تسليط الحرارة بالطريقة الصحيحة والمحافظة على درجة الحرارة اللازمة طيلة عملية اللحام مطلوبتان لغرض تسخين قطع العمل بالتساوي والحصول على ملحومات جيدة وبدون عيوب. الشكل (5-4) يوضح بعض أهم مصادر الحرارة اليدوية في عملية لحام القصدرة ولحام المونة.



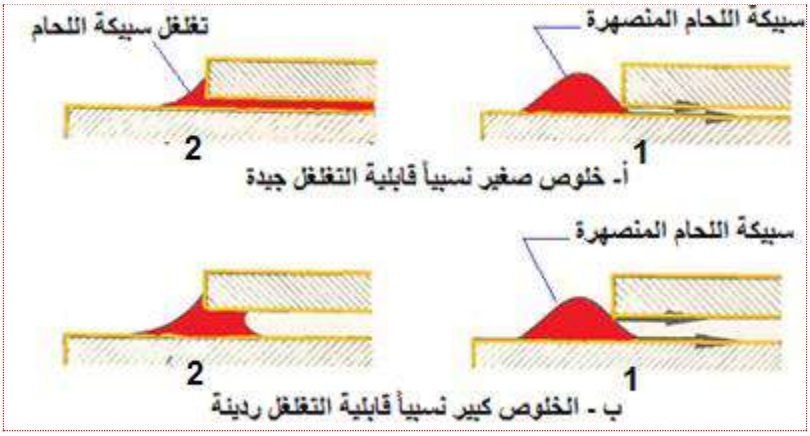
الشكل 5-3 مجال اللحام الصحيح

شكل 5-4 أهم مصادر الحرارة اليدوية في عملية لحام القصدرة ولحام المونة

تؤثر المسافات البينية (الخلوص) بين قطع العمل تأثيراً كبيراً على جودة اللحام في عمليات لحام القصدرة والمونة، كون التصميم الصحيح للخلوص يؤثر على حدوث ظاهرة التندية (الترطيب أو التبلل بمعدن سبيكة اللحام لقطع العمل) أو تغلغل سبيكة اللحام (مادة الحشو) بين قطع العمل وانسيابه، لأنها تستند إلى فعل الخاصية الشعرية، ويُعد الشكل ومقدار الخلوص عاملين أساسيين في تحديد مسافة نفوذ سبيكة اللحام المنصهرة بين قطع العمل، وكلما كانت هذه المسافة طويلة نسبياً زادت قوة الملحومات. عندما يكون الخلوص (البعد بين السطحين المراد لحامهما) صغيراً نسبياً، تنفذ سبيكة اللحام المنصهرة مسافة طويلة نسبياً، وكلما كان الخلوص أصغر نفذ منصهر اللحام مسافة أعمق وإن كان وضع اللحام شاقولياً، إذ ترتفع سبيكة اللحام المنصهرة بالرغم من ثقلها النسبي داخل الخلوص بين سطحي قطع العمل، والعكس صحيح، في حالة كون الخلوص كبيراً نسبياً ستقل مسافة النفوذ لمنصهر اللحام داخل الخلوص. الشكل (5-5) يوضح تأثير مقدار الخلوص على قابلية التغلغل لسبيكة اللحام المنصهرة في عمليات لحام القصدرة والمونة.

شكل الخلوص ومقداره يصمم بحسب نوع سبيكة اللحام (المادة المضافة) والمعدن الأساس وشكل القطعة المراد لحامها، علماً أن لبعض سبائك اللحام مثل سبائك الفضة في لحام القطع النحاسية نفوذية عالية، إذ يمكن نفوذ السبيكة المنصهرة حتى بين القطع المتداخلة والمركبة بالضغط.

لما كانت مادة مساعد الصهر تُبدي شيئاً من المقاومة لنفوذ سبيكة اللحام المنصهرة ولا سيما في حالة اللحام السطحي فان هذه المقاومة قد تؤدي إلى حصر جزء من مساعد الصهر وسط سبيكة اللحام المنصهرة؛ إذ إن سبيكة اللحام تزيح مساعد الصهر على الأطراف بسهوله ويلاقي مقاومة في إزاحتها منه في الوسط، أي: إنه يتغلغل على الأطراف أسرع من تغلغله في الوسط.



شكل 5-5 تأثير الخلوص على تغلغل سبيكة اللحام

3-5 لحام القصدرة Soldering

لحام القصدرة ليس باللحام الحديث الاستعمال، بل ربما يعود إلى العصر البرونزي، عندما اكتشف عامل أنابيب سهولة طلاء سبيكة من القصدير والرصاص لسطح قطعة نحاسية نظيفة، بعدها استخدم الرومان سبيكة (60% Sn - 40% Pb) لربط أنابيب المياه المصنوعة من الرصاص.

ويمكن تعريف لحام القصدرة (يُشار إليه الوصل بالسمكرة أو لحام الكاوية في بعض الأحيان) بأنه اللحام الذي يتم فيه إضافة مواد لا تتجاوز درجات انصهارها 450°C، وهي عملية ربط سريعة لإنتاج وصلات مصنوعة من الفولاذ أو النحاس أو البراص خفيفة الوزن، فضلاً على ربط الأسلاك والأجزاء الكهربائية والإلكترونية.

تنصهر مواد الإضافة (الحشو) وتنتشر تحت فعل الخاصية الشعرية في منطقة التداخل لقطع العمل المراد ربطها بهذه الطريقة، وتترك برهة من الزمن لتتجمد (تتصلب)، ويتم الوصل ميكانيكياً بعد تجمد مادة الإضافة، الخلوص (السماحات الطبيعية) بين منطقة التداخل بحدود (0.125-0.075 mm)، وهو ملائم لربط المعادن المتشابهة وغير المتشابهة (مثل ربط قطعة عمل مصنوعة من النحاس مع قطعة عمل مصنوعة من الألمُنيوم) وفي الحالات التي لا يراد فيها الإفراط في تسخين قطعتي العمل ويعتمد اختيار طريقة وسبيكة اللحام على عدة عوامل مثل المقاومة الميكانيكية ومقاومه التآكل الكيمياوي ولون وصلة اللحام.

ميزات لحام القصدرة هي كالآتي:

1. يحتاج إلى طاقة حرارية واطئة مقارنة مع لحام الصهر ولحام المونة.
2. خواص المعدن الأساس لا تتأثر بسبب انخفاض درجة حرارة القصدرة نسبياً.
3. تتوفر طرائق عديدة للتسخين وبكلف واطئة نسبياً، وبمُعدات بسيطة ورخيصة.
4. موصلية جيدة للكهرباء والحرارة للوصلات الملحومة بهذا النوع.
5. يمكن استعمالها مع الخطوط الإنتاجية المؤتمتة.
6. إمكانية تصنيع حاويات للسوائل والغازات على حدٍ سواء وبإحكام من التسرب.

أما أهم سلبيات لحام القصدرة فتتلخص بحالتين الأولى قوة ميكانيكية ضعيفة للوصلات عدا الوصلات المسلحة بالوسائل الميكانيكية، والثانية احتمالية ضعف أو صهر الوصلة الملحومة عند ارتفاع درجة الحرارة في أثناء الخدمة.

وتقسم طرائق لحام القصدرة بناءً على نوع سبيكة اللحام إلى نوعين رئيسين هما: لحام القصدرة اللين Soft Soldering ولحام القصدرة الصلب Hard Soldering، والنوع الأول تستخدم فيه سبائك ذات درجات انصهار أقل من 250°C كمواد إضافة (معدن الحشو) مثل سبائك قصدير- رصاص، قصدير– رصاص – إنتيمون، قصدير– رصاص – كادميوم. أما لحام القصدرة الصلب فيستخدم فيه سبائك ذات درجة حرارة انصهار أعلى من 250°C كمادة إضافة مثل سبائك الرصاص- فضة، التي تستعمل في التطبيقات التي يمكن أن ترتفع فيها درجات الحرارة في أثناء الخدمة ارتفاعاً نسبياً. والجدول (5-1) يوضح أهم السبائك المستعملة في لحام القصدرة مع درجات حرارة اللحام العاملة وتطبيقاتها، ومن الجدير بالذكر أن معدن الرصاص بدأ يتقلص استعماله في سبائك مواد الإضافة لسميته.

جدول 5-1 سبائك لحام القصدرة

التطبيقات الرئيسة	درجة الانصهار (°C)	Cu %	Zn %	Ag %	Sb %	Pb %	Sn %
وصلات كهربائية وإلكترونية	183	-	-	-	-	37	63
وصلات كهربائية وإلكترونية	188	-	-	-	-	40	60
استخدامات عامة	199	-	-	-	-	50	50
مشعات حرارية للمركبات	207	-	-	-	-	60	40
مُعدات تسخين	238	-	-	-	5	-	95
حاويات الطعام	221	-	-	4	-	-	96
وصلات من الألمُنيوم	199	-	9	-	-	-	91
وصلات تتحمل درجات حرارة عالية	305	-	-	4	-	96	-
وصلات إلكترونية بالسطح	217	0.6	-	3.9	-	-	95.5

عند إجراء عملية القصدرة من الضروري تنظيف اسطح قطع العمل في منطقة الربط من الزيوت والشحوم والقشور الأوكسيدية **باستعمال مساعدات الصهر** المناسبة لإزالة الشوائب أو الأكاسيد التي قد تبقى بعد عملية التنظيف، ومن أفضل مساعدات الصهر المتوافقة مع عملية القصدرة هي محاليل كلوريد الخارصين وكلوريد الأمونيوم مع حامض الهيدروكلوريك، إذ تكون هذه المركبات في أثناء القصدرة طبقة غازية تحجب أوكسجين الهواء الجوي عن سطح قطع العمل، وتستعمل عند الحاجة بعملية قصدرة سريعة خوفاً من مشاكل الأكسدة، أن هذه المجموعة ترسب مواد ضارة على سطع الملحومة لذا يجب إزالتها حال انتهاء عملية القصدرة، ويمكن تحضير كلوريد الخارصين الأكثر استعمالاً كمساعد صهر من التفاعل الكيميائي الآتي:

$$Zn + 2HCl \rightarrow H_2 + ZnCl_2$$

وفضلاً على مساعدات الصهر غير العضوية المذكورة أعلاه، فإن هنالك مساعدات صهر عضوية يتم الحصول عليها من خلاصة (صمغ) بعض الأشجار وإذابتها في مواد مُذيبة مثل الكحول البروبيلي والأحماض العضوية، ولا تترك مساعدات الصهر هذه أية رسوبات ضارة على سطح قطع العمل (الملحومات)، لذا فهي ملائمة جداً لقصدرة المكونات الكهربائية والإلكترونية.

لحام القصدرة في التطبيقات الصناعية غالباً ما يستعمل لربط الأجزاء الإلكترونية وفي بعض الأحيان يستعمل لربط القطع الميكانيكية شريطة عدم تعرض الأجزاء المربوطة لإجهادات أو درجات حرارة عاليتين. ومن أهم التطبيقات لعملية القصدرة هي الآتية:

1. توصيلات وربط العناصر الإلكترونية في الأجهزة السمعية والمرئية وغيرها من الأجهزة الإلكترونية وأجهزة الاتصالات.
2. توصيلات الأسلاك الكهربائية المختلفة.
3. ربط أنابيب نقل الموائع (السوائل والغازات).
4. إنتاج المبادلات الحرارية.
5. في بعض الأحيان تستعمل لتصليح الأدوات المنزلية وغيرها.

1-3-5 خطوات عملية القصدرة Soldering Procedure

بعد تصميم وتصنيع الأجزاء المراد وصلها بالقصدرة بطرائق التصنيع المختلفة واختيار نوعية شكل الربط المناسب للتوصيل، تتم عملية القصدرة بالآلية الآتية:

1. مطابقة قطع العمل.

2. تنظيف أسطح قطع العمل، وتعتمد على طبيعة المواد المراد إزالتها، فتزال الأصباغ والصدأ والأكاسيد المختلفة بورق التنعيم وصوف الفولاذ أو بوساطة القذف الرملي (Sand Blast) أو بالبرادة. أما الزيوت والشحوم فتزال ببخار بعض المركبات الكيميائية أو منظفات قلوية ساخنة، ويمكن إزالة الصدأ والأكاسيد القوية باستعمال المعالجة الحامضية.

3. تغطية السطوح موضع القصدرة بمساعدات الصهر.

4. أضافة سبيكة القصدرة (مادة الإضافة أو الحشو) يدوياً أو آلياً قبل تسليط الحرارة وفي بعض الأحيان بعدها بحسب التقنية المستعملة، ومن الجدير بالذكر أن الحرارة تسلط على معدن الأساس وليس على سبيكة اللحام.

5. تسليط الحرارة لرفع درجة حرارة معدن الأساس إلى فوق درجة انصهار سبيكة اللحام.
6. انصهار سبيكة اللحام وتغلغلها بين قطع العمل.
7. رفع تسليط الحرارة، وترك القطعة برهة من الزمن لتتجمد سبيكة اللحام وتكوين الملحومة.
8. إزالة معدن القصدرة الزائد، وتنظيف الملحومة من الترسبات الضارة.

2-3-5 أنواع وصلات القصدرة Types of Soldered Joints

في وصلات القصدرة بالسبائك اللينة، تستعمل فقط أنواع وصلات الربط التداخلية لضعف قوة الملحومة، وتتراوح منطقة التداخل ما بين (3-60 mm) بالاعتماد على سمك قطع العمل ونوعية الخدمة. وفي بعض التطبيقات التي لا تتطلب تحميل معين يمكن استعمال الوصلات التراكبية للأجزاء المقصدرة. وفي بعض التطبيقات تسند الوصلات المراد قصدرتها بوسائل ميكانيكية مختلفة مثل البراغي أو البراشيم وغيرها، فضلاً على ثني وتداخل حافات الصفائح كما هو في الدسرة، لاحظ شكل (5-5) الذي يوضح بعض أهم أنواع وصلات القصدرة. ويتم اختيار نوع الوصلة المطلوبة بحسب النقاط الآتية:

1. نوعية الخدمة.
2. تقنية التسخين المستعملة.
3. طريقة تصنيع قطع العمل (هل قطع العمل مصنعة بالسباكة أم بالتشكيل أو بطريقة تصنيعية أخرى؟).
4. عدد الأجزاء المراد قصدرتها.
5. آلية إضافة سبيكة القصدرة.

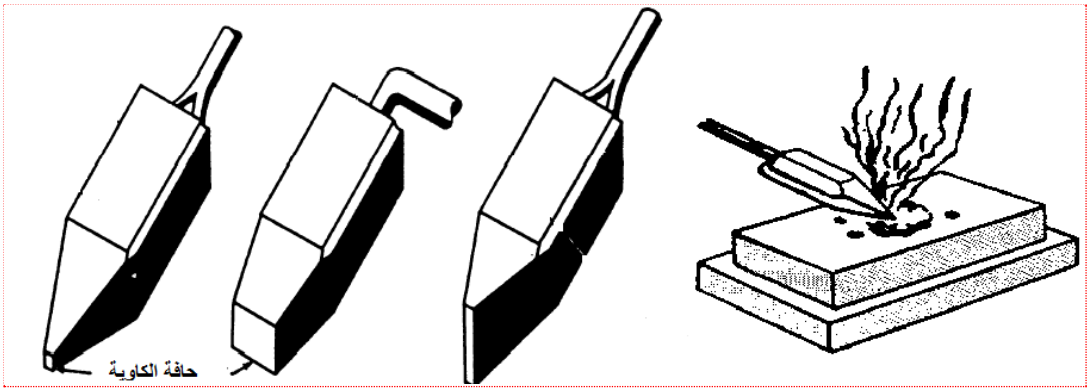
شكل 5-6 الأنواع الشائعة لوصلات القصدرة

3-3-5 طرائق القصدرة Soldering Methods

هنالك طرائق عديدة للحام القصدرة تعتمد على تقنية تسليط الحرارة وشكل وحجم قطع العمل، وهذه الطرائق هي نفسها التي تستخدم في لحام المونة عدا أن كمية الحرارة المسلطة ودرجات الحرارة العاملة يكونان أقل من لحام المونة، ومع ذلك هنالك طرائق خاصة للحام القصدرة سيتم ذكرها في هذه الفقرة والطرائق المشتركة سيتم ذكرها في فقرة لحام المونة.

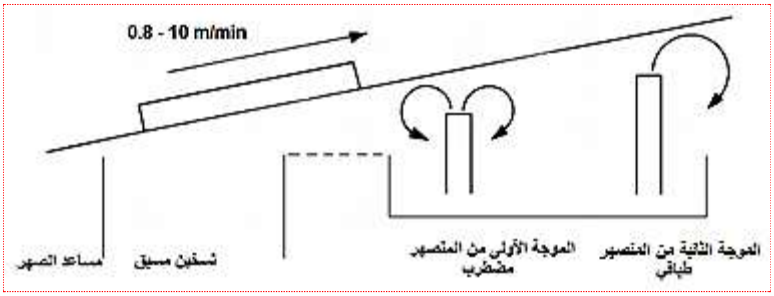
1. كاوية القصدرة: هي التي تصنع حافتها من النحاس وبأشكال مختلفة، وظيفتها تزويد الحرارة إلى القطع المراد قصدرتها، وصهر سبيكة اللحام، وتغلغل المنصهر بين قطع العمل، وسحب السبيكة المنصهرة الزائدة من موقع اللحام. تستخدم الكاوية في عمليات القصدرة اليدوية الصغيرة. علماً أن أغلب الكاويات حالياً تستخدم الطاقة الكهربائية لتسخينها، الشكل (5-7) يبين الكاوية الكهربائية، والتي لها قدرات كهربائية مختلفة مثل 40 أو 100 واط وغيرها، هنالك كاويات تسخن باشتعال الوقود تستخدم أحياناً وبتطبيقات معينة مثل سمكرة خزانات الماء المعدنية وغيرها، كما هو موضح في الشكل (5-8).

شكل 5-7 الكاوية الكهربائية وملحقاتها

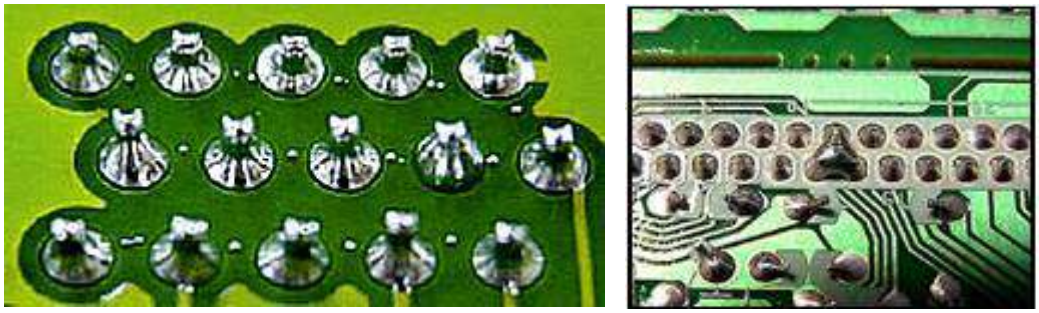


شكل 5-8 بعض أشكال الكاوية اليدوية التي تسخن باحتراق الوقود

2. القصدرة الموجية: هي الطريقة التي تستخدم في لحام المكونات الإلكترونية المثبتة على لوحات الدوائر الإلكترونية المطبوعة (الطبلات) (PCB). حيث يدفع منصهر سبيكة القصدرة من خلال مجرى ضيق من أسفل اللوحة الإلكترونية لربط المكونات الإلكترونية حيث يتصلب المنصهر حين يتوقف جريانه ومن ثم تزال سبيكة القصدرة الزائدة بسهولة عن اللوحة اللدائنية بسبب عدم التصاق السبيكة بها، الشكل (5-9) يوضح مخطط مبسط لطريقة القصدرة بجريان منصهر السبيكة بشكل موجي.



أ- مخطط القصدرة بجريان منصهر سبيكة اللحام الموجي



ب – شكل اللوحة بعد القصدرة

شكل 5-9 لحام القصدرة الموجي

3. القصدرة العجينية: وتسمى في بعض الاحيان القصدرة بالانسياب ولها نوعان إما الانسياب بالبخار وإما بالأشعة تحت الحمراء، وتستخدم هذه الطريقة كما هو في القصدرة الموجية في ربط وتثبيت المكونات الإلكترونية على لوحات الدوائر الإلكترونية، حيث يتم فيها استخدام سبيكة القصدرة مخلوطة مع مساعد الصهر وعامل التندية بحالة عجينية توضع بطريقة آلية في ثقوب مواضع تثبيت المكونات الإلكترونية، ومن بعد ذلك يتم تسليط الحرارة باستخدام الأشعة تحت الحمراء أو بطرائق خاصة لهذا الغرض، الشكل (5-10) يوضح عملية القصدرة العجينية المستخدمة في إنتاج اللوحات الإلكترونية المطبوعة.

شكل 5-10 القصدرة العجينية

4-5 لحام المونة Brazing

إن الوصل بالمونة مشابهة للقصدرة عدا أنه يستخدم سبائك لحام (المادة المضافة) درجة انصهارها أعلى من درجة انصهار سبائك القصدرة، إذ استخدم هذا النوع من الربط قديماً منذ (3000-2000 B.C)، أساس سبائك لحام المونة هي النحاس والفضة ومعادن أخرى ذات درجات انصهار واطئة نسبياً. **ويُعرف لحام المونة** بأنه أحد عمليات الربط المعدني الذي يستخدم فيه مادة مضافة أو تسمى مادة الحشو (سبيكة اللحام) التي تنصهر وتتوزع (تتغلغل) ما بين قطع العمل بفعل الخاصية الشعرية، بعد التبريد تتجمد سبيكة الحشو مكوناً وصلة لحام قوية نوعاً ما، إن درجة انصهار سبائك اللحام أعلى من درجة الحرارة 450°C ولكنها أقل من درجة انصهار المعدن الأساس، ولكون معدن الأساس لا ينصهر فإن العيوب التقليدية مثل الاجهادات الداخلية وعيوب الاعوجاج فضلاً على المنطقة المتأثرة باللحام والتي تظهر في اللحام الانصهاري لا تظهر في لحام المونة، وهذا ما يميز هذا النوع من الربط.

الخلوص بين الاسطح المتقابلة لقطع العمل من المتغيرات المهمة لكونه يؤثر مباشرة على قوة الملحومات، إذ كلما كان الخلوص صغيراً زادت قوى تحمل إجهادات القص للملحومات وكذلك هنالك خلوص مثالي، أي: سماحات (المسافات البينية) معينة بذاتها بحسب سمك قطع العمل ونوع المعدن للحصول على أعظم تحمل لإجهادات الشد للملحومات المنتجة بهذه الطريقة. تتراوح هذه المسافات ما بين (0.025-0.2 mm)، ولكون الخلوص صغيراً جداً فإن للشد السطحي للاسطح المتقابلة أهمية لا تقل عن أهمية وتأثير الخلوص. كما في الشكل (5-5)

مميزات لحام المونة عن اللحام الانصهاري هي كالآتي:

- إمكانية لحام جميع المعادن وحتى لحام المعادن المختلفة.
- في بعض تقنياتها يكون الإنتاج بهذه التقنيات سريعة جداً وسهلة الأتمتة.
- إمكانية إجراء أكثر من وصل بآنٍ واحد.
- إمكانية لحام المقاطع الدقيقة التي لا يمكن لحامها باللحام الانصهاري.
- كلفة أقل بسبب استهلاك طاقة أقل.
- مشاكل وعيوب المنطقة المتأثرة باللحام قليلة مقارنة باللحام الانصهاري.
- بسبب الخاصية الشعرية المميزة للحام المونة، يمكن لحام قطع باشكال معقدة لا يمكن لحامها بطرائق أخرى.

أما محددات وعيوب هذه الطريقة من اللحام فهي كالآتي:

- قوة الملحومات أضعف نسبياً.
- بالرغم من أن الملحومة أقوى من قوة سبائك اللحام ولكنها تبقى أقل من قوة المعدن الأساس.
- الخدمة بدرجات الحرارة العالية قد يؤدي إلى ضعف قوة الملحومة.
- لون منطقة الربط قد لا ينسجم مع لون المعدن الأساس.

هنالك عدد من سبائك اللحام (المواد المضافة) متوفرة بمدى من درجات الحرارة العاملة في لحام المونة وبمختلف الأشكال مثل الأسلاك، الشرائط، الصفائح، الحلقات، اجزاء مسبقة التشكيل، معاجين، مساحيق. إن سبائك لحام المونة تختلف عن معدن الأساس دائماً وليس كما هو معمول به في طرائق اللحام الانصهاري. ومع هذا فإن الاختيار المناسب لسبيكة اللحام وتوافقها مع المعدن الأساس مهم جداً لتفادي ظاهرة التقصف للملحومة بسبب تكون المركبات شبه المعدنية في منطقة الربط (منطقة اللحام) وتفادي ظاهرة التآكل التي قد تحدث مستقبلاً بسبب التفاعل التآكلي ما بين معدن الأساس ومعدن الإضافة. ومن الجدير بالذكر أن الخواص الميكانيكية والخواص المعدنية (Metallurgical) في منطقة الربط قد تتغير في أثناء الخدمة بسبب حدوث ظاهرة الانتشار في أثناء عملية لحام المونة. ولهذا يميز هذا النوع من اللحام من لحام القصدرة بأنه عملية ربط كيميائية فضلاً على الربط الفيزيائي (الميكانيكي) الذي يميز لحام القصدرة. الجدول (5-2) يوضح بعض أهم سبائك لحام المونة المتوافقة مع معدن الأساس ودرجات الحرارة العاملة.

جدول 5-2 سبائك المواد المضافة في لحام المونة مع معادن وسبائك مختلفة

المعدن الأساس	معدن الإضافة	درجة حرارة اللحام (°C)
الألمُنيوم وسبائكه	Al-Si	570-620
سبائك المغنسيوم	Mg-Al	580-625
النحاس وسبائكه	Cu-P	700-925
السبائك الحديدية وغير الحديدية عدا الألمُنيوم والمغنسيوم	سبائك Cu-Ag سبائك Cu-P	620-1150
فولاذ مقاوم للتآكل وسبائك النيكل والكوبلت	Ni-Ag	925-1200
سبائك نيكل - نحاس	Cu	1100-1200
سبائك التيتانيوم، النيكل، المونيل، إنكونيل، فولاذ العُدد	Ag-Cu Ag-Zn	700-750

يُعد **استخدام مساعدات الصهر** في لحام المونة من الأمور المهمة لتفادي الأكسدة وإزالة طبقة الأكسدة الرقيقة من على سطح قطع العمل المراد وصلها بالمونة. وتتكون مساعدات الصهر بصورة عامة من البوراكس، وحامض البوريك، أملاح البوريك، الكلوريدات، الفلوريدات، مضاف لها عوامل (مواد) تساعد على التندية (الترطيب بمنصهر سبيكة اللحام). وتتوفر مساعدات الصهر على شكل معاجين، محاليل، أو مساحيق. الخصائص الجيدة لمساعدات الصهر في لحام المونة هي كالآتي:

- درجة انصهار واطئة.
- لزوجة واطئة ليحل محلها منصهر معدن الإضافة (سبيكة اللحام) بسهولة.
- تساعد في عملية التندية.
- تحمي الوصلة من الأكسدة لحين تجمد معدن الإضافة.
- يجب أن يكون مساعد الصهر سهل الإزالة بعد إكمال اللحام.

في بعض الأحيان يمكن التخلي عن استعمال مساعد الصهر وذلك باستخدام عملية لحام المونة بالفراغ أو بالجو غير المؤكسد.

1-4-5 آلية لحام المونة Brazing Mechanism

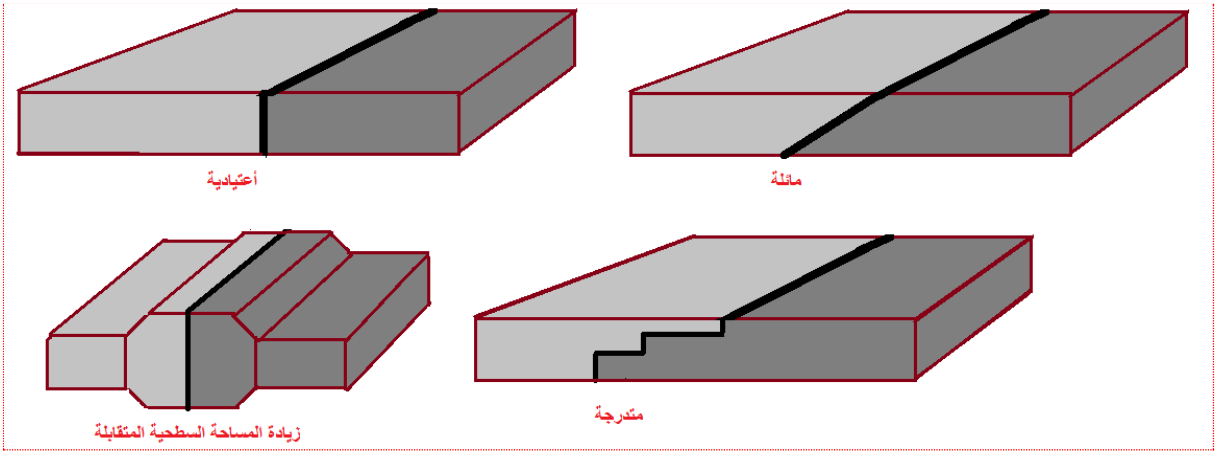
من المتطلبات الضرورية لنجاح لحام المونة حدوث ظاهرة التندية (الترطيب) Wetting للأسطح المتقابلة في منطقة اللحام من قبل منصهر سبيكة اللحام (مادة الإضافة)، يليه انتشار وتغلغل المنصهر إلى داخل الخلوص بين قطع العمل ولعمق معين، وحدوث ترابط ذري ما بين منصهر سبيكة اللحام ومعدن الأساس بسبب الانتشار على امتداد السطوح الفاصلة بينها، كما تحدث في بعض الأحيان عملية تسبيك Alloying نتيجة الانتشار أي دخول ذرات معدن الإضافة (مثل ذرات النحاس, الزنك، القصدير، وغيرها) إلى معدن الأساس وبالعكس، علاوة على ما ذكر يحدث انتشار ذرات معدن اللحام على امتداد الحدود البلورية للمعدن الأساس. إن حدوث العمليات السالفة الذكر تؤدي إلى تحسين قوة الملحومات المنتجة بهذه الطريقة.

الخطوات المتبعة في لحام المونة اليدوي هي كالآتي:

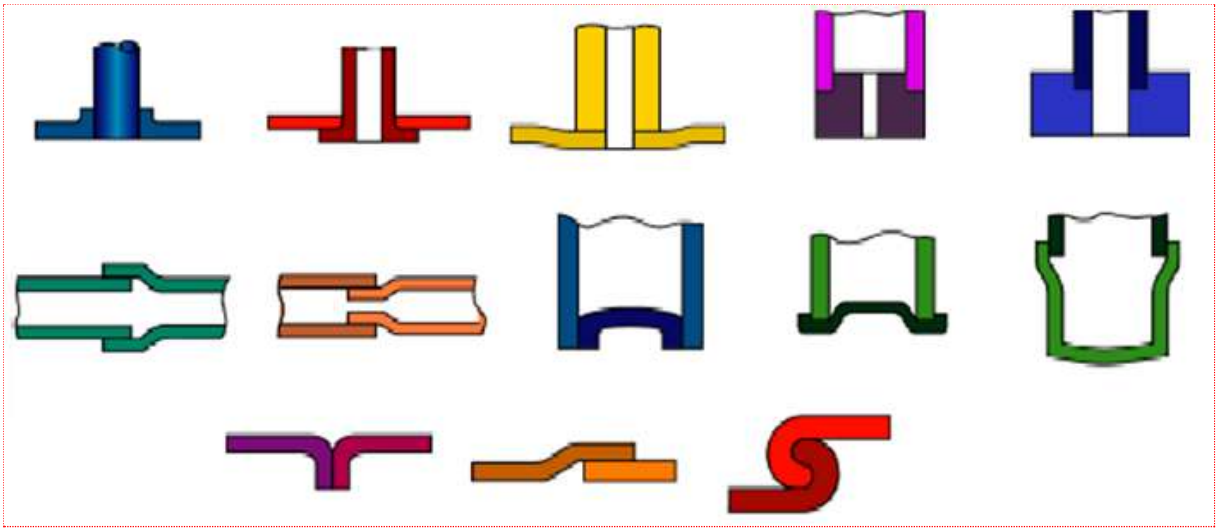
1. تهيئة الحافات: وهي مشابهة لما يجري في اللحام الغازي فالوصلات التي يقل سمكها عن (2 mm) يمكن لحامها من دون تشطيب، وأما ما زاد عن ذلك السمك فتهيأ بشكل حرف V أحادي أو ثنائي بزاوية 90 إلى 120 درجة وذلك لزيادة مساحة الترابط بين معدن الأساس ومعدن الإضافة.
2. تنظيف السطوح: يجب تنظيف السطوح جيداً من الأكاسيد والزيوت والشحوم والأوساخ، وغيرها من الشوائب التي تمنع حصول الوصل، ويستخدم لذلك التنظيف الميكانيكي (فرشة فولاذية أو أوراق تنعيم) أو يستخدم التنظيف الكيميائي (محاليل منظفة). ولتنظيف حديد الزهر يستعمل حمام ملحي.
3. تثبيت الأجزاء المراد لحامها في مواقعها.
4. التسخين الأولي: تسخن أجزاء وصلة اللحام إلى درجات حرارية تصل ما بين (425-480°C)، وذللك لمنع التشقق بسب الإجهادات الحرارية, وخاصة عند لحام حديد الزهر, كذلك لخفض كل من كمية الحرارة والزمن اللازمين للحام. وتعتمد درجة حرارة التسخين الأولي على كتلة أجزاء اللحام.
5. عند استخدام المشعل الغازي لتوليد الحرارة ينظم اللهب بحيث يكون لهباً مؤكسداً عند لحام حديد الزهر ومتعادلاً عند لحام الفولاذ.
6. إضافة مساعد الصهر بحسب التقنية المستخدمة.
7. إجراء عملية اللحام بعد أن تصل درجة الحرارة إلى الدرجة المطلوبة للحام.
8. ترك القطعة لتبرد وتتجمد سبيكة الإضافة.

2-4-5 أنواع وصلات لحام المونة Brazing Joints Types

الوصلات شائعة الأستخدام هي الوصلات التراكبية والتناكبية (Lap & Butt)، ومع هذا فإن الوصلات المذكورة ترتب بشكل معين لغرض إجراء لحام المونة عليها. إن الوصلات التناكبية التقليدية المهيئة للحام المونة سوف تكون ذات تحمل إجهادات شد قليلة، بسبب محدودية مساحة لحام المونة، لذا يُعمل على تغيير بسيط في شكل الوصلة لغرض زيادة المساحة للاسطح المتقابلة المراد وصلها بالمونة، كما هو موضح في الشكل (5-11). الوصلات التراكبية تستخدم بكثرة كونها مناسبة للحام المونة وتوفر مساحة سطحية تداخلية كبيرة نسبياً، وعادة تكون مسافة التراكب بحدود ثلاث مرات سمك قطعة العمل الأقل سمكاً، والشكل (5-12) يبين بعض هذه الوصلات المستعملة.



شكل 5-11 وصلات تناكبية تقليدية ومُحرَفة



شكل 5-12 وصلات مختلفة للحام المونة

3-4-5 طرائق لحام المونة Brazing Methods

هنالك طرائق عديدة للحام المونة تعتمد على تقنية تسليط الحرارة وشكل وحجم قطع العمل، وهذه الطرائق هي نفسها التي تستخدم في لحام القصدرة عدا أن كمية الحرارة المسلطة ودرجات الحرارة العاملة يكونان أعلى من لحام القصدرة. قد تستعمل بعض المثبتات (Fixture) الخاصة لحمل وتثبيت قطع العمل معاً في أثناء عملية اللحام.

وأهم هذه الطرائق هي كالآتي:

1. المشعل: يستخدم المشعل الغازي في الوصل بالمونة لبعض الوصلات ولكن باستخدام شعلة صغيرة لتوليد حرارة واطئة نسبياً عما في اللحام الغازي، تسلط الشعلة على قطع العمل، ما يؤدي إلى رفع درجة حرارتها وتصهر سبيكة اللحام المضافة إلى موضع الربط . الغازات المستعملة سبق أن تم ذكرها في موضوعات سابقة، أغلب تطبيقات لحام المونة بالمشعل الغازي تكون يدوية والتي تحتاج إلى مهارة للسيطرة على الشعلة اللازمة لتوليد الحرارة المطلوبة لإتمام عملية الوصل بجودة عالية.

2. الفرن: تستخدم الأفران لتوليد الحرارة اللازمة للحام المونة، وهي ملائمة للإنتاج المتوسط والعالي من الوصلات الملحومة بتلك الطريقة. والسيطرة على درجات الحرارة وعلى الهواء من الضروريات المطلوبة لإنتاج وصلات جيدة، أما الهواء فيجب أن يكون متعادلاً أو مختزلاً، في بعض الأحيان تستخدم الأفران التي تعمل بالإخواء (تفريغ الهواء) في حالة التطبيقات الخاصة لبعض المعادن سريعة التأكسد وبدون مساعد صهر.

3. لحام المونة بالحث: في هذه الطريقة تتولد الحرارة اللازمة للحام بالمونة من مقاومة كهربائية لتيار بتردد عالٍ جداً. قطع العمل مع سبيكة القصدرة تجهز مسبقاً وتوضع في مجال الحث الكهربائي بدون الاتصال المباشر، الترددات المستخدمة تتراوح مابين (5 kHz – 5 MHz)، الترددات العالية تستخدم مع القصدرة السطحية أما الترددات الواطئة فتستخدم للحام المونة العميق. الطريقة مناسبة على حدٍ سواء للإنتاج بمعدلات واطئة أو عالية.

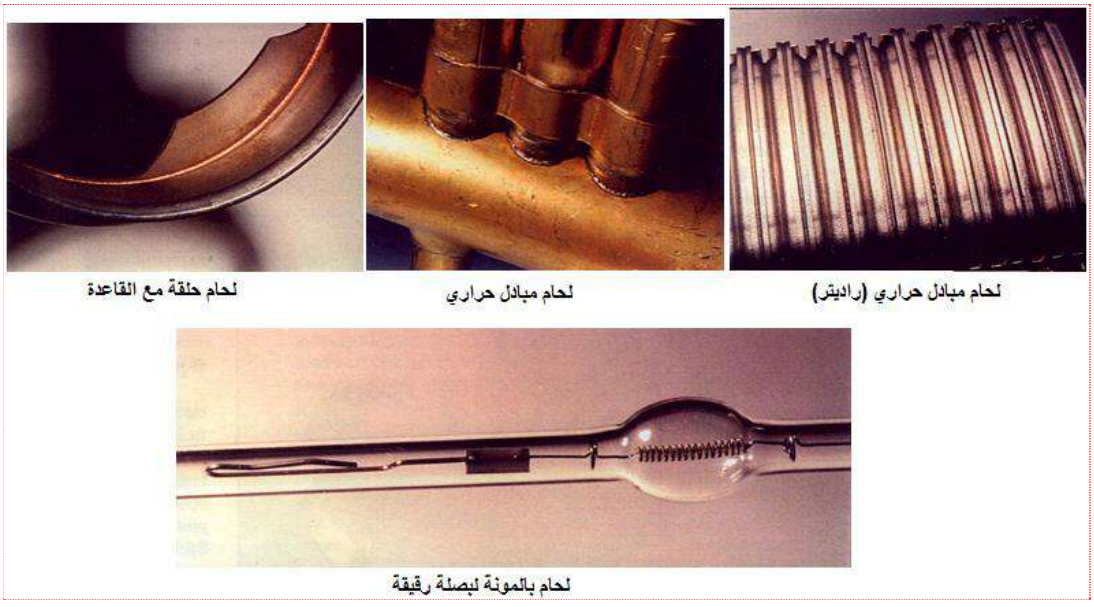
4. المقاومة الكهربائية: تتولد الحرارة اللازمة للحام المونة من مرور التيار الكهربائي عبر مقاومة المعدن الأساس نفسه أي قطع العمل ضمن الاتصال المباشر للدائرة الكهربائية، وهذا ما يميزها من الطريقة السابقة (الحث). ومُعداتها مشابهه لمعُدات لحام المقاومة الكهربائية عدا استخدام طاقة كهربائية واطئة نسبياً. الأجزاء المراد وصلها بالمونة مع سبيكة اللحام توضع مسبقاً بين أقطاب الماكنة ومن ثم يتم تسليط الضغط والتيار الكهربائي.

5. التغطيس: في طريقة التغطيس هنالك نوعان من المنصهر في حوض التغطيس، إما أن يكون المنصهر يحوي فقط مساعد الصهر وإما يكون المنصهر هو سبيكة اللحام، وفي كلتا الحالتين مجمع الأجزاء يغطس في حوض التغطيس. التصلب لسبيكة اللحام يحدث بعد إخراج المجموعة من حوض التغطيس.

6. الاشعة تحت الحمراء: هذه الطريقة تستخدم أشعة تحت الحمراء مركزة تركيزاً عالياً، بعضها له القدرة على توليد حرارة تصل إلى 5000 W والتي تسلط مباشرة إلى قطع العمل، تُعد هذه الطريقة بطيئة نسبياً مقارنة مع الطرائق المذكورة أعلاه وينحسر استخدامها للمقاطع الرقيقة.

4-4-5 تطبيقات لحام المونة Brazing Applications

يستخدم لحام المونة بدلاً من اللحام الغازي في وصل الأنابيب النحاسية التي تنقل الموائع المختلفة تحت ضغوط عالية في بعض الأحيان، وفي صناعة الاثاث المعدني وإنتاج هياكل وأنابيب العادم في المركبات والدراجات بشتى أنواعها والأجهزة المنزلية من ثلاجات ومكيفات هواء وغيرها، فضلاً على العديد من الأدوات المنزلية. كما يستخدم بشكل رئيس في أعمال الصيانة والإدامة وخاصة في الاجزاء المصنعة من حديد الزهر والفولاذ. عناصر المحركات التوربينية مثل الأرياش التوربينية توصل بالمونة بمقاطع رقيقة وفي مثل هذه الحالات يكون اللحام بالفراغ أو بأجواء متعادلة غير مؤكسدة للحصول على جودة عالية للحام وعدم تأثر الأجزاء الملحومة بأي مشاكل لها علاقة باللحام والتي تؤثر مستقبلاً على العمر التشغيلي لهذه المحركات. الشكل (5-13) يوضح بعض تطبيقات لحام المونة.



شكل 5-13 بعض تطبيقات لحام المونة

5-5 الربط باللصق Adhesive Bonding

عناصر ومنتجات كثيرة جداً يمكن تجميعها بوساطة اللصق بدلاً من استخدام أي نوع من الأنواع المعروفة في عمليات الربط والتجميع. وهذه الطريقة شائعة الاستخدام في الربط والتجميع والتغليف كما هو في الكتب، المغلفات (الكارتونية وغيرها)، الأثاث المنزلي، السجاد، الأخشاب نوع (Plywood)، وقد بدأ استخدام هذه الطريقة بكثرة منذ تاريخ 1905 وفي زيادة مطردة بالاستخدام بالوقت الحاضر، ومع هذا فإن هذه الطريقة قد تكون الطريقة الأولى الذي استخدمها الإنسان القديم في ربط حاجياته البسيطة. صناعات كبيرة تستخدم في الوقت الحاضر بشدة طريقة الربط باللصق مثل إنتاج مُعدات الفضاء الخارجي، المركبات، الأجهزة الكهربائية، منتجات الأبنية الإنشائية، وسائل الكبح (الموقفات) في المركبات، أرياش المروحيات، هياكل الطائرات، ومُعدات السيطرة، وغيرها من التطبيقات.

لا يعدَ بعض المختصين هذا النوع من أحد أنواع اللحام، ويُشاع تسميته في العراق باللحام البارد وهي تسمية خاطئة علمياً، على الرغم من عدم تجهيز الحرارة خارجياً لإتمام العملية إلا أن الحرارة تتولد نتيجة تفاعل مواد الحشو والمواد الأساس (قطع العمل). أما مواد اللصق (Adhesive) فهي مواد غير معدنية تكون عادةً من اللدائن وتحتاج العملية إلى وقت إنضاج مناسب يختلف بحسب آلية عملية الإنضاج.

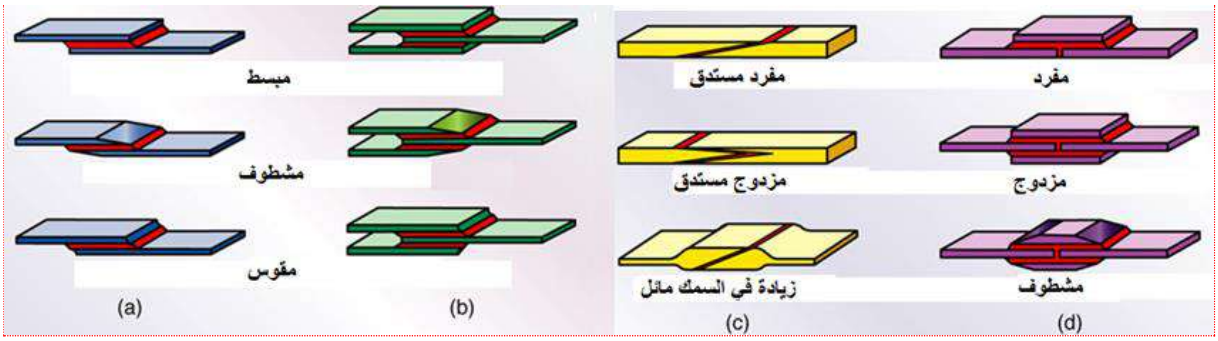
تعتمد قوة الملصوقة على نوع المادة اللاصقة وشكل وصلة الربط، إذ إن هنالك أشكالاً مختلفة للمفاصل تستعمل مع هذه الطريقة لها علاقة بشكل قطعة العمل ووظيفتها، وفي بعض الأحيان تستعمل هذه الطريقة مزدوجة مع طرائق ربط أخرى لزيادة قوة المفاصل. تتوفر من مواد اللصق التجارية بأعداد كثيرة وتصنف إلى ثلاث فئات وهي كالآتي:

- مواد اللصق الطبيعية (Natural Adhesives)، مصادر هذه المواد طبيعية (نباتية وحيوانية)، مثل الصمغ المستخلص من النشا والذي يسمى (dextrin)، مسحوق الصويا، وغيرها. وهذه المواد يحدد استخدامها في التطبيقات التي لا تتحمل إجهادات عالية مثل الورق المقوى، الأثاث، تغليف الكتب، الأخشاب.
- مواد اللصق غير العضوية (In Organic Adhesives)، أساساً هي سيليكات الصوديوم وكلوريدات المغنيسيوم، وهي ذات أسعار منخفضة وقوة منخفضة أيضاً، ولهذا لها محددات لتطبيقها في المفاصل الهيكلية.
- المواد اللاصقة العضوية الاصطناعية (Synthetic Organic Adhesives)، وهي من أهم فئات مواد اللصق في الصناعة وتتضمن اللدائن المختلفة الأنواع وبآليات إنضاج مختلفة.

ولأهمية النوع الأخير (المواد اللاصقة العضوية الاصطناعية) بسبب قوة تحملها العالي لمختلف أنواع الإجهادات سوف يتم تقديم أنواعها بالتفصيل وبتصنيف آلية عملها وهي كالآتي:

1. التفاعل الكيميائي: والأنواع التي تعمل بهذا النوع هي بوليي- ورثين، سليكون، إيبوكسي، الآركيلك المحسن، فينوليكس، وغيرها.
2. التحسس بالضغط: كما هو في المطاط الطبيعي، والمطاط الاصطناعي، وغيرها.
3. الانصهار الحار: وهي من النوع اللدائن الحرارية (Thermoplastic) مثل بوليستر.
4. التبخير أو الانتشار: تتضمن آكريلكس، فينولكس، وغيرها.
5. الأغشية والشرائح: مثل النايلون.
6. الموصلات الكهربائية والحرارية: مثل سليكون، الإيبوكسي، وغيرها.

في بعض الأنواع المذكورة أعلاه تكون قوة الربط ليست بالمستوى المطلوب؛ لذا يلزم تصميم المفاصل بشكل صحيح لكي تحسن من قوة التحمل. وهنالك العديد من أنواع المفاصل الشائعة التي تستخدم مع الربط باللصق، ومع هذا في بعض الأحيان تستخدم الوسائل الميكانيكية مثل البراغي والبراشيم مع اللواصق لزيادة تحمل المفاصل للإجهادات المختلفة. الشكل (5-14) يوضح بعض أهم تلك المفاصل.



شكل 5-14 بعض أنواع المفاصل بالربط باللصق، (a) تداخل مفرد، (b) تداخل مزدوج، (c) وصلة تناكبية امتدادية، (d) وصلة طوقية

1-5-5 تقنية تطبيق الربط باللصق Adhesive Application Technology

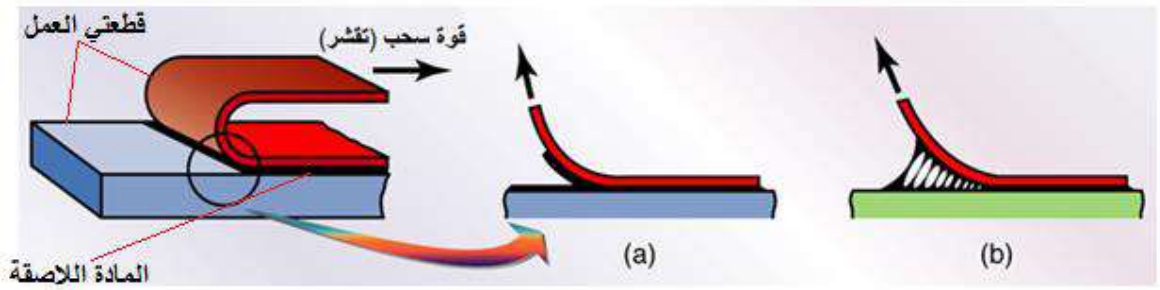
هنالك متطلبات تقنية عند العمل بهذا النوع من الربط وهي:

❖ تحضير السطح: لإنجاح عملية الربط باللصق تتطلب العملية تنظيف السطح بشكل جيد وعميق قوة المنتج تعتمد على درجة التنظيف، وهنالك عدة تطبيقات يمكن إجراءها لغرض تنظيف الأسطح مثل استخدام الوسائل الميكانيكية مع مواد نسيجية ومواد لزجة أو العصف الرملي أو بوساطة المحاليل، وهذه جميعها تعتمد على نوع مادة الأساس ونوع المادة اللاصقة، فضلاً على نوعية الوصلة.

❖ طرائق التطبيق: هنالك العديد من طرائق إضافة المادة اللاصقة على أحد أسطح الوصلة أو على جميع السطوح وحسب التطبيق المطلوب، من هذه الطرائق هي:

1. بالفرشاة: غالباً ما تنجز يدوياً.
2. بالتدفق: باستعمال ضغط معين من قاذفة خاصة للمادة اللاصقة.
3. درافيل يدوية: مشابه لدرافيل الأصباغ.
4. غربال سلكي: للصق مناطق محددة مسبقاً وليس جميع السطح.
5. بالرش: باستخدام قاذفة خاصة لرش المادة اللاصقة على السطح.
6. منفذ آلي (Nozzle): تستخدم في حالات الإنتاج بمعدلات عالية.

قوة الربط (اللصق) متباينة بحسب نوعية المادة اللاصقة وطريقة تهيئة السطوح، فضلاً على ظروف الإنضاج (Curing)، وهنالك فحوصات يمكن بها التعرف على قوة تحمل المنتجات المستخدم فيها طريق الربط باللصق. ومن هذه الفحوصات هو فحص التقشر (Peeling Test) الموضح تخطيطه في الشكل (5-15).



الشكل 5-15 مخطط لفحص التقشر، (a) لاصق قصف، (b) لاصق متين

5-5-2 مزايا ومحددات الربط باللصق Adhesive Bonding Advantages & Limitations

ميزات عملية الربط باللصق هي: (1) يمكن استعمالها لجميع المواد تقريباً، (2) تستعمل مع مختلف المقاطع الكبيرة والصغيرة على حدٍ سواء وحتى مع الأجزاء الهشة، (3) يمكن لصق جميع مساحة الوصلة وليس على نقاط أو خطوط معينة كما هو في اللحام الانصهاري، (4) بعض المواد اللاصقة مرنة ويمكنها أن تتحمل الإجهادات الدورية والحرارية، (5) درجات حرارة واطئة للإنضاج مما يؤدي إلى عدم حدوث تشوهات كما يحدث في باقي أنواع اللحام المختلفة، (6) تستخدم كمادة تغليف ولصق في آنٍ واحد، (7) سهولة تصميم أي وصلة.

أما محددات هذه الطريقة بالربط فتتضمن: (1) قوة المفاصل ليست بمستوى مفاصل اللحام الأخرى، (2) يجب أن تكون المادة اللاصقة متوافقة مع مادة الأساس، (3) درجات الحرارة في أثناء الخدمة محدودة، (4) تتطلب العملية تنظيفاً عالياً وتهيئة مسبقة للأسطح، (5) مدة الإنضاج اللازمة تؤثر على معدل الإنتاجية، (6) صعوبة فحص المنتجات وتفتيشها.

أسئلة الفصل الخامس

س1) أملأ الفراغات التالية بما يناسبها:

1. يستخدم لحاما القصدرة والمونة إذا كان تصميم قطعة العمل لا يسمح بلحامهما بوساطة لحامي ..... أو ..... .
2. يختلف لحاما القصدرة والمونة عن لحام الانصهار بـ ..... .
3. آلية حدوث اللحام في لحامي القصدرة والمونة تحدث على وفق مبدأ ..... ومن أهم الشروط اللازم توافرها لإنجاح عملية اللحام حدوث ظاهرة ..... .
4. لحام القصدرة هو لحام يتم فيه إضافة سبائك لا تتجاوز درجة انصهارها ..... وإذا زادت درجة انصهار سبائك اللحام يُعد هذا النوع بلحام ..... .
5. تقسم طرائق لحام القصدرة بناءً على نوع سبيكة اللحام إلى نوعين رئيسين هما ..... و .....
6. يستعمل لحام القصدرة في ربط القطع شريطة عدم تعرض الملحومات لـ ..... .
7. تستخدم القصدرة ..... في لحام المكونات الإلكترونية.
8. قد تتغير الخواص الميكانيكية والمعدنية في منطقة الربط في لحام المونة بسبب حدوث ظاهرة ..... في أثناء عملية اللحام.
9. أهم الوصلات شائعة الاستخدام في لحام المونة هي الوصلات ..... و .....
10. تعتمد قوة الملصوقة على ..... و .....

س2) قارن بين لحامي القصدرة والمونة مع ذكر مميزات ومحددات كل منهما.

س3) عدد أطوار عملية لحامي القصدرة والمونة.

س4) عرف مساعدات الصهر في عملية القصدرة، وما هي فوائدها وأنواعها الشائعة.

س5) ما هو الخلوص؟ وما هو تأثيره على جودة اللحام؟

س6) ينزاح مساعد الصهر على الأطراف أسرع من إزاحته في وسط سبيكة اللحام المنصهرة، علل ذلك.

س7) وضح آلية عملية القصدرة وبالخطوات.

س8) بماذا يتميز لحام المونة من اللحام الانصهاري.

س9) عدد الخطوات المتبعة في لحام المونة اليدوي.

س10) صنف أهم فئات مواد اللصق التجارية.

س11) اذكر مميزات ومحددات عملية الربط باللصق.

الفصل

السادس

لحام الحالة الصلبة

Solid State Welding

الأهداف

الهدف العام:

في هذا الفصل سيتعرف الطالب على طرائق اللحام الخاصة بالحالة الصلبة أنواعها, استخداماتها, المكائن والأجهزة الحديثة المستخدمة, نوع المعادن المستخدمة في هذا اللحام.

الأهداف الخاصة في نهاية هذا الفصل سيكون الطالب قد تعرف على الآتي:

1. لحام الحالة الصلبة وأهم مميزاته ومحدداته.
2. تصنيف طرائق لحام الحالة الصلبة وتقنيات كل طريقة منها.
3. مجموعة طرائق لحام الحالة الصلبة بالتشوه اللدن ومميزات كل نوع ومحدداته واستخداماته.
4. اللحام بالضغط البارد، ميزاته ، استخداماته.
5. اللحام الانفجاري: آلية عمل هذا النوع, أهميته, واستخداماته.
6. اللحام بالموجات فوق الصوتية: معرفة هذا النوع من اللحام, آلية عمل هذا النوع من اللحام, محددات ومميزات هذا النوع.
7. مجموعة طرائق لحام الحالة الصلبة بالانتشار ومميزات كل نوع ومحدداته واستخداماته.
8. استخدامات وميزات لحام الحدادة، لحام الدرافيل الحار، لحام الضغط الحار.
9. لحام الاحتكاكي، ميزاته، أنواعه، استخداماته، لحام الاحتكاك والخلط ميزاته.

لحام الحالة الصلبة Solid State Welding

1-6 مقدمة Introduction

لحام الحالة الصلبة هو مجموعة من عمليات اللحام التي يتم فيها عملية الربط بدرجة حرارة أوطأ من درجة حرارة انصهار قطع العمل، وبدون إضافة أي بدون مادة الحشو، وتتضمن هذه المجموعة طرائق عديدة. يشار إلى هذه المجموعة في بعض المصادر بشكل غير علمي (**بعمليات ربط الحالة الصلبة**) دون ذكر مصطلح **اللحام**، وهذا غير صحيح بسبب التغيرات الميتالورجية الواضحة في منطقة اللحام لقطع العمل. **الزمن**، **درجة الحرارة**، **الضغط**، هي المتغيرات المهمة في جميع طرائق اللحام بالحالة الصلبة قد يكون تأثيرها منفرداً أو مجتمعاً للحصول على عملية اللحام وبدون انصهار حقيقي لمعدن الأساس لقطع العمل.

لحام الحالة الصلبة يتضمن طرائق قديمة جداً استخدمت في عمليات اللحام مثل لحام الحدادة، وهنالك طرائق أخرى حديثة جداً مثل لحام الاحتكاك والمزج بالحركة الذي تم استخدامه في نهاية القرن العشرين. في هذا الفصل سيتم توضيح الطرائق المهمة لمجموعة لحام الحالة الصلبة وكيفية تصنيفها بشكل علمي مدروس وبحسب آلية الوصول لعملية اللحام، وهما لحام الحالة الصلبة بالانتشار ولحام الحالة الصلبة بالتشوه اللدن، يرمز إلى لحام الحالة الصلبة بـ (SSW).

2-6 نظرة عامة في لحام الحالة الصلبة General Consideration in Solid State Welding

تنجز عملية اللحام بالحالة الصلبة بدون انصهار المناطق المتداخلة المراد لحامها لقطعتي العمل كما تم ذكره سابقاً، ويتم ذلك إما بتسليط ضغط فقط أو ضغط مع حرارة. إن كمية الحرارة المسلطة إن زودت لوحدها لن تكون كافية لإنجاز عملية اللحام دون الضغط، أي بعبارة أخرى أن الحرارة المزودة لن ترفع درجات الحرارة إلى درجات انصهار قطع العمل المراد لحامها (**لا وجود لطور السائل**)، إنما فقط لإتمام عملية اللحام بالضغط وبجودة عالية وكلٌّ حسب التقنية المستعملة ونوع المعدن المستعمل، في بعض التطبيقات الخاصة من هذه المجموعة قد يكون هنالك انصهار جزئي ضيق ومحدود. المنطقة المتأثرة باللحام Heat Affected Zone (HAZ) لا وجود لها في لحام الحالة الصلبة لعدم وجود انصهار لقطع العمل، وهذه حالة إيجابية تمتاز بها هذه المجموعة من اللحام الانصهاري، لأن المنطقة المتأثرة بحرارة اللحام تؤثر بشكل سلبي على الخواص الميكانيكية والخواص الأخرى للملحومة (Weldment) وبالتالي ستؤثر على جودة اللحام نفسه.

يُعد زمن عملية اللحام في بعض طرائق اللحام بالحالة الصلبة عاملاً مهماً إضافةً إلى الضغط ودرجة الحرارة، علماً أن في بعض طرائق المجموعة يكون الزمن قصيراً جداً (أجزاء من ملي ثانية لحد بعض ثوانٍ)، وفي تطبيقات أخرى يكون الزمن طويلاً جداً يصل إلى عدد من الساعات، وفي الحقيقة كلما زادت درجة حرارة عملية اللحام قصر زمن عملية اللحام، لأن درجات الحرارة العالية تزيد من طاقة التهيج للذرات عند سطح التقابل.

يتكون في معظم طرائق اللحام بالحالة الصلبة ارتباط ميتالورجي (معدني) من نوع معين بين ذرات المعدن الأساس لقطع العمل في منطقة التداخل للمعادن المتشابهة أو غير المتشابهة، ولهذا يجب أن يكون هنالك تماس حقيقي بين قطع العمل لتتكون قوى تماسك جذب ذري تجذب الذرات بعضها مع بعض، وهذا التماس الحقيقي لا يحصل بالحالة الطبيعية الفيزيائية بسبب وجود طبقة غشائية على سطح كل من قطع العمل قد تكون هذه الطبقة عبارة عن طبقة غازية أو طبقة زيت أو طبقة كيميائية مثل الأكاسيد أو ما شابه، وبسبب هذه الطبقة لا يحدث الارتباط المعدني الجيد والمطلوب. ومن الجدير بالذكر، أن في اللحام الانصهاري وحتى في لحام القصدرة والمونة على أقل تقدير، تتحلل هذه المواد الغريبة الموجودة على السطح أو تحترق بفعل درجات الحرارة العالية. إن الطبقة الغشائية والمواد الغريبة يجب أن تزال وتكون الأسطح المتقابلة نظيفة وخالية من أية شوائب وقبل البدء بعملية لحام الحالة الصلبة، وعملية إزالة الشوائب والطبقة الغشائية من على الأسطح تتم بوسائل عديدة. إن معيار نجاح عملية اللحام بالحالة الصلبة يكمن في نظافة أسطح قطع العمل وبشكل دقيق جداً.

6-2-1 مميزات ومحددات لحام الحالة الصلبة

Advantages & Disadvantages of Solid State Welding

مميزات لحام الحالة الصلبة هي كالآتي:

1. لا تتكون المنطقة المتأثرة باللحام (HAZ)، ولهذا ستحافظ المنطقة المحيطة باللحام على خواصها الأصلية.
2. يتكون اللحام على طول سطحي تماس قطع العمل وليس فقط في مناطق أو نقاط معينة كما يحدث في طرائق لحام الحالة السائلة.
3. إمكانية لحام المعادن المتشابهة وغير المتشابهة، وبسبب اختلاف معامل التمدد الحراري والموصلية الحرارية والكهربائية واختلاف خواص أخرى للمعادن غير المتشابهة تسبب صعوبة في اللحام بالطرائق الأخرى، وهذا الاختلاف يشكل أهمية ثانوية في لحام الحالة الصلبة.

أما أهم محددات لحام الحالة الصلبة هي احتياجها إلى مُعدات وأجهزة دقيقة ومكائن ثقيلة في بعض التطبيقات وبسبب ذلك ستكون الكلفة عالية نوعاً ما، فضلاً على محدودية استخدامها للقطع الصغيرة جداً في بعض طرائق هذه المجموعة.

3-6 تصنيف طرائق لحام الحالة الصلبة Solid State Methods Classification

تصنف طرائق لحام الحالة الصلبة إلى قسمين رئيسين بحسب آلية حصول عملية اللحام وهما: لحام الحالة الصلبة **بالتشوه اللدن** (Plastic Deformation) ولحام الحالة الصلبة **بالانتشار** (Diffusion). إن الفرق الرئيسي بين القسمين هو تسليط حرارة مع الضغط في طرائق القسم الثاني (اللحام بالانتشار) وعدم تسليطهما غالباً معاً في طرائق اللحام بالتشوه اللدن. لكل قسم من أقسام مجموعة اللحام بالحالة الصلبة طرائقه الخاصة به ويتميز باستعماله مع نوع معين من المعادن أو حالة لحام معينة ولجودة لحام معينة.

في لحام الحالة الصلبة بالتشوه اللدن يجب أن يكون على الأقل أحد المعدنين ذو مطيلية عالية، وبالأحرى يفضل أن يكون جميع قطع العمل مطيلية وخالية من أية إجهادات مسبقة مثل إجهادات التشكيل المسبق لعملية اللحام، لغرض تحقيق التشوه اللدن للبلورات وبأقل ضغط ممكن. أما في لحام الحالة الصلبة بالانتشار فيجب أن ترتفع درجة الحرارة إلى أعلى من نصف درجة انصهار المعدن لقطع العمل لكي تساعد الذرات على الانتشار عبر منطقة التقابل وتحصل عملية اللحام.

4-6 طرائق لحام الحالة ـ الصلبة بالتشوه اللدن

Plastic Deformation Solid-State Welding Methods

تنجز عملية اللحام لهذا النوع بتسليط ضغط عالٍ على الأسطح المتقابلة لقطعتي العمل النظيفة والخالية من أية شوائب، ما يؤدي إلى تشوه موقعي لدن وتداخل للبلورات على سطحي التلامس. سيتم في هذه الفقرة معرفة طرائق لحام الحالة الصلبة بالتشوه اللدن، خصائصها، استعمالاتها، مميزاتها، المعادن الملائمة لكل طريقة. يتضمن هذا النوع من اللحام الطرائق الآتية:

- **لحام الضغط البارد**
- **لحام الانفجاري**
- **اللحام بالموجات فوق الصوتية**

1-4-6 لحام الضغط البارد Cold Welding

إن اللحام البارد أو ما يسمى بلحام الضغط البارد هو أحد طرائق لحام الحالة الصلبة، والذي يستخدم فيه الضغط بدرجة حرارة الغرفة، وبهذه الطريقة يتم الحصول على وصلات لحام بإحداث تشوهات (انفعالات) لدنة كبيرة في سطحي القطعتين المراد وصلهما من دون أي تسخين خارجي لهاتين القطعتين قبل أو في أثناء عملية اللحام. **تتلخص مبدأ الطريقة** في ضغط الأسطح المتقابلة لقطعتي العمل المراد لحامها باستخدام ضغوط خارجية عالية بوساطة قوالب أو درافيل حتى تصبحا في تماس مباشر وتتعرضان إلى قوى قصية كافية لحدوث انزلاق احدهما فوق الآخر وتنتج عنها حرارة بسبب الحركة النسبية للانزلاق والاحتكاك مما يسبب الانتشار والتداخل فيما بينهما وتنتج بذلك وصلة اللحام. ويحدث اتصال تام بين السطحين وترابط متين. ويتعلق مقدار التشوهات اللدنة المراد إحداثها في سطحي الوصلة بكل من خواص المعدن وطريقة إحداث هذه الانفعالات، أي: مقدار الضغط المسلط على سطحي التقابل. **تستخدم هذه الطريقة لوصل المعادن** ذات المطيلية العالية والخالية من أية إجهادات مسبقة. لذا يتم استعمالها للمعادن المطيلية مثل الألمُنيوم والنحاس للحصول على وصلات تراكبية أو تناكبية.

من المتطلبات الضرورية لنجاح اللحام بالطريقة هذه أن يكون هناك تلامس حقيقي بين سطحي المعدنين المتلاصقين، ولكن السطوح المعدنية دائما تكون مغطاة بطبقة رقيقة من الأوكسيد فضلاً على الزيوت والرطوبة والهواء الجوي والمواد الغريبة وهذه المواد كافية لمنع التلامس المعدني الحقيقي بين سطحي قطع العمل، ولهذا تجرى اعتيادياً تنظيف الأسطح بفرشة سلكية معدنية لإزالة الأكاسيد والمواد الغريبة وكذلك بمحاليل معينة لإزالة الزيوت إن وجدت، وتتم عملية التنظيف قبل عملية اللحام مباشرة. إن قوة الضغط الكبيرة المتكونة على السطحين سوف تفتت طبقة الأوكسيد ويصبح التلامس الحقيقي ممكناً في بعض الأحيان حتى لو كان التنظيف ليس بالمستوى المطلوب ومع هذا يحدث اللحام.

تؤدي قوى الضغط المسلطة في عملية اللحام وعلى البارد إلى نقصان سمك قطع العمل بحدود النصف، فضلاً على التشوهات اللدنة الموضعية في أسطح التلامس ويحدث بذلك الاتصال. للقطع الصغيرة يمكن استخدام أدوات بسيطة يدوياً للحصول على الضغط المناسب، كما هو في الشكل (6-1)، أما للقطع الكبيرة فيتم الحصول على الضغط المناسب باستخدام مكابس خاصة؛ لذلك وكما هو في الشكل (6-2). تولد الضغوط المسلطة على أسطح التقابل ارتفاعاً ليس بالعالي بدرجة الحرارة في منطقة التماس.

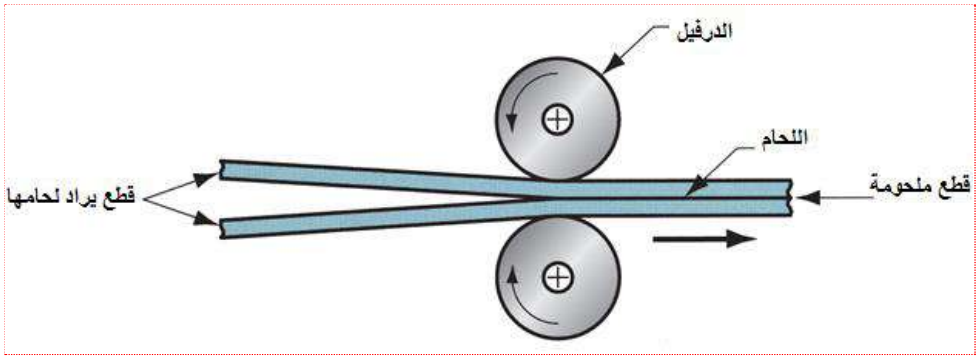
تطبيقات اللحام البارد بالضغط كثيرة منها الموصلات الكهربائية المصنوعة من الألمُنيوم والنحاس، كما هو مبين بعض منتجاتها في الشكل (6-3)، وفي لحام أسلاك الألمُنيوم عند سحبها إلى أقطار أصغر، ويستخدم أيضاً في لحام الوصلات التراكبية بصناعة التعليب والصناعات الكهربائية والإلكترونية.

شكل 6-1 يمثل عملية لحام قضيبين من النحاس على البارد يدوياً

شكل 6-2 مكبس خاص في لحام القضبان على البارد

شكل 6-3 بعض المنتجات الملحومة في اللحام البارد بالضغط

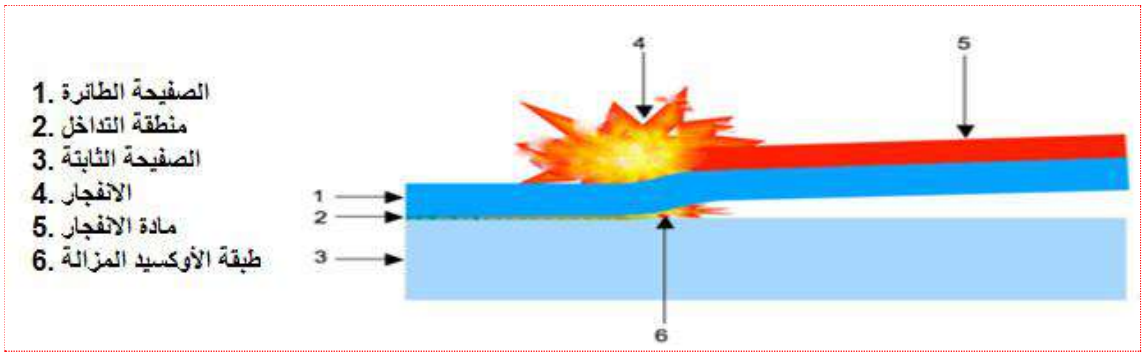
أما استخدام الدرافيل في لحام الضغط البارد الذي يسمى اللحام بالدرافيل Roll Welding (ROW)، تقوم الدرافيل (Rolls) بتسليط الضغط المطلوب على قطع العمل لإنجاز عملية اللحام، وهذه الطريقة تكمن في إنتاج الشرائح الطويلة، لاحظ الشكل (6-4)، مثل إنتاج المزدوجات الحرارية لمعادن غير متشابهة والتغليف بالصفائح، وتستخدم هذه الطريقة أيضاً لتغطية (Cladding) صفائح الفولاذ واطئ أو عالي الكربون بالفولاذ المقاوم للتآكل (Stainless steel)، لاحظ الشكل (1-7)، وإنتاج العملة النقدية المعدنية (Coin)، فعلى سبيل المثال، تصنع إحدى دول العالم عملة نقدية باستخدام طبقتين خارجيتين من سبيكة نحاس - نيكل (75% Cu–25% Ni) سمك كل واحدة منها (1.2 mm) مع طبقة داخلية من النحاس بسمك (5.1 mm)، لغرض الحصول على لحام جيد، تنظف الشرائح كيميائياً ومن ثم بالفرشة السلكية وبعدها تضغط بالدرافيل بمرحلتين، المرحلة الأولى إلى سمك (2.29 mm)، والمرحلة الثانية إلى سمك نهائي مقداره (1.36 mm)، ولهذا التقلص الكلي بالسمك سيكون بمقدار (82%).



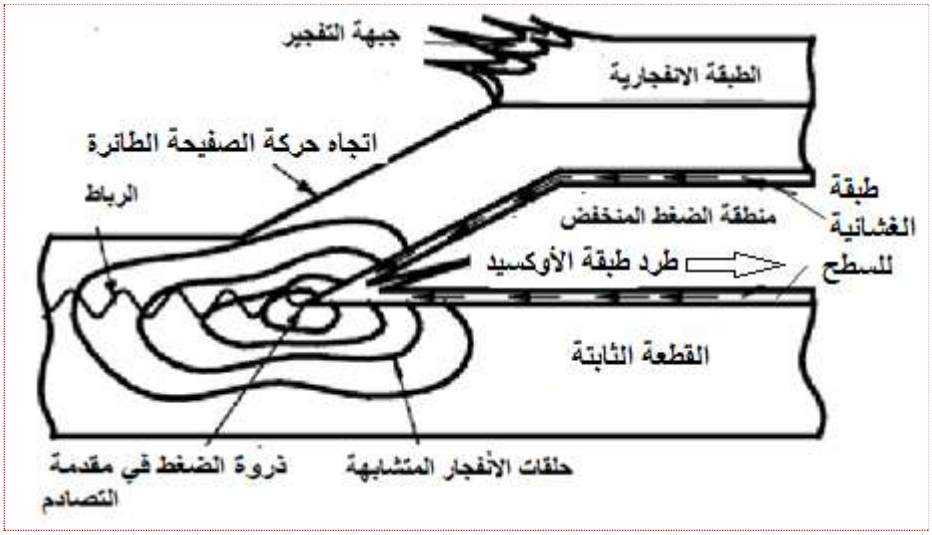
شكل 6-4 لحام الضغط البارد بالدرافيل لشريحتين معدنيتين

6-4-2 اللحام الانفجاري Explosion Welding (EXW)

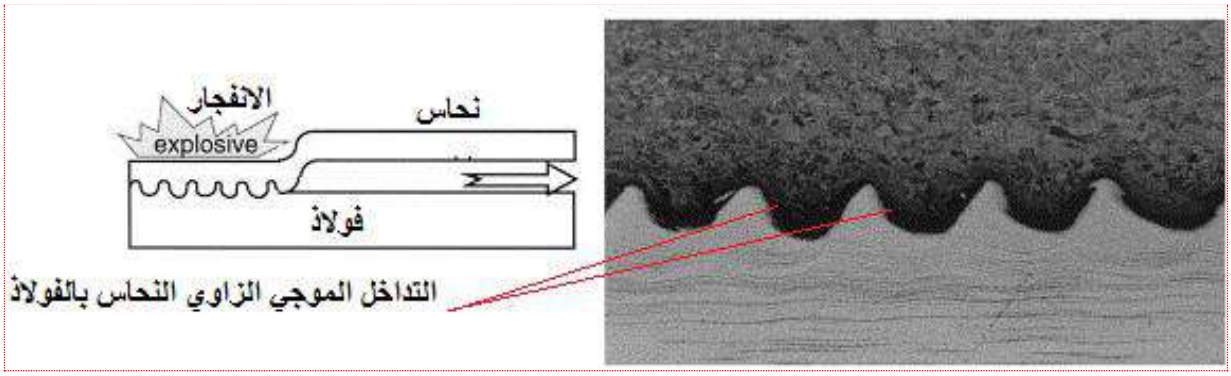
اللحام الانفجاري هو أحد أنواع لحام الحالة الصلبة الذي يتميز بسرعة فائقة في إنجاز عملية اللحام، وتستخدم هذه الطريقة عادة من اللحام للمعادن غير المتشابهة في حالة تغليف مساحات واسعة لمعدن ذي خصائص معينة مختلفة للمعدن الأساس، ولا يستخدم فيه مادة إضافة (سبيكة لحام). والشكل (6-5) والشكل (6-6) يوضح عناصر ومخطط عملية اللحام الانفجاري على التوالي. يسلط ضغط الاتصال المطلوب في اللحام الانفجاري بوساطة وضع طبقة من مادة انفجارية على إحدى القطع المراد لحامها والتي تسمى عادة الصفيحة الطائرة (Flyer Plate) مع قطعة أخرى. إن الضغوط المتكونة نتيجة الانفجار عالية جداً قد تصل إلى (10 GPa)، والطاقة الحركية الهائلة المندفعة للصفيحة الطائرة تضرب القطعة الثابتة مكونة طبقة تداخل موجية مضطربة وبشكل زاوي، وهذا الأثر المتموج يعمل على ترابط ميكانيكي للسطحين المتقابلين، بالإضافة إلى ذلك يتكون لحام الضغط البارد نتيجة التشوه اللدن، ولهذا تكون عملية اللحام قوية جداً في هذا النوع من اللحام، فضلاً على الانتشار الناتج عن الحرارة المتولدة من القوى القصية بسبب الاصطدام الزاوي للصفيحة العليا بالصفيحة السفلى، لاحظ الشكل (6-7).



شكل 6-5 عملية اللحام الانفجاري



شكل 6-6 مخطط عملية اللحام الانفجاري

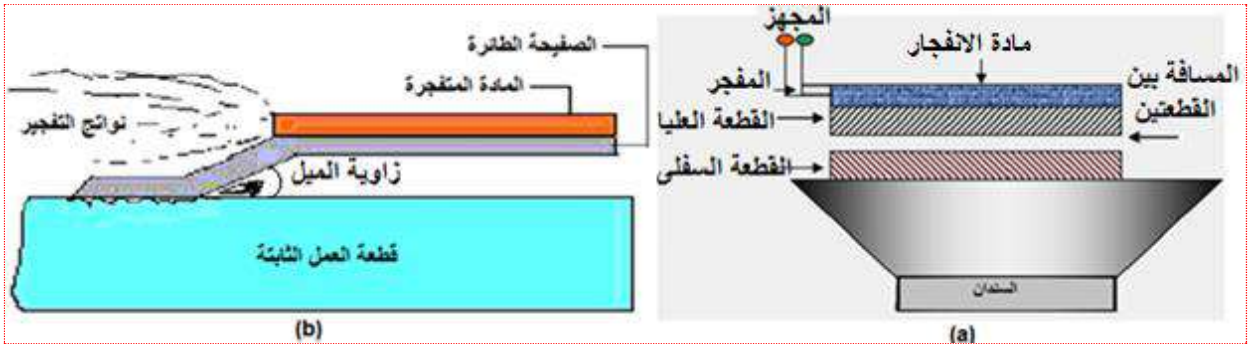


الشكل 6-7 منطقة التداخل لمعدنين مختلفين في اللحام الانفجاري

تثبت الصفيحة الطائرة بطريقتين، إما أن تكون متوازية مع الصفيحة الثابتة أو مائلة. تعتمد السيطرة على شروط اللحام في الترتيب الأول (المتوازية) على المسافة بين الصفيحتين، كثافة وسرعة الشحنة المتفجرة، فضلاً على خصائص وشكل الصفيحة الطائرة. أما الترتيب المائل فتعتمد السيطرة على شروط اللحام على كلٍ من زاوية الميل ونوع مادة التفجير. يفضل الترتيب الأخير (المائل) على الترتيب المتوازي وذلك لضمان التخلص من طبقة الأوكسيد والمواد الغريبة من على السطحين المتقابلين نتيجة

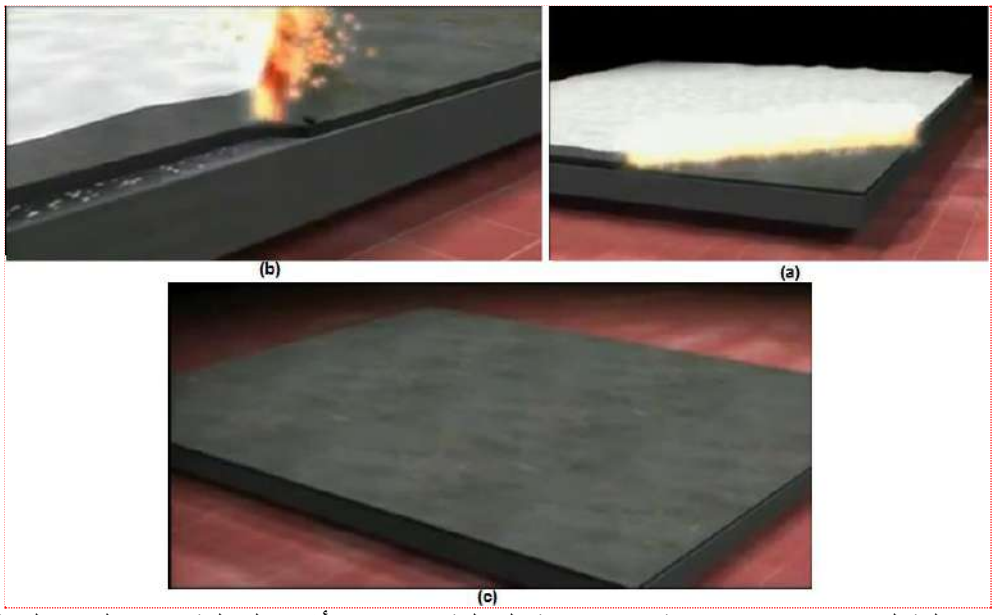
تكسر هذه الطبقة واندفاعها إلى خارج منطقة اللحام وباتجاه حركة اللحام، ولهذا فإن الترتيب المائل نظرياً لا يحتاج إلى تنظيف الأسطح قبل عملية اللحام إلا من الزيوت. والشكل (6-8) يبين ترتيب اللحام الانفجاري المائل والمتوازي للصفيحة الطائرة. توضع عادةً مادة مخمدة (Buffer) بين المواد المتفجرة والصفيحة الطائرة لحمايتها من تأثير الانفجار، وغالباً ما تصنع المادة المخمدة من اللدائن.

قد تكون المادة المستخدمة في اللحام الانفجاري بشكل صفيحة بلاستيكية مرنة أو حبيبات صلبة أو شريطية أو بهيئة سائل. يتقدم الانفجار بسرعة عالية تتراوح (2400-3600 m/s) وتعتمد هذه السرعة على نوعية المادة وسمكها وكثافتها.



شكل 6-8 ترتيب عملية اللحام الانفجاري (a) المتوازي، (b) المائل

بالرغم من عدم تسليط حرارة خارجية، ولكن شكل وهيئة اللحام تبين حصول انصهار جزئي وقع في أثناء عملية اللحام في منطقة التداخل. في حقيقة الأمر أن مصادر الحرارة في هذه المنطقة ناتجة عن الصدمة الموجية بين قطعتي العمل ومن طاقة الاصطدام المستنفدة، فضلاً على الحرارة الناتجة من التشوه اللدن. شكل (6-9) يبين صور لعملية اللحام الانفجاري.

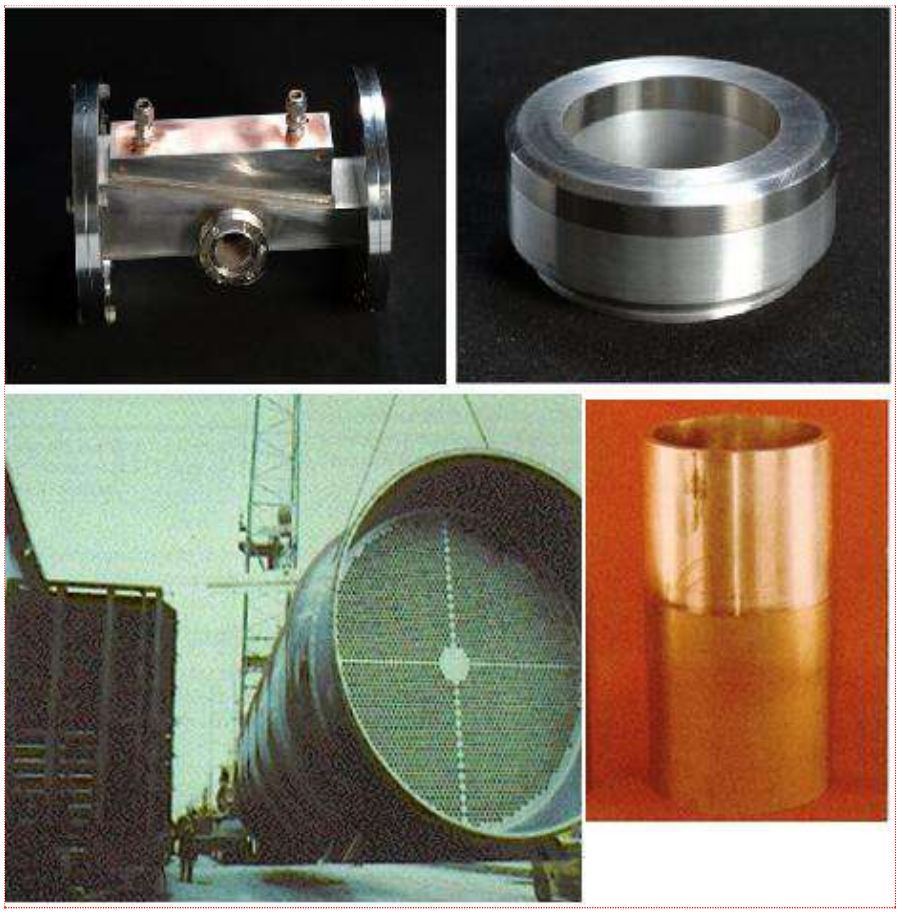


شكل 6-9 عملية لحام انفجاري حقيقية، (a) بداية العملية، (b) في أثناء العملية، (c) المنتج لعملية اللحام

مميزات اللحام الانفجاري هي كالآتي:

1. تكوين لحام قوي جداً بين جميع المعادن تقريباً.
2. إمكانية لحام معادن غير متشابهة لا يمكن لحامها بطرائق أخرى.
3. تحافظ القطع الملحومة على معظم خصائصها السابقة.
4. إمكانية لحام قطع بمساحات واسعة وبسرعة عالية.
5. قوة الملحومة بقدر أو في بعض الأحيان أكبر من قوة قطعة العمل الضعيفة.

انحسر استعمال اللحام الانفجاري في حالات خاصة ومحدودة، وذلك لمخاطر تناول المواد المتفجرة وخزنها. وإحدى أهم تطبيق للحام الانفجاري هو تغليف الصفائح الكبيرة وبمساحة تصل إلى (2×6 m) ولمعادن غير متشابهة مثل تغليف الصفائح بصفائح مقاومة للتآكل كتغليف الفولاذ الواطئ الكاربون بالفولاذ المقاوم للتآكل أو بالتيتانيوم، وتستخدم هذه الصفائح في المعامل الكيميائية ومواقع تكرير النفط، وهنالك تطبيق آخر في إنتاج المراجل (Boilers) إذ تلحم صفيحة رأس المرجل المثقوبة بأنبوب بهذه الطريقة. شكل (6-10) بعض منتجات اللحام الانفجاري.



شكل 6-10 بعض منتجات اللحام الانفجاري

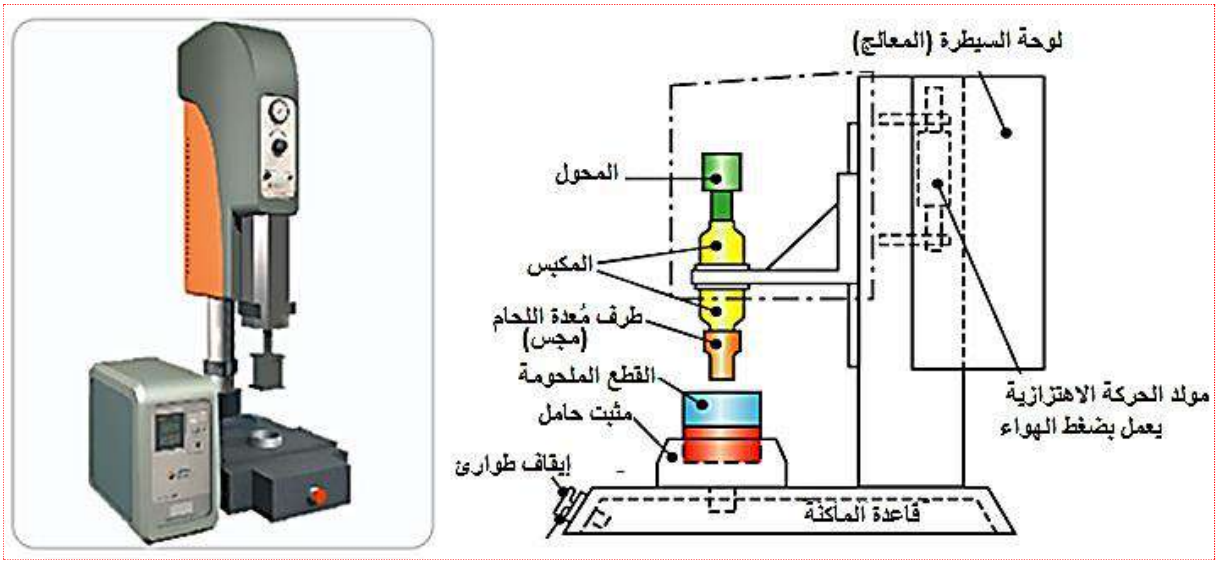
3-4-6 اللحام بالموجات فوق الصوتية Ultrasonic Welding (USW)

اللحام بالموجات فوق الصوتية طريقة من طرائق لحام الحالة الصلبة التي تتم فيه عملية اللحام بتسليط طاقة اهتزازية وبتردد عالٍ وتحت ضغط على قطع العمل، أي بعبارة أخرى يعتمد اللحام بالموجات فوق الصوتية على الجمع بين الضغط وحركة الاهتزاز عالية التردد الذي ينتج لحاماً في الحالة الصلبة، إذ يمكن بهذا اللحام البارد والقوي لحام المواد المعدنية مثل الألمُنيوم مع الفولاذ والألمُنيوم مع التنكستن والألمُنيوم مع الموليبدنيوم والنيكل مع النحاس، كما يمكن بوساطة هذه الطريقة لحام جسم معدني كبير إلى رقاقة (Foil Metal) وهذه خاصية فريدة تنتج من إمكانية اهتزازات الموجات فوق الصوتية على توليد الحرارة المناسبة في كل جزء من الأجزاء المراد لحامها. ويمكن بهذه الطريقة لحام معادن ذات انصهار مختلفة وإنتاج ملحومات قوية ومتماسكة. إذ أثبتت التجارب بانه يمكن لحام كثير من المعادن التي لا يمكن لحامها بطرائق اللحام الأخرى وذلك باستعمال اللحام بالموجات فوق الصوتية.

1-3-4-6 طريقة العمل ومُعداتها Procedures and its Equipment

تُعد عملية اللحام بالموجات فوق الصوتية عالية الكلفة، لذا فإنها تستعمل فقط لدى انعدام إمكانية استعمال طرائق اللحام الأخرى والأقل كلفة. **طريقة عمل مُعدات اللحام بالموجات فوق الصوتية** هو بتسليط قوى ضاغطة يقوم بها مكبس هيدروليكي بكبس هذه الأجزاء على ملف لولبي يقوم بذبذبتها بشدة قرابة (15-75 kHz). إذ يتم تثبيت قطع العمل على سندان وتسلط قوة عمودية وحركة ترددية أفقية في نفس الوقت وبذلك تتكون إجهادات قصية ذات ترددات عالية موازية للسطوح المراد لحامها ولفترات زمنية قصيرة لا تتجاوز ثانية واحدة، لاحظ الشكل (6-11) الذي يوضح مخطط وصورة ماكنة لحام بالأمواج فوق الصوتية الذي يتكون من مولد للذبذبات ومحول للسرع ومحول الطاقة والمجس. يمكن أن تستبدل حافة طرف الجهاز (المجس) بقرص مستدير لأغراض اللحام الخطي بهذه الطريقة.

إن الإجهادات القصية الترددية في المنطقة البينية (منطقة التداخل) خلال عملية اللحام تؤدي إلى تشوه لدن بمقدار صغير في تلك المنطقة وهذه تفتت طبقات الأوكسيد والطلاء الموجودة على السطوح, لذا فإن وصلات اللحام لا تحتاج إلى تنظيفها ما عدا إزالة الشحوم والزيوت. الوصلات الملحومة بهذه الطريقة وصلات ذات جودة عالية بسبب تكون قوة ربط معدني عالية لإزالة طبقات الأوكسيد والمواد الغريبة من على السطح. وتكون الحرارة المتولدة في منطقة اللحام بسبب الإجهادات القصية والضغوط المسلطة بحدود ثلث إلى نصف درجة انصهار معدن قطع العمل؛ ولهذا لا وجود لبقعة اللحام (Nugget) كما هو في لحام المقاومة الكهربائية، في بعض الأحيان قد ترتفع درجات الحرارة عن هذه الحدود مما يسبب تغيراً ميتالورجياً جوهرياً في تلك المنطقة. مواد الإضافة ومساعدات الصهر وكذلك غازات الواقية (المحجبة) غير مطلوبة في هذا النوع من اللحام. إن اللحام لا يعتمد على الحرارة ولا على الضغط العالي, لذا فان وصلة اللحام تكون خالية من المنطقة المتأثرة باللحام (HAZ).



الشكل 6-11 مخطط وصورة ماكنة حديثة للحام بالأمواج فوق الصوتية

المتغيرات التي يجب أن تراعى في اللحام بالأمواج فوق الصوتية هي:

قوة الضغط: يجب أن تكون كافية لحصول تلامس جيد بين نهاية المجس ووصلة اللحام، إذا كانت قوة الضغط قليلة يكون اللحام ضعيفاً، وإذا كانت عالية يحصل تشوهاً في السطوح المتقابلة.

طاقة التردد: تكون كبيرة عند لحام المعادن الصلدة أو القطع السميكة, وصغيرة عند لحام معادن مطيلية أو رقيقة.

الزمن: زمن عملية اللحام يعتمد على كلٍ من طاقة التردد، الخواص الميكانيكية لقطع العمل، وسمك وصلات اللحام المطلوبة، الأجزاء السميكة تحتاج إلى زمن كبير أما الأجزاء الرقيقة فتحتاج إلى زمن أقصر.

وبصورة عامة إن طاقة تردد عالية وزمن قصير ينتج لحاماً ذات جودة عالية أفضل من استخدام طاقة تردد واطئة وزمن طويل.

مميزات اللحام بالموجات فوق الصوتية:

1. إمكانية لحام المعادن المتشابهة وغير المتشابهة، فضلاً على لحام المعادن النشطة.
2. إمكانية لحام المواد البلاستيكية وتستخدم بشكل كبير للحام هذه المواد.
3. لا تتولد حرارة عالية في أثناء اللحام، ولهذا لا وجود للمنطقة المتأثرة باللحام والمشاكل المصاحبة لها.
4. جودة عالية للحام.
5. لا يشترط تنظيف السطوح من الأكاسيد وطبقات الطلاء وغيرها في بعض المعادن.
6. تستخدم للحام المواد الصغير والصفائح النحيفة وحتى للحام الألواح الرقيقة جداً (Foils).

أما محددات طريقة اللحام بالموجات فوق الصوتية:

1. غير ملائمة للحام المعادن ذات المطيلية العالية فضلاً على المعادن ذات الصلادة العالية.
2. اقتصارها على لحام القطع الصغيرة نسبياً وبسمك أقل من (3 mm).
3. تقتصر على لحام المفاصل التراكبية.

وبشكل عام لا تستخدم هذه الطريقة إذا كانت هنالك طريقة أخرى يمكن تنفيذها بدلاً عنها بسبب كلفتها العالية.

استعمالات اللحام بالموجات فوق الصوتية

تستعمل هذه الطريقة للحام حاويات المواد الكيميائية المشعة مثل النتروجليسرين بدون أن تنتج حرارة ملموسة قد تسبب احتراق هذه المواد. وكذلك تستعمل للحام المعادن مثل المغنيسيوم، الخارصين، الكادميوم، الكروم، علماً أنه بالإمكان لحام العديد من المعادن المتشابهة التي تلحم عادة بالموجات فوق الصوتية باستعمال طريقة الحزمة الإلكترونية، ولكن بسبب بطء سرعة اللحام بالحزمة الإلكترونية يكثر استعمال طريقة اللحام بالموجات فوق الصوتية، وهي تستعمل للقطع ذات السمك الذي يتراوح بين الرقيق جداً والسميك نوعاً ما، إذ تستخدم للحام الصفائح المعدنية الرقيقة، وربط الأجزاء الكهربائية والإلكترونية بدون الحاجة إلى سبائك القصدرة كمادة إضافة، وتستخدم في لحام الأنابيب على صفائح في ألواح الطاقة الشمسية، وكذلك تستخدم في صناعة الوقود النووي والمبادلات الحرارية المتعرجة، وغيرها من تطبيقات ربط قطع العمل الصغيرة المتنوعة. الشكل (6-12) يوضح بعض منتجات اللحام بالموجات فوق الصوتية. وقد زاد استخدام هذه الطريقة بلحام المواد غير المعدنية مثل المواد البلاستيكية وخصوصاً في تنفيذ منتجات وسائط النقل، ولكن آلية لحام المواد البلاستيكية تختلف كلياً عن لحام المواد المعدنية، إذ هنالك انصهار للمواد في منطقة التداخل بسبب انخفاض درجة انصهار المواد البلاستيكية.

شكل 6-12 بعض منتجات اللحام بالأمواج فوق الصوتية

5-6 طرائق لحام الحالة - الصلبة بالانتشار

Diffusion Solid-State Welding Methods

إن القسم الثاني من مجموعة طرائق اللحام بالحالة الصلبة هو اللحام بالانتشار، تتميز طرائق هذه المجموعة من مجموعة اللحام بالحالة الصلبة بالتشوه اللدن بتسليط حرارة من مصدر خارجي، فضلاً على الضغط، مما يساعد على انتشار الذرات فيما بينهم من خلال حاجز المنطقة البينية (خط التداخل) لقطع العمل، ترفع الحرارة الخارجية المسلطة درجة الحرارة في تلك المنطقة إلى درجات عالية لكن دون درجات انصهار قطع العمل المراد لحامها، وهي بحدود نصف درجات الانصهار وتأخذ على أساس درجة الحرارة الأدنى في حالة استعمال معادن غير متشابهة، إذ يمكن لحام المعادن غير المتشابهة، فضلاً على لحام المعادن المتشابهة، ومن الجدير بالذكر قد تستخدم مساعدات صهر في طرائق هذه المجموعة. سيتم في هذه الفقرة تناول أهم طرائق لحام الحالة الصلبة بالانتشار وتتضمن:

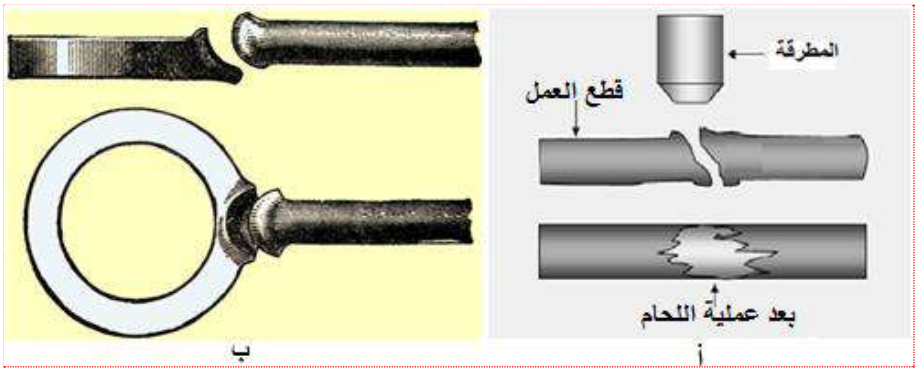
1. **لحام الحدادة**
2. **لحام الانتشار**
3. **لحام الاحتكاك**

1-5-6 لحام الحدادة Forge Welding (FOW)

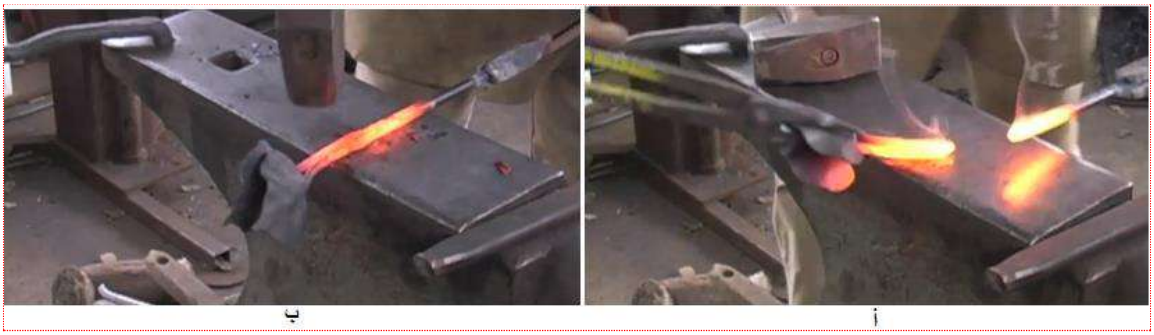
لحام الحدادة هو نوع من لحام الحالة الصلبة، ويُعد من أقدم طرائق اللحام تاريخياً، إذ تسخن قطعتا العمل إلى درجات حرارة عالية قبل استخدام الطَرق أو الضغط أو أي نوع من أنواع الحدادة المعروفة كافية لإنجاز عملية اللحام المطلوبة، عن طريق إحداث تشوه دائم في منطقة التداخل. تسمى في بعض المصادر لحام الطرق (Hammer Welding).

تتلخص خطوات عملية لحام الحدادة، بتسخين قطع العمل إلى درجة حرارة عالية أعلى من درجة حرارة الشغل الحار (Hot Working) وهي درجة الحرارة التي تكون بحدود ثلث إلى نصف درجة انصهار المعدن، إذ إن الشغل بهذه الظروف يسمح للبلورات المعدنية المشوهة نتيجة الطرق أو التشكيل بإعادة تبلورها من جديد وتستعيد المادة حالتها الطبيعية قبل التشكيل (لا يحصل تصليد للمعدن). وبعد تسخين قطع العمل إلى درجات الحرارة المطلوبة يتم طرق قطع العمل بمطرقة أو بأي تقنية ممكنة لغرض الحصول على اللحام المطلوب. الشكل (6-13) يوضح عملية اللحام الحدادي، والشكل (6-14) يبين تسخين قطع العمل بدرجات حرارة عالية جداً (درجة الاحمرار) وتصبح المادة بهيئة عجينية لينة (Soft) لغرض إنجاز عملية اللحام، وهذه حالة خاصة تستعمل مع الفولاذ واطئ الكاربون وغير السبائكي، وليس مع باقي المعادن والسبائك.

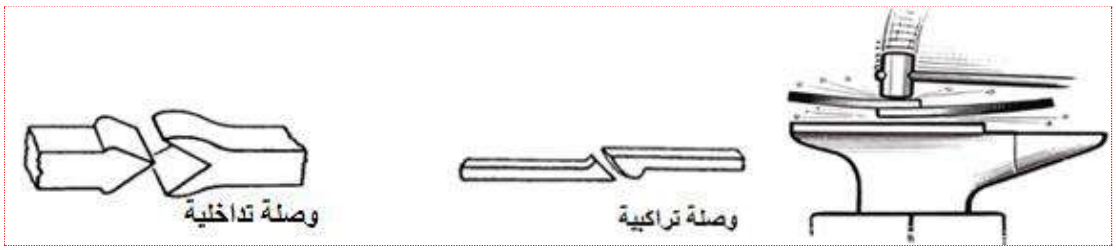
يجب تنظيف الأسطح المراد وصلها باللحام الحراري من القشرة الأوكسيدية عن طريق رشها بمساعد صهر بعد التسخين مباشرة ومساعد الصهر المستخدم هو البوراكس أو حامض السيليسيك التي تختلط بالقشور المتكونة ويمكن إزالتها فيما بعد، وينبغي ألا تزيد نسبة الكاربون في الفولاذ المراد لحامه عن (0.13%)، يمكن لحام أنواع أخرى من الفولاذ يحتوي على نسبة أعلى من الكاربون إذا تم تقليل النسبة في منطقة الوصل عن طريق إضافة حبيبات من الفولاذ التي تحتوي نسبة منخفضة من الكربون. أهم وصلات لحام الحدادة هي التراكبية والتناكبية وكذلك التداخلية، كما هو مبين في الشكل (6-15).



شكل 6-13 عملية لحام الحدادة (الطرق)، أ- مخطط، ب- شكل قطعة العمل قبل وبعد اللحام



شكل 6-14 عملية لحام الحدادة للفولاذ، أ- تسخين قطع العمل للاحمرار، ب- لحام قطعتي العمل تراكبياً



شكل 6-15 أهم أنواع وصلات لحام الحدادة

المهارة العالية مطلوبة للفني (الحداد) لغرض الحصول على ملحومات جيدة ضمن المواصفات المعتمدة في الوقت الحاضر. ومع هذا فإن اللحام بهذه الطريقة بدأ ينحسر استعماله إلا من طرائق مغايرة للحام الحدادة ولكنها تقع ضمن نفس التصنيف وهي كالآتي:

- لحام الدرافيل الحار Hot-Roll Welding
- لحام الضغط الحار Hot Pressure Welding

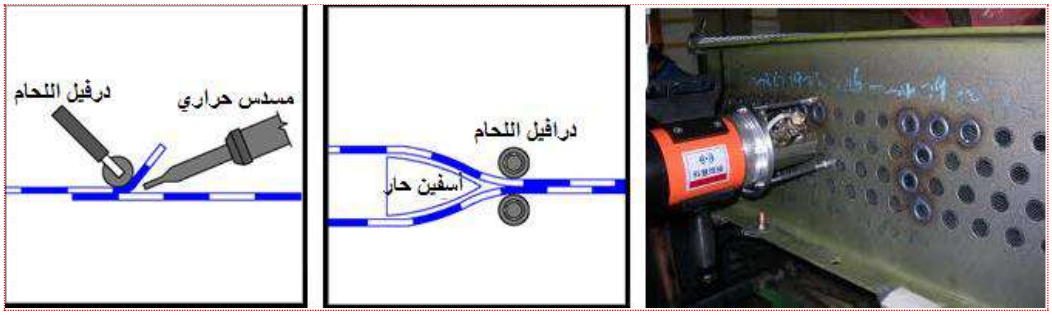
6-5-1-1 لحام الدرافيل الحار Hot-Roll Welding

لحام الدرافيل الحار هو نوع مشتق من لحام الحالة الصلبة بالحدادة، تستخدم درافيل خاصة لغرض تسليط ضغط عالٍ على قطع العمل التي تم تزويدها بمصدر حراري خارجي، وغالباً ما تتم عملية اللحام مباشرة بعد تشكيل قطع العمل التي تكون عادة بهيئة صفائح معدنية. تستخدم هذه الطريقة في تغليف الصفائح المعدنية بصفائح معدنية رقيقة لها وظائف معينة مثل حماية الصفيحة الرئيسة من التآكل أو من ظروف التشغيل (العمل) القاسية، مثل تغليف صفائح الفولاذ بصفائح الفولاذ السبائكي المقاوم للتآكل، لاحظ الشكل (6-16) الذي يبين تغليف الصفائح بالدرافيل.

شكل 6-16 تغليف الصفائح بالدرافيل

6-5-1-2 اللحام بالضغط الحار Hot Pressure Welding (HPW)

لحام الضغط الحار نوع آخر مغاير من لحام الحدادة، إذ تسلط حرارة وضغط مناسبان لإنجاز عملية اللحام نتيجة التشوهات الحاصلة في معدن قطع العمل، وهذه التشوهات ستُكسر طبقة الأكاسيد ويتكون لحام معدني قوي خالٍ من الأكاسيد، والزمن له اعتبار مهم ومناسب لكي يسمح بعملية الانتشار للذرات من خلال المنطقة البينية لقطعتي العمل. غالباً ما تكون عملية اللحام في وسط محجب أو مفرغ من الهواء. تستخدم هذه الطريقة من اللحام في التطبيقات الصناعية الفضائية. الشكل (6-17) يوضح عملية اللحام بالضغط الحار.



شكل 6-17 عملية لحام بالضغط الحار

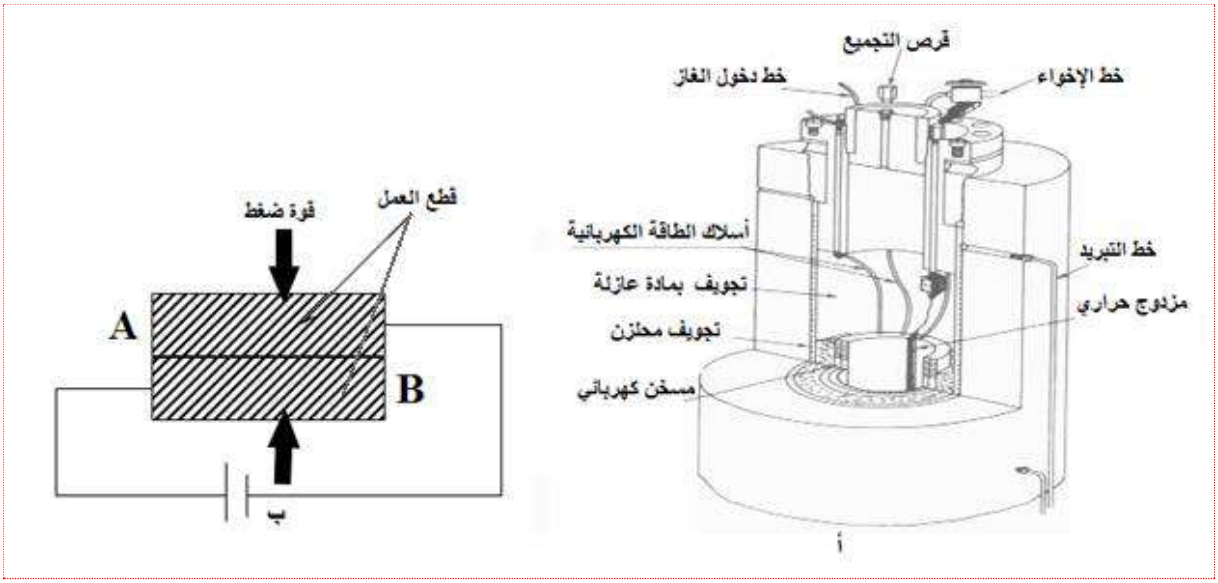
2-5-6 لحام الانتشار Diffusion Welding (DFW)

اللحام الانتشاري أحد طرائق لحام الحالة الصلبة الذي تتم فيه عملية اللحام بوساطة تسليط ضغط وبارتفاع درجات الحرارة، ويعني مصطلح الانتشار حركة ذرات المادة وانتقالها من قطعة إلى أخرى من خلال المنطقة البينية (الخط الفاصل) وهي المسبب الرئيس في عملية اللحام مع المسبب الثانوي وهو التشوه اللدن القليل الحاصل في أثناء العملية. تستخدم العملية للحام سبائك المعادن الحرارية (المعادن ذات درجات الانصهار العالية) المتشابهة وغير المتشابهة، فضلاً على المعادن النشطة مثل (تيتانيوم، بيريليوم، زركونيوم)، إذ إن عملية اللحام بهذه الطريقة لا تؤثر على خصائص هذه المعادن عند ارتفاع درجات الحرارة في أثناء اللحام، وغالباً ما تكون درجة حرارة العملية أعلى بقليل من نصف درجات الانصهار لزيادة معدلات الانتشار وبالتالي تسريع عملية اللحام. مصادر الحرارة الخارجية المطلوبة والمزودة لعملية اللحام إما أن تكون بوساطة الحث أو المقاومة الكهربائية أو الأفران، والأفران التي تعمل بالإخواء أو بالجو الخامل هي المفضلة، الشكل (6-18) يوضح طريقتين لتزويد الحرارة في اللحام الانتشاري. لغرض إتمام العملية بنجاح يجب أن تكون قطع العمل قريبة جداً. إن الخواص الميكانيكية والفيزيائية في منطقة اللحام لا تختلف عن خصائص المعدن الأساس، وهذه تُعد ميزة لهذه الطريقة من اللحام. قوة الملحومات تعتمد على متغيرات العملية المتضمنة مقدار الضغط، درجة الحرارة، وزمن الاتصال، فضلاً على نظافة السطوح المتقابلة. وبالإمكان خفض متطلبات هذه المتغيرات إذا استعملت مواد الإضافة التي توضع في المنطقة البينية وتستعمل مواد الإضافة في حالة لحام المعادن غير المتشابهة وتوضع بشكل طبقة بين قطعتي العمل لتعزيز عملية الانتشار.

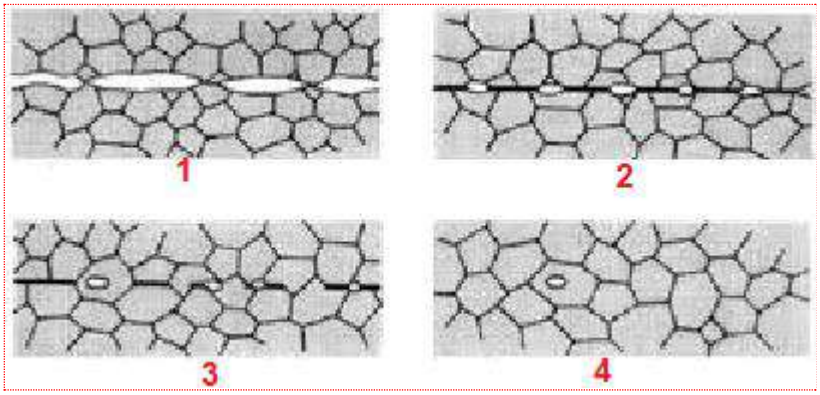
تطبيقات هذه الطريقة قديمة وقد استخدمت منذ قرون من قبل صانعي الحلي الذهبية عند لحام النحاس بالذهب، إذ تصنع طبقة رقيقة من الذهب بالطرق ومن ثم توضع على قطعة نحاسية ويسلط ضغط على المجموعة بوساطة ثقل، ثم توضع المجموعة في فرن وتترك لحين إتمام عملية اللحام. ويمكن أن يُعد هذا العمل على أنه اللحام بالضغط الحار.

إن الضغط المطلوب يمكن أن يسلط عن طريق وضع أثقال، أو استعمال مكبس، أو الضغط بالغاز، أو بسبب التمدد الحراري لقطع العمل نفسها، وتستعمل ضغوط عالية في بعض الأحيان لمتطلبات القطع ذات الأشكال المعقدة. ويُعد زمن عملية اللحام بالانتشار طويلاً نسبياً مقارنة مع الطرائق الأخرى بسبب عملية الانتشار تقتضي هجرة الذرات عبر منطقة الاتصال والتي تحتاج إلى وقت طويل قد تصل إلى أكثر من أربع ساعات في بعض التطبيقات.

الشكل (6-19) يوضح مراحل عملية اللحام الانتشاري، والشكل (6-20) يبين صورة لعملية اللحام.



شكل 6-18 تزويد الحرارة في عملية اللحام الانتشاري، أ- فرن يعمل بالإخواء، ب- بالمقاومة الكهربائية



شكل 6-19 مراحل عملية اللحام الانتشاري

1- التقاء قمم سطحي قطع العمل في منطقة التداخل، 2- تكون حدود جديدة نتيجة التشوه، 3- هجرة الذرات وتقليص الفجوات، 4- الانتشار الكلي وحذف الفجوات

محددات لحام الانتشار:

- تستغرق عملية اللحام وقتاً طويلاً.
- إن تهيئة السطوح تحتاج إلى دقة عالية، وصعوبة في التخلص من طبقات الأوكسيد والمواد الغريبة الأخرى التي تؤثر على جودة اللحام.
- غير مخصصة للإنتاج الواسع.

مميزات لحام الانتشار:

- إمكانية لحام المعادن الحرارية والمعادن النشطة وحتى المواد السيراميكية التي يصعب لحامها بالطرائق الأخرى.
- إمكانية لحام قطع بأشكال معقدة، وتطبيقات خاصة لعدم تسرب المواد أو الموائع وخالية من العيوب.
- لا تحتاج العملية مواد مستهلكة مثل الأقطاب المستهلكة.
- إمكانية الإنتاج المؤتمت، لتكون مناسبة واقتصادية بمعدلات إنتاجية متوسطة.
- الخواص الميكانيكية والفيزيائية في منطقة اللحام لا تختلف عن خصائص المعدن الأساس.
- إمكانية جعل المعاملة الحرارية المطلوبة في التصنيع جزءاً من عملية اللحام.
- إمكانية إجراء العديد من عمليات اللحام بنفس الوقت.

استخدامات لحام الانتشار:

- التطبيقات الصناعية للمعادن النشطة والحرارية في الصناعات الفضائية والمفاعلات النووية.
- التطبيقات الصناعية للمحركات التوربينية.
- صناعة المبادلات الحرارية.
- صناعة بعض مكونات الأجهزة الإلكترونية والكهربائية.
- إنتاج المواد المركبة (Composite Materials).

الشكل (6-20) يبين بعض منتجات اللحام بالانتشار.

شكل 6-20 بعض منتجات اللحام الانتشاري

3-5-6 اللحام بالاحتكاك Friction Welding (FRW)

اللحام بالاحتكاك أحد طرائق لحام الحالة الصلبة والذي تتم فيه عملية اللحام بوساطة توليد الحرارة داخلياً (أي بدون مصدر خارجي) نتيجة الاحتكاك الناتج من حركة الانزلاق الميكانيكية للسطوح المتقابلة. تحتك قطع العمل فيما بينها تحت ضغط معين، وغالباً ما تنفذ عملية اللحام بتدوير قطعة عمل ضد قطعة عمل أخرى ساكنة لتوليد حرارة الاحتكاك في منطقة التقابل، وبعد وصول درجة الحرارة العالية المناسبة للحام ونسبة معقولة من التداخل لقطعتي العمل يتم إيقاف الحركة الدورانية بشكل مفاجئ وذلك للحفاظ على اللحام من الإجهادات القصية الثانوية وبنفس الوقت يتم زيادة الضغط وتتم بذلك عملية اللحام بنجاح. والشكل (6-21) يوضح مخطط لعملية اللحام الاحتكاكي.

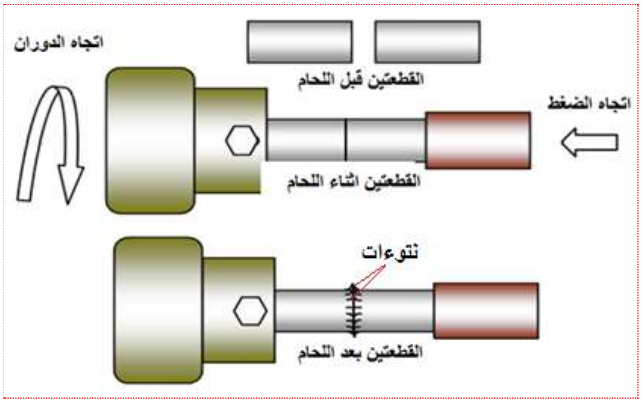
تتحدد منطقة اللحام بمنطقة ضيقة بالاعتماد على كلٍ من الآتي:

- كمية الحرارة المتولدة.
- الموصلية الحرارية للمعادن (قطع العمل).
- الخواص الميكانيكية لقطع العمل وخصوصاً عند ارتفاع درجات الحرارة.

في حين يعتمد شكل منطقة اللحام على كلٍ من الآتي:

- سرعة الدوران، وتعتمد على نوعية المادة.
- قوى الضغط المحورية المسلطة، لاحظ الشكل (6-22).

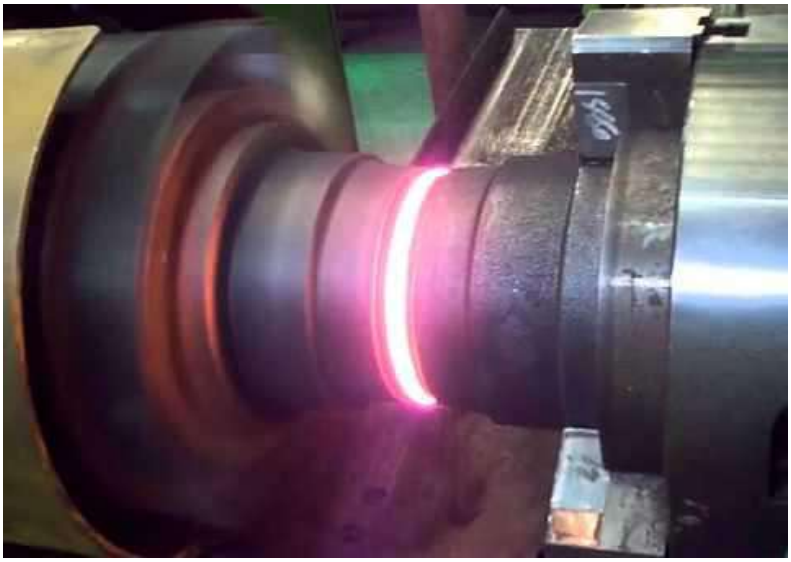
هنالك تقنيتان لهذه الطريقة، الأولى وهي الطريقة الأصلية التي تم ذكرها أعلاه، إذ يتم تدوير القطعة المتحركة بوساطة محرك كهربائي دوراني يدور بسرعة ثابتة لزمن محدد، يعتمد على عدة عوامل. يتم السيطرة على متغيرات العملية بشكل صحيح التي تتضمن سرعة الدوران التي قد تصل إلى (900 m/min)، الضغط، وزمن عملية اللحام للحصول على ملحومات ذات جودة عالية. وتتعزز قوة الملحومات بسبب قذف المواد الغريبة والأكاسيد الموجودة على سطوح قطع العمل المتقابلة إلى الخارج. تتكون نتوءات بسبب التشوه اللدن في وصلة اللحام، ويمكن إزالتها بعمليات تشغيلية أو عمليات تجليخ بسيطة.



شكل 6-21 مخطط لعملية اللحام الاحتكاكي

شكل 6-22 أشكال منطقة اللحام الاحتكاكي كدالة لقوة الضغط والسرعة الدورانية

أما التقنية الأخرى فهي مشابهة للأولى ومطورة بإضافة دولاب طيار (Flywheel) يدور ومثبت بطريقة ما من محرك كهربائي، الطاقة المطلوبة لعملية لحام تجهز من الطاقة المخزونة في الدولاب الطيار، إذ يعجل دورانه إلى سرعة مناسبة، ومن ثم يتم تماس قطع العمل، وبعدها تسلط قوى ضاغطة محورية، وعند بدء نقصان دوران الدولاب الطيار بسبب الاحتكاك قوى الضغط سيتم زيادتها. يمكن السيطرة على عملية اللحام من التحكم في عزم القصور الذاتي للكتلة الدوارة. دورة اللحام هذه لا تتجاوز (20 s)، تدعى هذه التقنية **لحام القصور الذاتي الاحتكاكي** Inertia Friction Welding (**IFW**). تتميز هذه الطريقة من سابقتها بأن الملحومات المنتجة بهذه الطريقة لها قابلية عالية على تحمل جهود الكلال، وذلك لتشكيل خطوط انسياب المادة بشكل محيطي وليس قطرياً في منطقة اللحام، والشكل (6-23) يبين عملية لحام القصور الذاتي الاحتكاكي.



شكل 6-23 عملية لحام القصور الذاتي الاحتكاكي

يمكن أن يتم اللحام بالاحتكاك باستخدام المخرطة إلى حدٍ ما، ولكن هذه المخرطة لا توفر الدقة العالية ما يجعل الأمر غير ممكن لأنها غير مصممة لهذا الغرض، لذا لابد من استخدام ماكنة خاصة يمكنها التحكم بدقة للمتغيرات الثلاث الأساسية هي سرعة الدوران وقوى الضغط المحورية ووقت التماس، والشكل (6-24) يمثل هذه الماكنة.

الشكل 6-24 ماكنة تستخدم في اللحام الاحتكاكي

مميزات عملية اللحام الاحتكاكي:

1. إمكانية لحام عدد كبير من المواد المتشابهة وغير المتشابهة وبدقة وجودة عاليتين وبتكاليف منخفضة.
2. لا تحتاج إلى تجهيز حرارة من مصدر خارجي، بل يتم توليد الحرارة ذاتياً من خلال الاحتكاك.
3. الحرارة المتولدة من الاحتكاك لا تكفي لانصهار المعدن الأساس ولا تسبب التواءً أو تشوهات اللحام المعروفة وإن حدثت تكن طفيفة.
4. لا تحتاج إلى مواد مضافة أو مساعدات صهر.
5. إنتاجية جيدة.

يقتصر نوع وصلات اللحام الاحتكاكي على الوصلات التناكبية، فيمكن لحام المقاطع المربعة والمستطيلة، فضلاً على المقاطع الدائرية مثل لحام المحاور والأنابيب، والشكل (6-25) يبين بعض منتجات اللحام الاحتكاكي.

شكل 6-25 بعض منتجات اللحام الاحتكاكي

استخدامات اللحام الاحتكاكي:

- تستخدم في لحام سبائك الصناعات الفضائية وخصوصاً سبائك الألمُنيوم والسبائك الفائقة.
- تستخدم في لحام المحاور والقضبان الفولاذية الكبيرة حتى بقطر (100 mm) ولحام الأنابيب الفولاذية وبأقطار تتجاوز (250 mm).
- تستخدم في لحام المحاور مع التروس، والأعمدة النصفية في المركبات، وصمامات الاحتراق الداخلي.
- تستخدم في الصناعات المختلفة مثل صناعة المركبات، الطائرات، المُعدات الحقلية، المُعدات النفطية والغازية.

1-3-5-6 لحام الاحتكاك والمزج بالحركة Friction Stir Welding (FSW)

وهي طريقة جديدة من طرائق لحام الحالة الصلبة، إذ بدأ استخدامها في نهاية القرن العشرين. ومبدأ عملها نابع من مبدأ عملية اللحام الاحتكاكي. الحرارة المتولدة الذاتية ناتجة عن الاحتكاك لقطع العمل المتقابلة مع أداة دورانية خاصة. وأداة الدوران صغيرة، قطرها بحدود (5-6 mm) وطولها (ارتفاعها) (5 mm)، وتدور وتتحرك هذه الأداة في وصلة اللحام. درجة حرارة العمل الناتجة من الاحتكاك تتراوح بحدود (230-260°C) للألمُنيوم وسبائكه. وتعمل حافة أداة الدوران على توليد الحرارة وبنفس الوقت خلط مادة قطعتي العمل، والشكل (6-26) يبين عملية اللحام بالاحتكاك والمزج بالحركة.

تستخدم هذه الطريقة في لحام الأجزاء المهمة المستخدمة في الطائرات والصناعات الفضائية وخاصة سبائك الألمُنيوم، وحالياً تستخدم في ربط اللدائن والمواد المركبة. والأجزاء التي يمكن لحامها يتراوح سمكها أصغر من (1 mm) وأكبر من (30 mm)، جودة اللحام عالية ومع مسامية بالحد الأدنى و بُنية داخلية منتظمة. يتم اللحام بدرجات حرارة منخفضة نسبياً لذلك فإن التشوهات الحاصلة مع طرائق اللحام التي تتطلب درجات حرارة عالية لن تحدث في هذه الطريقة.

شكل 6-26 عملية اللحام بالاحتكاك والمزج بالحركة

أسئلة الفصل السادس

س1) املأ الفراغات الآتية:

1. في لحام الحالة الصلبة تتم عملية الربط بدرجة حرارة.....من درجة انصهار قطع العمل.
2. تصنف طرائق لحام الحالة الصلبة بحسب آلية حصول عملية اللحام إلى قسمين هما .....و.....
3. يتميز لحام .....وهو أحد أنواع لحام الحالة الصلبة بسرعة فائقة في إنجاز عملية اللحام.
4. الحرارة المتولدة في منطقة اللحام بالموجات فوق الصوتية تكون بحدود..... درجة انصهار معدن قطع العمل.
5. أهم طرائق لحام الحالة الصلبة بالانتشار هي .....و.....و.....
6. يقتصر نوع وصلات اللحام الاحتكاكي على الوصلات.....

س2) علل ما يأتي:

1- ليس صحيحاً تسمية لحام الحالة الصلبة بعمليات ربط الحالة الصلبة.
2- لا وجود للمنطقة المتأثرة باللحام HAZ في لحام الحالة الصلبة.
3- معيار نجاح عملية اللحام بالحالة الصلبة يكمن في نظافة أسطح قطع العمل وبشكل دقيق جداً.
4- في لحام الانفجار تكون عملية اللحام قوية جداً.
5- تستعمل طريقة لحام الحدادة مع الفولاذ واطئ الكربون وغير السبائكي دون غيره من السبائك.
6- لا تحدث تشوهات في منطقة اللحام في لحام الاحتكاك والمزج مقارنة بباقي طرائق اللحام.

س3) اذكر أهم مميزات ومحددات لحام الحالة الصلبة.

س4) عرف لحام الضغط بالبارد، وما هو مبدأ عمل هذه الطريقة والمتطلبات الضرورية لنجاحها؟

س5) عدد مميزات اللحام الانفجاري وتطبيقاته العملية.

س6) ما هي المتغيرات التي يجب مراعاتها في اللحام بالأمواج فوق الصوتية؟

س7) ما هو لحام الانتشار؟ وما هي محدداته ومميزاته واستخداماته؟

س8) ما الذي يحدد منطقة اللحام في عملية اللحام بالاحتكاك؟ وعلامَ يعتمد شكل هذه المنطقة؟

س9) قارن بين صنفي لحام الحالة الصلبة، اللحام بالتشوه اللدن ولحام الانتشاري.

س10) ما هو أحدث نوع من طرائق لحام الحالة الصلبة؟ وما هي ميزاته واستخداماته؟

الفصل السابع

تشكيل المعادن

Metal Forming

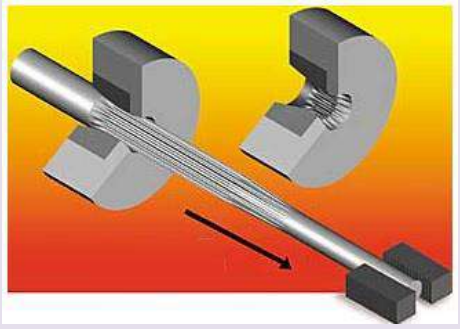
الأهداف

الهدف العام:

في هذا الفصل سيتمكن الطالب من معرفة طرائق تشكيل المعادن وأهمية كل طريقة من الطرائق المتبعة في عمليات التشكيل المختلفة، ويمكنه أن يميز بين هذه الطرائق ويعرف أسلوب عمل كل طريقة ليتمكن بعدها من تحديد الطريقة المناسبة لكل حالة إنتاجية.

الأهداف الخاصة في نهاية هذا الفصل سيكون الطالب قد عرف الآتي:

1. تصنيف عمليات التشكيل الميكانيكي للمعادن.
2- عمليات التشكيل على البارد والساخن ومميزات ومحددات كلٍ منهم.
3- عملية الدرفلة وأنواعها وتقنياتها والمكائن الخاصة بالعملية.
4- يفهم التحليل الهندسي للدرفلة المستوية.
5- العيوب الناتجة عن عملية الدرفلة، وكيفية معالجتها.
6- عملية الحدادة، وأنواعها والقوالب المستعملة فيها، ومميزات ومحددات العملية.
7- عملية البثق وأنواعها واستخدامات كل نوع، وعيوب هذه العملية.
8- عملية السحب ومميزاتها، واستخداماتها.
9- يمكنه إجراء مقارنة بين العمليات.



تشكيل المعادن Metal Forming

1-7 مقدمة Introduction

عمليات التشكيل هي إحدى عمليات التصنيع المهمة المستخدمة على نطاق واسع في جميع الصناعات الميكانيكية، إذ يتم تغيير أشكال وأبعاد المعادن والسبائك المختلفة إلى أُشكال أخرى وبأبعاد محددة بدون إزالة رايش. وعمليات التشكيل هذه تجري على المعادن والسبائك في الحالة الصلبة أي دون صهرها. حيث تتم عمليات التشكيل تحت تأثير قوى ميكانيكية كالشد أو الضغط أو الثني (الحني) وباستعمال أجهزة ومعدات خاصة تقوم بتامين القوى اللازمة لإحداث التغيير المطلوب بشكل المعدن مع احتفاظ المعدن بحجمه وكتلته الأساسيين، وبالإمكان إجراء عمليات التشكيل، إما على البارد (بدرجة حرارة الغرفة) أو على الساخن (بدرجات حرارية مرتفعة).

ومن الجدير بالذكر، أن قابلية المواد المختلفة على تقبل التغيير المطلوب بأشكالها وأبعادها تعتمد على الخواص الميكانيكية والبُنية الداخلية (Structure) لتلك المواد، لذا هنالك تباين كبير في قابلية المواد على تقبل التشكيل المطلوب، وتفضل المواد التي تمتلك خواص ميكانيكية معينة مثل نقطة خضوع واطئة فضلاً على المطيلية العالية، وهذه الخواص عادة تتأثر بدرجة الحرارة، إذ إن المطيلية تزداد ونقطة الخضوع تنخفض عند ارتفاع درجة الحرارة. معدل الإجهاد (الانفعال) (Strain) والاحتكاك عوامل أخرى مهمة تؤثر على أداء عمليات التشكيل. وتتم عمليات التشكيل المختلفة باستعمال قوالب خاصة تعتمد على نوعية التشكيل وتسليط جهود (Stresses) أعلى من مقاومة الخضوع (Yield Point) للمادة، والسبب في ذلك هو لضمان حفاظ المادة على الشكل والأبعاد الجديدين وبصورة دائمة، والأشكال الجديدة لقطع العمل تتحدد بموجب القوالب المصممة لذلك. إن جميع الخواص الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية للمواد المشكلة تختلف بشكل كلي أو جزئي عن خواصها قبل التشكيل، وذلك نتيجة التغيرات الحاصلة في البنية الداخلية.

2-7 عمليات تشكيل المعادن Metal Forming Processes

تُصنف عمليات التشكيل الميكانيكي إما استناداً إلى درجة الحرارة التي تجرى بها عملية التشكيل وهذه تقسم إلى مجموعتين أساسيتين هما:-

- **التشكيل على البارد** Cold Forming
- **التشكيل على الساخن** Hot Forming

أو تُصنف بالاعتماد على شكل قطعة العمل (نسبة المساحة السطحية للحجم) وإلى مجموعتين هما:

- **التشكيل الكتلوي** (أي المعدن المستخدم يكون بشكل كتلة) (Bulk Metal Forming)
- **تشكيل الصفائح** (Sheet Metal Forming) والذي سيتم تناوله في الفصل الثامن.

3-7 التشكيل على البارد Cold Forming

عمليات التشكيل على البارد تعني التشكيل عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة إعادة التبلور للمعدن، إذ تزداد صلادة المعدن نتيجة التشكيل، وعند تكرار عمليات التشكيل على البارد لنفس قطع العمل تستمر زيادة صلادة المعدن مسببة شروخاً أو حتى فشل (انهيار) تلك القطع, وللتغلب على هذه الحالة تتم المعالجة الحرارية أو المعالجة بطرائق أخرى خلال مراحلها أو بعد الانتهاء من عمليات التشكيل.

1-3-7 مميزات ومحددات التشكيل على البارد

تتميز عمليات التشكيل على البارد بالمميزات الآتية:-

1. إمكانية إنتاج المقاطع الصغيرة.
2. الحصول على منتجات خالية من الأكسدة وإنهاء سطح جيد.
3. الحصول على منتجات تمتاز بدقة الأبعاد.
4. للمنتجات خواص ميكانيكية عالية.
5. لا حاجة لمصدر حراري خارجي وبالتالي ستكون كُلف الإنتاج أرخص وأسرع.

أما محددات التشكيل على البارد هي كالآتي:

1. تتطلب قوى وقدرات عالية لإنجاز عمليات التشكيل.
2. تتطلب التأكد من نظافة السطوح من الأكاسيد والمواد الغريبة الأخرى.
3. محدودية التشكيل تتحدد بمقدار مطيلية المعدن والتصليد الإجهادي له.

4-7 التشكيل على الساخن Hot Forming

تعني عمليات التشكيل على الساخن للوهلة الأولى التشكيل عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الغرفة، وفي حقيقة الأمر فإن المعادن واطئة الانصهار مثل القصدير والرصاص وبعض السبائك الأخرى يتم تشكيلها على الساخن حتى لو كان العمل في درجة حرارة الغرفة، لأن المعيار بدرجة الحرارة في عمليات التشكيل هو درجة حرارة إعادة التبلور (Recrystallization)، فإذا كانت درجة حرارة العمل أعلى من هذه الدرجة يسمى التشكيل على الساخن (Hot Forming) وإن حصل التشكيل بدرجة حرارة أقل من درجة حرارة إعادة التبلور يكون التشكيل على البارد، درجة حرارة إعادة التبلور تكون بحدود نصف درجة انصهار المعدن وتؤخذ على أساس مقياس درجات الحرارة المطلق – كلفن – (K)، وعادة ما تتراوح حدود درجات الحرارة للتشكيل الساخن بين نصف إلى ثلاثة أرباع درجة انصهار قطعة العمل المراد تشكيلها. علماً أنه **بارتفاع درجة الحرارة** تقل **مقاومة قطعة العمل للتشكيل** (أي: **ازدياد المطيلية وانخفاض نقطة الخضوع فضلاً على نقصان الصلادة**)، فتسهل عملية تشكيله.

1-4-7 مميزات ومحددات التشكيل على الساخن

تمتاز عمليات التشكيل على الساخن بالمميزات الآتية:-

- يتغير شكل قطعة العمل جوهرياً عما كانت عليه قبل التشكيل.
- انخفاض القوى المسلطة والقدرة المطلوبة للتشكيل، وبهذا تنخفض الكلف الأولية والتشغيلية لمكائن العمل.
- الحصول على خواص ميكانيكية متجانسة لمقطع قطعة العمل بالكامل، ويمتاز المعدن بامتلاكه بنية بلورية مرتبة، فضلاً عن التخلص من جميع العيوب التي قد تكون متواجدة قبل التشكيل على الساخن.
- المعادن التي تتكسر أو تنهار في أثناء التشكيل البارد يمكن تشكيلها على الساخن بنجاح.
- عدم حصول تصليد أو شقوق في المعدن.
- إمكانية إجراء عملية التشكيل بمراحل عديدة.

أما أهم محددات التشكيل على الساخن فهي كالآتي:

- دقة الأبعاد لقطع العمل أقل، وإنهاء ضعيف (رديء) لسطوح قطع العمل.
- تكوّن الأكاسيد على سطح قطع العمل.
- ازدياد كُلف الإنتاج بسبب كُلف التسخين المطلوبة.
- عمر قصير لأدوات العمل.

5-7 عمليات التشكيل الكتلوي Bulk Forming Processes

تتضمن عمليات التشكيل الرئيسة والمعروفة تغيرات جوهرية لأشكال قطع العمل والتي كانت أشكالها الأولية (قبل التشكيل) عبارة عن أشكال هندسية بسيطة مثل الأسطوانة بشكل قضبان أو المتوازي المستطيلات (المفلطح Slab والطولي Billet والكتلي Bloom) وغيرها من الأشكال المشابهة.

والأهمية التجارية والتكنولوجية لعمليات التشكيل الكتلوي نابعة من النقاط الآتية:

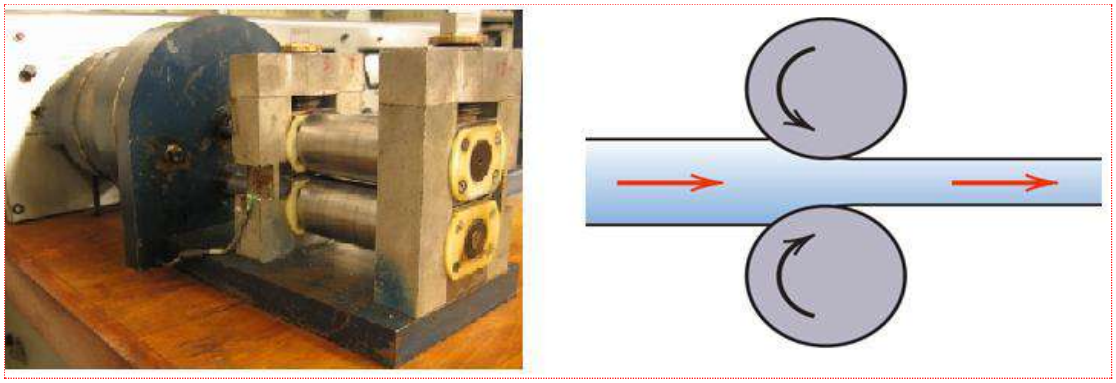
- التغيرات الجوهرية الكبيرة لشكل قطعة العمل وخصوصاً عند التشكيل الساخن، وبالتالي زيادة القيمة المادية للقطعة.
- تصنيع قطع عمل لغاية الشكل النهائي المطلوب وخصوصاً مع التشكيل البارد وبهذا لا تتطلب أية عمليات إضافية مثل عمليات التشغيل، فضلاً على تحسين مقاومة المعدن نتيجة التصليد الإجهادي.
- في بعض عمليات التشكيل لا توجد أية فضلات (تلفيات Waste) في المعدن الخام، وبهذا تنخفض كُلف الإنتاج.

عمليات التشكيل الكتلوي الرئيسة تتضمن الآتي:

1. الدرفلة Rolling
2. الحدادة Forging
3. البثق Extrusion
4. السحب Drawing

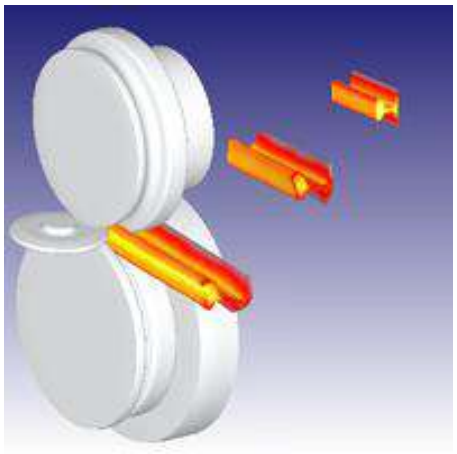
6-7 الدرفلة Rolling

هي عملية تشكيل المعدن بوساطة ضغط (عصر) قطعة العمل بين أسطوانتين، والأسطوانة هذه تسمى درفيل (Roller), حيث تدار الأسطوانتان باتجاهين متعاكسين لسحب قطعة العمل وضغطها بالتزامن، كما هو مبين في الشكل (7-1) الذي يوضح عملية درفلة مستوية، وتكون أقل مسافة بين الدرفيلين يساوي سمك قطعة العمل النهائي بعد تشكيله، وهنالك عمليات درفلة أخرى والتي يتم فيها تشكيل مقاطع وأشكال معينة مثل المقاطع الإنشائية، فيأخذ المنتج شكل الفراغ الذي يمكن أن يشكل بين الدرافيل المستخدمة بوساطة الحفر بشكل مجرى أو بأشكال خاصة بحسب الشكل المطلوب، كما هو مبين في الشكل (7-2) المجاور.



شكل 7-1 عملية الدرفلة المستوية

في عملية الدرفلة يتم تقليل سمك المعدن مع زيادة في طوله علماً أن الحجم يبقى ثابتاً ولا يتغير في أثناء عملية الدرفلة, وتُعد عملية الدرفلة خطوة أولية لإنتاج الأشكال المختلفة كالصفائح المعدنية ذات الأسماك المختلفة وإنتاج الشرائط المعدنية والقضبان والمقاطع الإنشائية بوساطة ماكنات درفلة خاصة.



شكل 7-2 عملية درفلة لإنتاج المقاطع الإنشائية

1-6-7 أنواع عمليات الدرفلة Rolling Processes Types

تتم عمليات درفلة المعادن أو السبائك المعدنية المختلفة بطريقتين أساسيتين هما:

1. الدرفلة على الساخن Hot Rolling
2. الدرفلة على البارد Cold Rolling

1-1-6-7 الدرفلة على الساخن Hot Rolling

تكون معظم عمليات الدرفلة تكون على الساخن لمتطلبات التغيرات الكبيرة التي يمكن إجراؤها على الأشكال الأولية، والمنتجات المشكلة بالدرفلة على الساخن تكون خالية من الإجهادات الداخلية وذات خواص متجانسة على عموم مقطع القطعة المدرفلة. قد تكون عمليات الدرفلة على الساخن بعدة مراحل، إذ تتضمن المرحلة الأولى تحويل الكتل الكبيرة إلى كتل ومقاطع متوسطة تليها المرحلة الثانية درفلة تلك المقاطع إلى مقاطع أصغر لغاية الوصول إلى السمك المطلوب، وكلها تتم بدرجات حرارة أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور، كما هو مبين في الشكل (7-3).

شكل 7-3 درفلة الكتل الكبيرة إلى مقاطع صغيرة على الساخن

2-1-6-7 الدرفلة على البارد Cold Rolling

قطع العمل المشكلة بالدرفلة على الساخن يعاد تشكيلها في عمليات إضافية بالدرفلة على البارد، فتستلزم في هذه الحالة ماكنات ذات قوة تشكيل كبيرة؛ لأن بعض الخواص الميكانيكية مثل المطيلية ونقطة الخضوع للمعدن لا تتغير في درجات الحرارة الاعتيادية كما يحصل عند العمل عندما يكون المعدن بدرجات حرارة عالية، بل العكس ستنخفض المطيلية وترتفع نقطة الخضوع كلما استمر العمل على البارد. ومن الجدير بالذكر قبل إجراء الدرفلة على البارد للمعادن المدرفلة على الساخن يجب التخلص من الأكاسيد المتكونة على السطح والشوائب الأخرى. وتمتاز المنتجات المشكلة على البارد بنعومة اسطحها ودقة عالية في أبعادها، فضلاً على تحسين الخواص الميكانيكية بسبب التصليد الانفعالي.

2-6-7 التحليل الهندسي للدرفلة المستوية Flat Rolling Analysis

في الدرفلة المستوية، قطعة العمل تضغط (تعصر) بين درفيلين لتقليل سمكها بمقدار يسمى اسِتدقاق Draft (d)، لاحظ الشكل (4-7).

$$d = t_1 - t_2 \qquad (7\text{-}1)$$

إذ أن: t_1 ، t_2 يمثلان السمك قبل الدرفلة وبعدها على التوالي.

غالباً ما يزداد طول قطعة العمل على حساب نقصان السمك وهذا ناتج من حقيقة ثبوت الحجم المستنبط من قانون حفظ الكتلة (Conservation of matter).

$$t_1 \times w_1 \times L_1 = t_2 \times w_2 \times L_2 \qquad (7\text{-}2)$$

إذ أن: w ، L يمثلان عرض قطعة العمل وطولها على التوالي.

معدل جهد الانسياب (Average Flow Stress) وحدة قياسه (MPa) والذي سيرمز له (Y_f) يستخدم لحساب مقدار قوى الضغط (F) المطلوب تسليطها من قبل الدرافيل على قطع العمل للحصول على التشكيل المطلوب ووحدة قياسه نيوتن (N)، فضلاً على حساب قدرة الدرافيل.

$$F = Y_f \times w \times L \qquad (7\text{-}3)$$

إن معدل جهد الانسياب سيعطى للطالب في هذه المرحلة الدراسية، وفي المراحل القادمة سيتمكن الطالب من حسابه بحسب علاقته مع الأصلاد الإجهادي ومعامل المقاومة. أما حاصل ضرب العرض (w)، والطول (L) هو عبارة عن مساحة تماس قطعة العمل مع الدرفيل، العرض سيعطى للطالب كمعلومة على افتراض عدم تغيره خلال عملية الدرفلة، ولكن طول التماس (L) سيتم حسابه من هذه العلاقة:

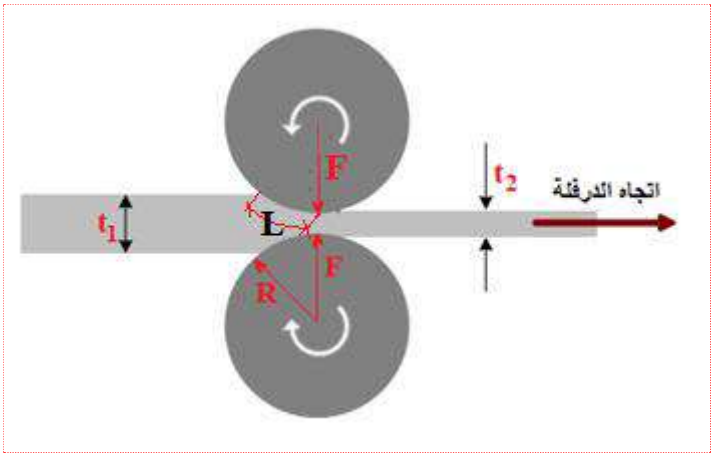
$$L = \sqrt{R \times d} \qquad (7\text{-}4)$$

إذ إن: (R) تمثل نصف قطر الدرفيل.

وأخيراً يمكن حساب القدرة Power (P) اللازمة لإنجاز التشكيل ووحدة قياسها واط (W) والمطلوبة لدرفيلين من العلاقة التالية المشتقة من العزم والسرعة الدورانية:

$$P = 2 \times \pi \times \frac{N}{60} \times F \times L \qquad (7\text{-}5)$$

إذ إن: π تمثل النسبة الثابتة، N تمثل السرعة الدورانية (rpm)



شكل 7-4 متغيرات عملية الدرفلة المستوية

مثال 1

صفيحة سميكة من الفولاذ واطئ الكاربون عرضها (300 mm) وسمكها (25 mm) وطولها (2 m)، شكلت بعملية درفلة بمرحلة واحدة، نصف قطر الدرفيل (250 mm)، اصبح سمكها (20 mm)، احسب الآتي:

1. مقدار الاستدقاق (Draft).
2. مقدار طول الصفيحة الجديد في حالة ثبوت عرضها.

الجواب

مقدار الاستدقاق هو الفرق بين السمك قبل الدرفلة والسمك بعد الدرفلة.

$$d = t_1 - t_2$$

$$d = 25 - 20 = 5\ mm$$

من حقيقة ثبوت الحجم في أثناء عمليات التشكيل بصورة عامة، وثبوت العرض في هذا المثال، بالإمكان إجراء تغيير بسيط على المعادلة (7-2) لتصبح:

$$t_1 \times l_1 = t_2 \times l_2$$

$$25 \times 2000 = 20 \times l_2$$

$$l_2 = 2500\ \text{mm} = 2.5\ \text{m}$$

مثال 2

لنفس المثال السابق، احسب مقدار قوى الضغط المطلوبة لدرفلة الصفيحة إلى السمك الجديد، إذا علمت أن معدل جهد الانسياب لهذه المادة هو (275 MPa).

الجواب

من المعادلة (7-3) يمكن حساب قوى الضغط المطلوبة، يجب تحويل وحدة قياس عرض الصفيحة وطول التماس إلى وحدات المتر بدلاً من المليمتر لغرض تجانس الوحدات في المعادلة.

$$F = Y_f \times w \times L$$

المطلوب حساب طول التماس (L) لغرض تطبيق المعادلة أعلاه.

$$L = \sqrt{R \times d}$$

$$L = \sqrt{250 \times 5} = 25\sqrt{2}\ mm$$

$$F = 275 \times \frac{300}{1000} \times \frac{25\sqrt{2}}{1000} = 2.92\ MN = 2.92 \times 10^6\ N$$

ملاحظة

في المثال أعلاه يتوضح كم هي قوى الضغط كبيرة تلك التي يجب تسليطها على قطعة العمل لغرض تشكيلها وخصوصاً مع هذه الأنواع من المواد المعدنية ذات المقاومة العالية، ولهذا يجب أن تكون أدوات العمل ومُعداتها في عمليات التشكيل بصورة عامة ذات خصائص ميكانيكية عالية جداً أي لها القدرة على تحمل هذه القوى العالية جداً.

مثال 3

لنفس المثال أعلاه، احسب القدرة المطلوبة لتدوير الدرفيلين، إذا علمت أن السرعة الدورانية للدرفيلين هي (20 rpm).

الجواب

لغرض تطبيق المعادلة (7-5) بشكل صحيح، يجب مجانسة الوحدات، وذلك بتبديل السرعة الدورانية إلى عدد الدورات بالثانية وليس بالدقيقة.

$$P = 2 \times \pi \times N \times F \times L$$

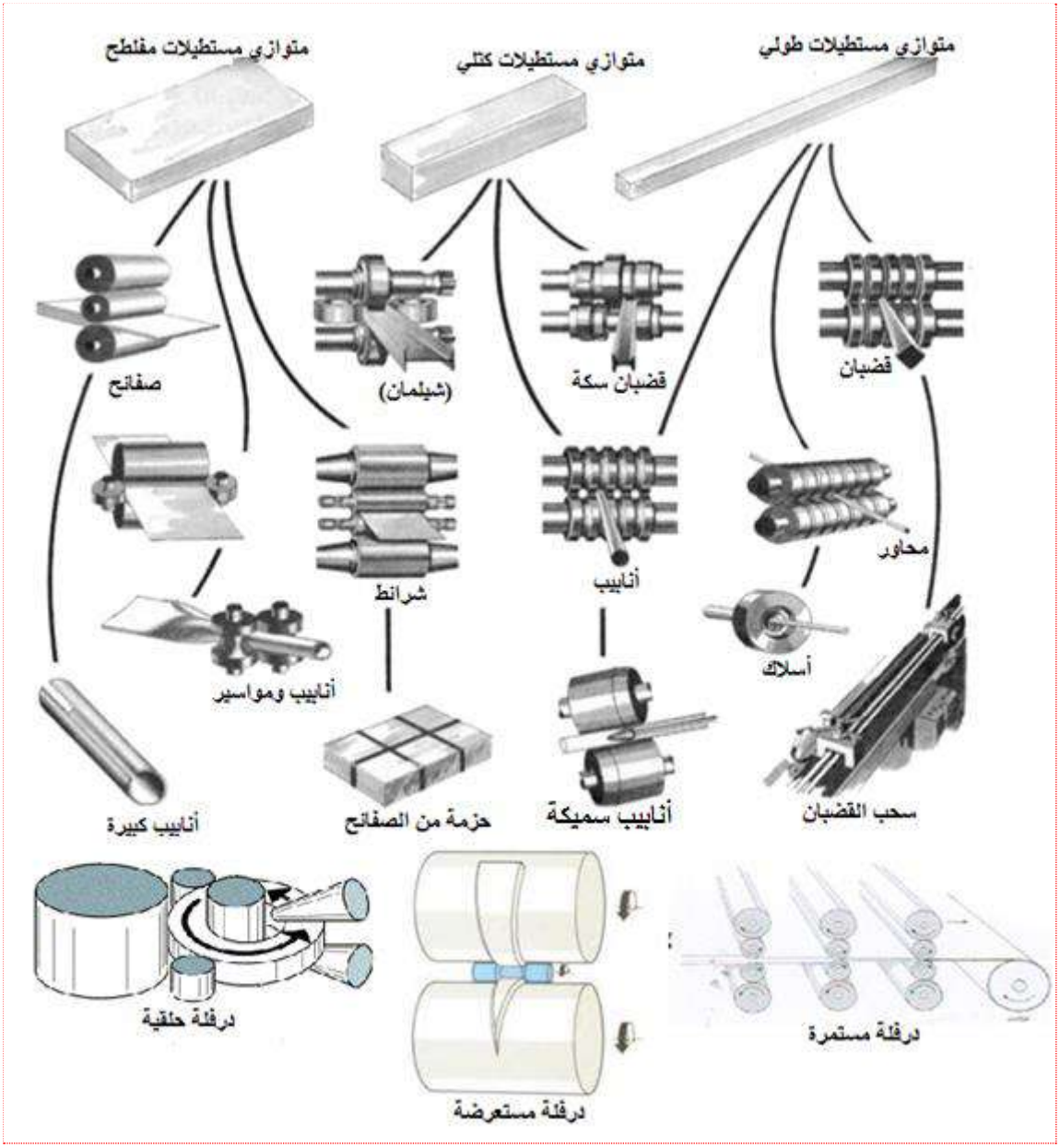
$$P = 2 \times \pi \times \frac{20}{60} \times 2.92 \times 10^6 \times \frac{25\sqrt{2}}{1000} = 216220\ W \approx 216\ kW$$

ملاحظة

لا تحتاج عملية التشكيل قوة ضغط كبيرة فقط، إنما قدرات هائلة لتدوير الدرافيل والمكابس وغيرها من مُعدات التشكيل، ولغرض تخفيض هذه القوى والقدرات يتم تنفيذ عمليات التشكيل بالساخن بدلاً من التشكيل البارد لتخفيض مقاومة المعدن للتشكيل، فضلاً على تنفيذ العمل بمراحل عديدة وليس بمرحلة واحدة.

3-6-7 تقنيات عملية الدرفلة Rolling Techniques

بسبب الأهمية الصناعية لعملية الدرفلة وقدرتها الإنتاجية العالية، ظهرت تقنيات عديدة من عمليات الدرفلة لإنتاج أشكال معقدة مثل عمليات الدرفلة المستمرة, والمستعرضة، ودرفلة الأشكال، ودرفلة المقاطع، والدرفلة الحلقية، ودرفلة المساحيق، ودرفلة الأسنان (Threaded)، والتروس، وأخيراً السباكة المستمرة والدرفلة على الساخن، ويُبين الشكل (7-5) الأنواع المختلفة لعملية الدرفلة ومبين فيها قطعة العمل الأولية (مسبوكات) ومنتجاتها.



شكل 7-5 عمليات درفلة مختلفة

4-6-7 مكائن الدرفلة Rolling Mills

تُستخدم مكائن مختلفة للدرفلة لمعالجة الطلب على تطبيقات معينة وبحسب المُنتج النهائي، ويتم تقسيم مكائن الدرفلة حسب عدد الدرافيل، ومن أنواعِها ماكنات الدرفلة الثنائية والدرفلة الثنائية العكسية والدرفلة الثلاثية والرباعية ومتعددة الدرافيل.

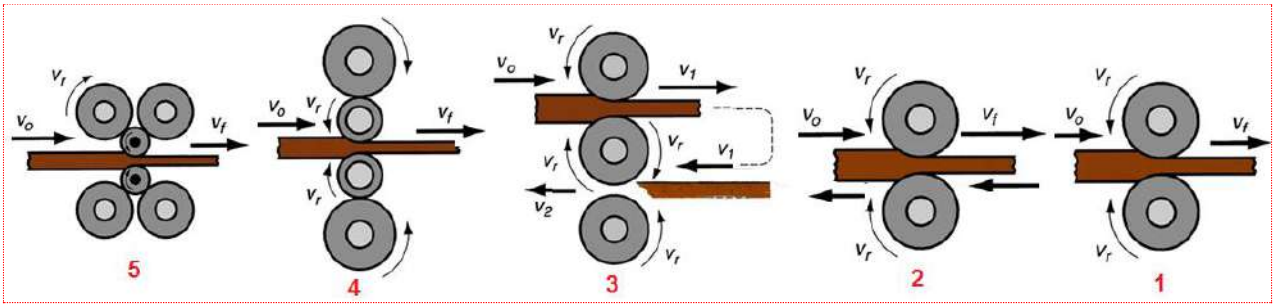
مـاكنة الدرفلة الثنائية: تتكون من درفيلين ثنائيين يدوران عكس بعضهما بعضاً لدرفلة المعدن باتجاه تغذية ثـابت، ولها أقطار بحدود (0.6-1.4 m).

ماكنة الدرفلة الثنائية العكسية: يستخدم رأسان مع إمكانية عكس اتجاه الدوران لكل درفيل، ويستخدم هذا النوع لإمكانيته من تغيير اتجاه تغذية قطعة العمل، على سبيل المثال القطعة المدرفلة للأمام يمكن أن تعاد إلى نفس الماكنة بعكس الاتجاه دون الحاجة إلى قلبها، وبالتالي تسهيل العمل والاستفادة من الوقت في حالة الدرفلة لأكثر من مرحلة، فضلاً على عدم الحاجة لعدد من مكائن الدرفلة لتوضع بالتتابع.

ماكنة الدرفلة الثـلاثية: تستعمل ثلاثة درافيل رأسية، إذ يمكن درفلة قطعة العمل خلال الدرفيلين الأول والثاني في اتجاه مُـحدد، ثم يعاد درفلة القطعة بين الدرفيلين الثاني والثالث في عكس الاتجاه، وهذا يسمح بعدد من مراحل تقليل سمك القطعة وبمقادير مختلفة لكل مرحلة، وذلك بتغيير المسافات البينية للدرافيل.

ماكنة ذات الدرافيل الأربعة: تُستعمل في الدرفلة على الساخن أو البـارد، وتتكون من درفيلين للتشكيل صغيري القطر للتحكم في أبعاد المنتج وتقليل القوى اللازمة لعملية الدرفلة، ويسندان بدرفيلين آخرين ذوي قطر أكبر.

ماكنة متعددة الدرافيل (Cluster Mill): تتكون من درفيلين للتشكيل بأقطار صغيرة يثبت حولهما الدرافيل الساندة، ويفضل استعمالها لدرفلة المقاطع الصغيرة وبأبعاد دقيقة والتشكيل يكون على البـارد، ويفضل استعمالها لدرفلة المواد الصلبة نسبياً، والشكل (7-6) يُبين أنواع المكائن المذكورة.



شكل 7-6 أنواع مكائن الدرفلة، (1) ماكنة درفلة ثنائية، (2) ماكنة درفلة ثنائية مع إمكانية عكس دورانها، (3) ماكنة درفلة ثلاثية، (4) ماكنة درفلة رباعية، (5) ماكنة متعددة الدرافيل

إذ إن: v_r ، v_0 ، v_f تمثل سرعة كل من الدرفيل، ودخول قطعة العمل وخروجها على التوالي، v_1 ، v_2 تمثل سرعة دخول المرحلة الثانية وخروجها على التوالي فقط في حالة ماكنة الدرفلة الثلاثية، علماً أن سرعة $v_f = v_1$

4-6-7 درفلة المقاطع المختلفة Rolling of Different Sections

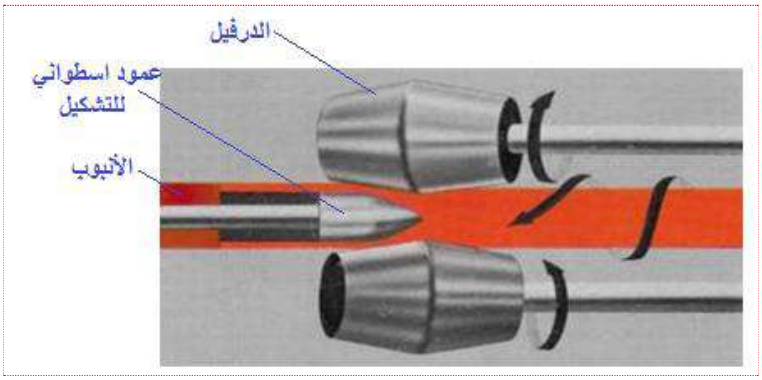
يمكن بعملية الدرفلة تشكيل مقاطع مختلفة الأشكال، كما هو موضح في الشكل (7-7).

شكل 7-7 مقاطع مدرفلة مختلفة الأشكال، يمين: مخطط، يسار: صور للمقاطع

1	مقطع على شكل حرف L (زاوية)	5	مقطع بحرف z
2	مقطع على شكل حرف T	6	مقطع سكة حديد
3	مقطع على شكل حرف I (شيلمان)	7	قضبان مستديرة
4	مقطع ساقية	9 ، 8	قضبان مربعة ، وقضبان سداسية

1-4-6-7 درفلة الأنابيب Pipe Rolling

يمكن إنتاج الأنابيب وخاصة الأنابيب سميكة الجدران بعملية درفلة ويتم ذلك باستعمال عمود أسطواني (Mandrel) مخروط الرأس لتشكيل القطر الداخلي للأنبوب، ووضعه بين درفيلين على شكل مخروط ناقص لغرض عصر المعدن على العمود فينساب المعدن على العمود ليكوّن أسطوانة مجوفة، كما هو موضح في الشكل (7-8).



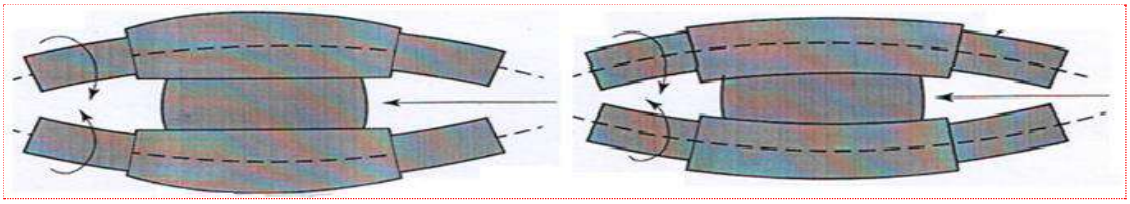
شكل 7-8 درفلة الأنابيب سميكة الجدران

5-6-7 العيوب في أثناء عملية الدرفلة Defects during Rolling

ترافق عملية الدرفلة بعض العيوب في المنتجات، ومسببات هذه العيوب هي:

1. انحناء الدرافيل Roll Bending (Camber)

يحصل هذا العيب بسبب قوى الضغط الهائلة والاحتكاك غير المنتظم مما يؤدي إلى حصول انحناء للدرفيل وخاصة في الوسط، والصفائح المشكلة تكون أكثر سمكاً في الوسط من الحافة، ولعلاج ذلك يعمل على تصميم الدرافيل بحيث يكون قطرها أكثر سمكاً في منطقة الوسط عن منطقة الأطراف، كما هو موضح في شكل (7-9)، فضلاً على التزييت الجيد والمنتظم.



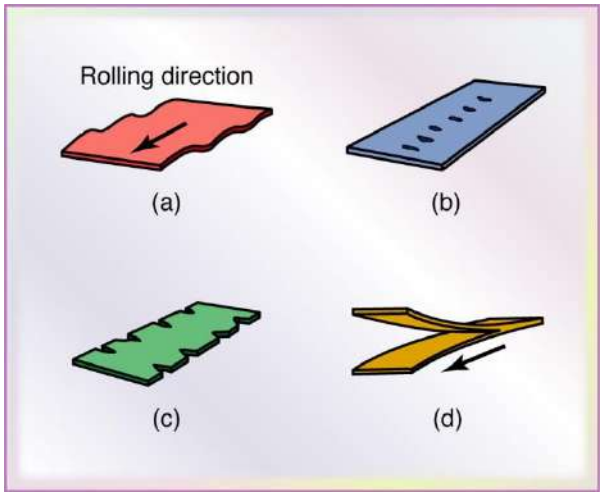
شكل 7-8 انحناء الدرافيل والعلاج

2. تفلطح الدرافيل Roll Flattening

تتفلطح الدرافيل بحالة مشابهة لتفلطح إطارات المركبات بسبب قوى الضغط الكبيرة والمسلطة على الدرافيل من قبل قطع العمل (المقاومة على التشكيل)، ما يزيد من قوى الضغط على الدرافيل وتزداد تشوهاً، ويؤدي ذلك إلى عدم السيطرة على سمك قطعة العمل بالكامل، ولعلاج هذا العيب يتم الآتي:

- تقليل الاستدقاق (d) لكل مرحلة ويعوض ذلك بزيادة مراحل التشكيل.
- تقليل السرعة الدورانية للدرافيل.
- التزييت الجيد والمنتظم.

هنالك عيوب أخرى تحصل في أثناء الدرفلة منها كما موضح في الشكل (7-10):



شكل 7-10 بعض عيوب الدرفلة

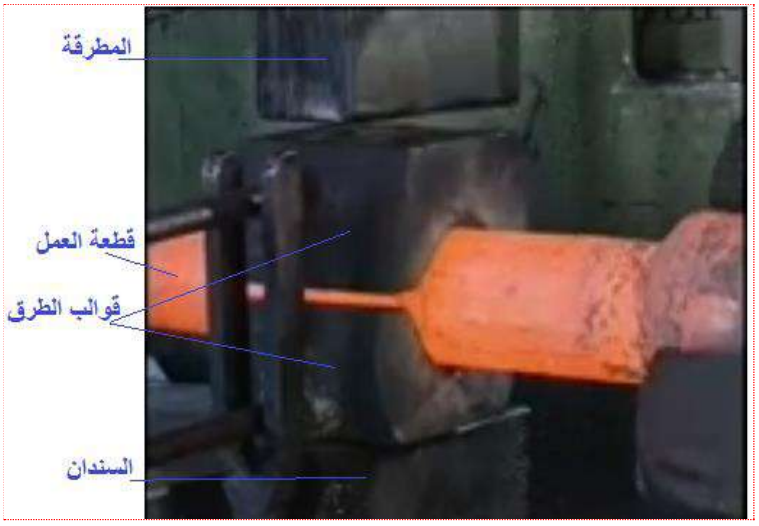
- تموج الحافات (a).
- شروخ في الوسط (b) وفي الحافات (c)
- تقبب (d).
- عيوب أخرى مثل زيادة العرض على حساب الطول (Spreading)، وعلامات سطحية، وعيوب لها علاقة بالدرفلة على الساخن مثل الأكسدة وغيرها.

7-7 الحدادة Forging

الحدادة هي عملية تشكيل المعادن بوساطة الطرق أو الكبس, وأغلب عمليات الحدادة تتم على الساخن. تنجز عملية الحدادة عن طريق كبس قطعة العمل بين زَهْرَة الحدادة (نصفي القالب) (Dies)، باستخدام إما ضربات سريعة ومفاجئة على سطح المعدن بوساطة المطرقة وتسمى بمطرقة الحدادة (Forging Hammer)، وإما بتعريض المعدن إلى قوة ضاغطة بطيئة السرعة بوساطة مكبس الحدادة (Forging Press). تُعد عمليات الحدادة من أقدم عمليات التشكيل التي استخدمها الإنسان (5000 BC) لعمل أدواته التي يحتاجها. وتُعد الحدادة اليوم إحدى أهم عمليات التشكيل لتصنيع الكثير من المنتجات ذات المقاومة العالية المستخدمة في صناعة وسائط النقل بكل أنواعها والصناعات الفضائية والتطبيقات الأخرى، هذه المنتجات تتضمن المحاور، الأعمدة المرفقة (Crankshafts)، التروس، المكونات الهيكلية، أجزاء المحركات النفاثة (التوربينية)، وغيرها من الصناعات الفولاذية والمعدنية الأخرى.

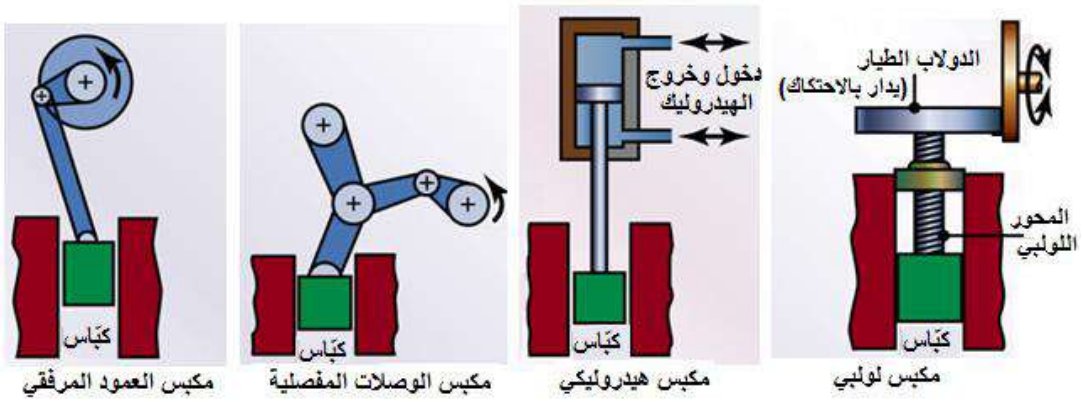
تتضمن المُعدات المستخدمة في الحدادة مجموعة من المكائن، تصنف على أساس المطارق، المكابس، قوالب (الضبعة) الحدادة. وهنالك مُعدات إضافية ساندة مثل الأفران لتسخين قطع العمل، أجهزة ميكانيكية للتحميل، محطات خاصة لقطع الزوائد والتنظيف من الأكسدة وغيرها.

تستخدم المطارق غالباً في قوالب الضبعة المغلقة، نصف العلوي للقالب يثبت، على المطرقة في حين يثبت النصف السفلي على السندان، في أثناء عملية الحدادة تثبت قطعة العمل على النصف السفلي للقالب، والمطرقة ترفع إلى الأعلى ومن ثم تسقط على قطعة العمل، عند اصطدام القالب العلوي بقطعة العمل، طاقة الصدمة ستجعل قطعة العمل تأخذ شكل تجويف القالب. تصنف المطارق إلى نوعين، مطارق تعمل بالجاذبية وأخرى تعمل بالطاقة. احدى مساوئ المطارق هي انتقال طاقة كبيرة إلى أرض بناية المعمل من خلال السندان، كما هو موضح في الشكل (7-11).



شكل 7-11 الحدادة بالمطرقة على الساخن

تسلط المكابس ضغطاً تدريجياً بدلاً عن الصدمة المفاجئة لغرض إنجاز عملية التشكيل بالحدادة. مكابس الحدادة تتضمن مكابس ميكانيكية، مكابس هيدروليكية، ومكابس لولبية، كما هو موضح في الشكل (7-12-أ). وتعمل المكابس الميكانيكية بوساطة دولاب لا مركزي أو عمود المرفقي أو الوصلات المفصلية، التي تحول الحركة الدورانية للمحركات إلى حركة خطية انتقالية للمكبس وهي غالباً ما تستعمل في إنتاج المسكوكات المعدنية. المكابس الهيدروليكية واللولبية تعملان بسرعة واطئة نسبياً وتجهزان قوة ضغط ثابتة، الشكل (7-12-ب) يوضح مكبساً كبيراً.



-أ- أنواع آليات عمل مكابس الحدادة

-ب- مكبس كبير يعمل بالحدادة على الساخن

شكل 7-12 الحدادة بالمكابس

1-7-7 تصنيف عمليات الحدادة Forging Processes Classification

تنجز عمليات الحدادة بطرائق مختلفة متعددة، إحدى تصنيفات عمليات الحدادة هي درجة حرارة قطعة العمل، معظم عمليات الحدادة تنجز على الساخن لتقليل مقاومة المعدن للتشكيل الذي عادةً ما يكون بنسبة عاليةً نوعاً ما، ويمكن بذلك تقليل قوى الضغط المطلوبة للتشكيل المطلوب، ومع هذا عمليات الحدادة على البارد مألوفةً لمنتجات معينة. مزايا الحدادة على البارد هي الحصول على منتجات عالية المقاومة وخواص ميكانيكية محددة الاتجاه وأبعاد دقيقة، فضلاً على الإنهاءات المرغوبة والجيدة للسطوح. هنالك تصنيف آخر للحدادة، هي الحدادة بالطرق والحدادة بالكبس، وبالأحرى هذا ليس بتصنيف لتكنولوجيا العملية بل يعتمد على نوعية المكائن فقط. مكائن الحدادة بالطرق تسلط قوى الضغط بشكل صدمة على قطعة العمل، أما مكائن الكبس فيكون تسليط قوى الضغط تدريجياً.

هنالك تصنيف آخر لعمليات الحدادة يعتمد على نوع القالب المستخدم في عملية الحدادة، بعبارة أخرى حرية معدن قطعة العمل من الانسياب وهذه الأنواع هي:

- **حدادة القوالب المفتوحة Open-Die Forging**
- **حدادة القوالب المغلقة Closed-Die Forging**

1-1-7-7 حدادة القوالب المفتوحة Open –Die Forging

تنجز عملية الحدادة هذه في قوالب مسطحة أو قوالب ذات شكل بسيط، لذا يسمح بحرية انسياب المعدن بالاتجاه الجانبي نسبة إلى سطح القالب (الأفقي) بدون أي محددات، عادة تكون قطع العمل أسطوانية الشكل، وبعملية الحدادة يزداد قطر مقطع الأسطوانة (قطعة العمل) على حساب نقصان ارتفاعها، تستخدم هذه الطريقة غالباً للأحجام الكبيرة أو عندما يكون عدد الأجزاء المنتجة قليلاً وكذلك تستخدم هذه الطريقة في التهيئة الأولية (القبلية) للحدادة بالقوالب المغلقة أو قوالب الضبعة وتسمى حدادة التهيئة (Fullering)، وهنالك عمليات أخرى لعمليات الحدادة بالقوالب المفتوحة تتضمن التحديد لحافات قطع العمل (Edging)، وحدادة تصغير المقطع لزيادة طول قطع العمل (Cogging) كما هو مبين في الشكل (7-13- أ).

2-1-7-7 حدادة القوالب المغلقة Closed-Die Forging

في هذه الطريقة يتم تشكيل القطعة بين نصفي القالب، إذ تشكل القطعة تحت تأثير ضغط عالٍ في التجويف المغلق ويأخذ المنتج شكل القالب، تمتاز المنتجات التي يتم الحصول عليها بهذه الطريقة بدقة الأبعاد.

وهنالك نوعان من الحدادة بالقوالب المغلقة:

1. **الحدادة بقوالب الضبعة (الطبعة) Impression-Die Forging**
2. **الحدادة بالقوالب المغلقة الفعلية True Closed- Die Forging**

تصمم قوالب الضبعة بالشكل المعاكس للمنتج لغرض تكوين تجويف يشابه المنتج المطلوب، وتنجز عملية الحدادة بعدة مراحل تبدء بإدخال قطعة العمل بين نصفي القالب ومن ثم يتم ضغطها جزئياً كمرحلة أولى ومن ثم يتم ضغطها إلى الشكل النهائي المطلوب وفي هذه المرحلة تتكون زوائد جانبية من انسياب جزء صغير من معدن قطعة العمل في الخلوص المصمم بين نصفي القالب عند انغلاقهما (الموقع النهائي للقالب)، لاحظ الشكل (7-13-ب).

وبالرغم من إجراء عمليات إضافية لغرض التخلص من هذه الزوائد في المنتج، ولكن في حقيقة الأمر لهذه الزوائد وظائف وفوائد مهمة منها تمنع هذه الزوائد من انسياب معدن قطعة العمل إلى خارج القالب وخصوصاً في الحدادة على الساخن.

ملاحظة

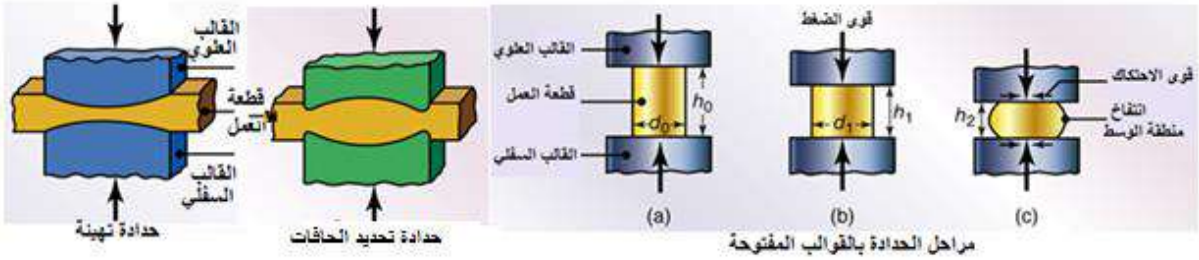
ما هو الغرض من تصميم نصفي القالب بشكل عدم غلق تام؟

الجواب وذلك للسماح لمعدن قطعة العمل الزائد بالخروج من بين نصفي القالب، وفي هذا الخصوص يتبادر سؤال آخر، ولماذا لم يتم وضع قطعة عمل بحجم يساوي تجويف القالب؟

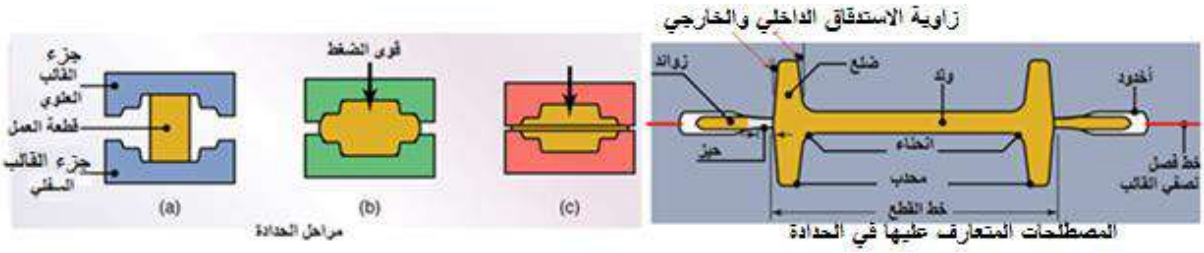
الجواب هو لإعطاء مرونة في تصميم القالب وزيادة عمره التشغيلي، فضلاً على عدم حدوث عيوب مثل الشروخ وغيرها في المنتجات أو فشل وانهيار القوالب نتيجة الضغوط العالية جداً التي يتعرض لها معدن قطعة العمل أو معدن القالب في حالة غلق القالب بشكل تام.

أما القوالب المغلقة بشكل تام فهي لا تسمح بتكون الزوائد ولهذا تسمى في بعض المصادر العلمية الحدادة بدون زوائد (Flashless Forging) أو الحدادة الدقيقة (Precision Forging)، في هذا النوع من الحدادة تكون القوالب مصممة بدقة متناهية ويكون حجم التجويف مساوياً بالضبط لحجم المنتج المطلوب، وإن معدن قطعة العمل يكون بالكامل محصوراً داخل تجويف القالب، كما هو مبين في الشكل (7-13-ج). السيطرة المتناهية في هذه العملية مطلوبة جداً وليس كما هو في الأنواع الأخرى من الحدادة، لأن أي خطأ في حجم قطعة العمل وإن كان صغيراً جداً سيؤدي إلى فشل وانهيار القوالب أو عدم تشكيل قطعة العمل حسب التصميم المطلوب. التطبيق المهم في هذا النوع هو تشكيل وإنتاج العملات النقدية.

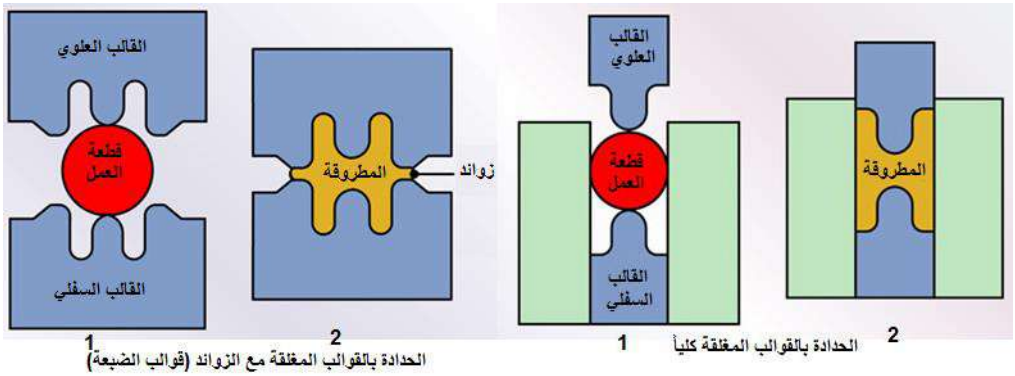
مما تم ذكره، فإن عملية الحدادة تجري بأكثر من مرحلة للوصول إلى المنتج النهائي، وذلك لتقليل القوى والقدرات اللازمة للتشكيل، فضلاً على الاعتبارات التصميمية للقوالب. والشكل (7-14) يبين مراحل إنتاج ذراع مكبس يستعمل في مكائن الاحتراق الداخلي.



-أ- حدادة لأسطوانة صلدة بالقوالب المفتوحة

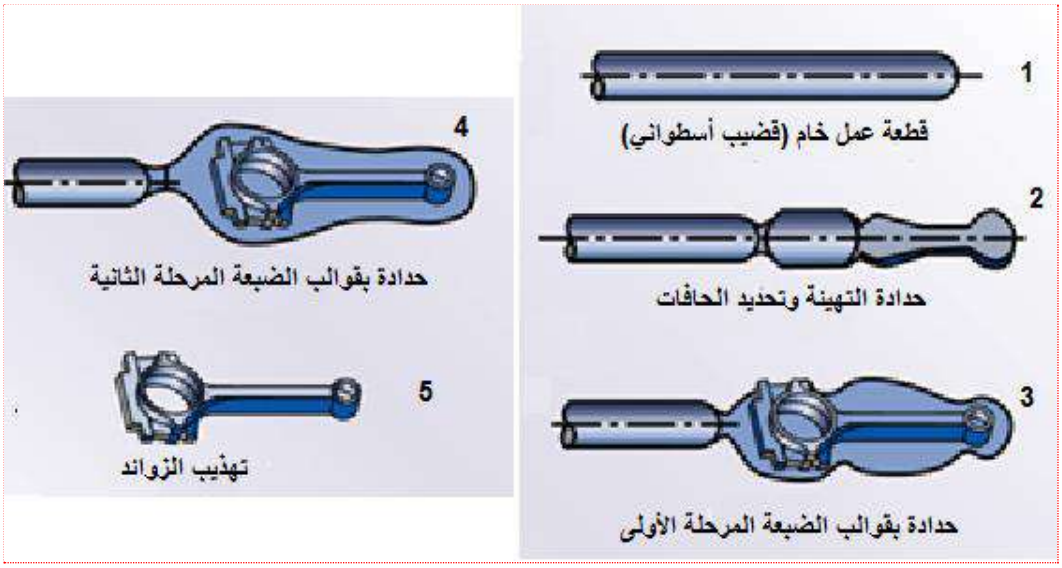


-ب- حدادة بقوالب الضبعة



-ج- الحدادة بالقوالب المغلقة، اليمين: مغلقة كلياً، اليسار: قوالب الضبعة

شكل (7-13) أنواع قوالب الحدادة



شكل 7-14 مراحل التشكيل الحدادي لتصنيع ذراع مكبس

2-7-7 مميزات ومحددات الحدادة Advantages & Disadvantages of Forging

تمتاز عمليات الحدادة بالمميزات العامة الآتية:

1. منتجات الحدادة ذات خواص ميكانيكية عالية، أفضل من المنتجات المصنعة بطريقة التشغيل أو السباكة.
2. جودة عالية في إنهاءات السطح.
3. إمكانية الحصول على منتجات لحد الشكل النهائي المطلوب ودقيقة الأبعاد.
4. إنتاجية عالية جداً.

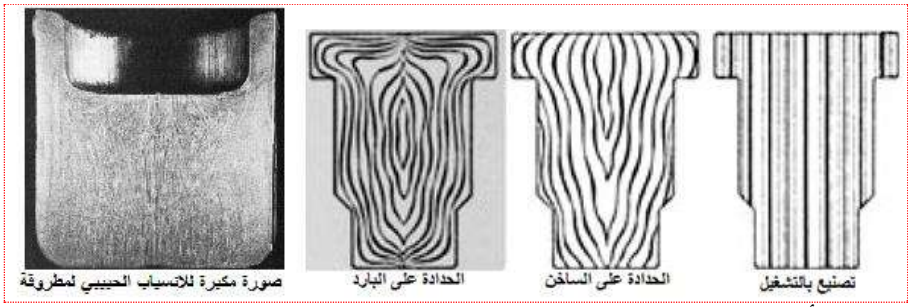
أما محددات أو سلبيات الحدادة فهي كالآتي:

1. كُلفة المُعدات والمكائن عالية، فضلاً على الكلفة التشغيلية.
2. إمكانية العمل مع بعض المعادن والسبائك التي تمتلك خواص ميكانيكية محددة مثل المطيلية والمتانة العاليتين.
3. تتطلب عمالة ماهرة.

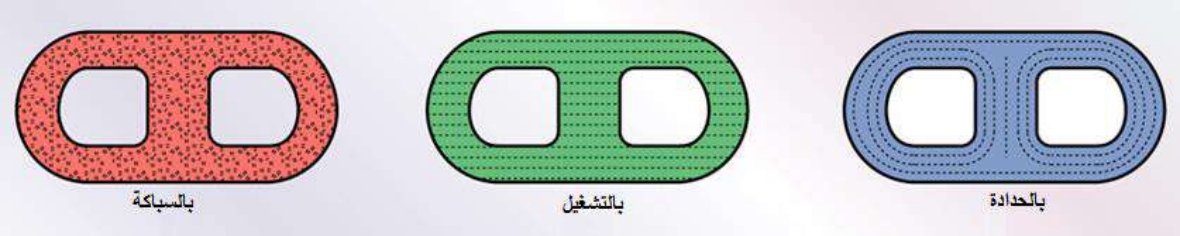
3-7-7 خصائص المعادن المشكلة بالحدادة Metal Characteristics for Forged Products

في تطبيقات الحدادة المفتوحة على الساخن هنالك ظاهرة الانتفاخ السلبية وهي انتفاخ منطقة وسط قطعة العمل وأسبابها هي: 1) معامل احتكاك عالٍ بين قطعة العمل والقالب، 2) انتقال الحرارة من قطعة العمل الساخنة إلى القالب البارد سريع جداً، ما يسبب انخفاضاً كبيراً في درجة حرارة المناطق القريبة من القالب وبالتالي تكون هنالك مقاومة عالية للتشكيل مما في منطقة الوسط الساخنة، هذه الحالة تزداد عند زيادة نسبة القطر إلى الارتفاع لقطعة العمل بسبب زيادة مساحة التلامس. ويمكن معالجتها بتسخين القالب، لاحظ الشكل (7-12-أ) السابق. من المعروف أنه يمكن تصنيع منتج معين بأكثر من طريقة وأسلوب، تتميز القطعة المنتجة بالحدادة من مثيلاتها المنتجة بالتشغيل أو بالسباكة للشكل، بالآتي:

- وقت العمل أقصر، وبالتالي إنتاجية أعلى.
- عدم وجود تلفيات في المعدن، وبالتالي كلفة اقتصادية أفضل.
- خواص ميكانيكية أفضل وخصوصاً المقاومة.
- التركيب الداخلي (البلورات الحبيبية) للمعدن مرتب باتجاهات مفضلة لتتوافق مع الإجهادات التي تسلط على المنتج في أثناء الخدمة، وهذه ميزة مهمة لا يمكن حصولها في حالة التصنيع بطرائق غير الحدادة، إلا بمعالجات خاصة مُكلفة وتحتاج إلى وقت إضافي، وبهذا تصبح العملية غير إنتاجية. والشكل (7-15-أ) يبين مقارنة ما بين الانسياب الحبيبي لقطعة مصنعة بالتشغيل وقطعتين بالحدادة إحداهما على الساخن والأخرى على البارد، إذ يتبين أن التشكيل بالحدادة على البارد يعطي انسياباً حبيبياً أفضل من غيره، والشكل (7-15-ب) يوضح مقارنة للانسياب الحبيبي لقطع مصنعة بالسباكة وبالتشغيل وبالحدادة، ويتوضح أن أفضل انسياب هو للقطعة المصنعة بالحدادة.



-أ- مقارنة للانسياب الحبيبي ما بين التشغيل ونوعي الحدادة



-ب- مقارنة للانسياب الحبيبي ما بين التشغيل والسباكة والحدادة

شكل 7-15 مقارنات مختلفة للانسياب الحبيبي

يمكن الحصول على منتجات هائلة جداً بوساطة طرائق الحدادة المختلفة، ويبين الشكل (7-15-أ) بعض منتجات الحدادة المعروفة، كذلك الشكل (7-15-ب) يبين مسكوكات معدنية حديثة مصنعة بطريقة الحدادة بقوالب الضبعة.

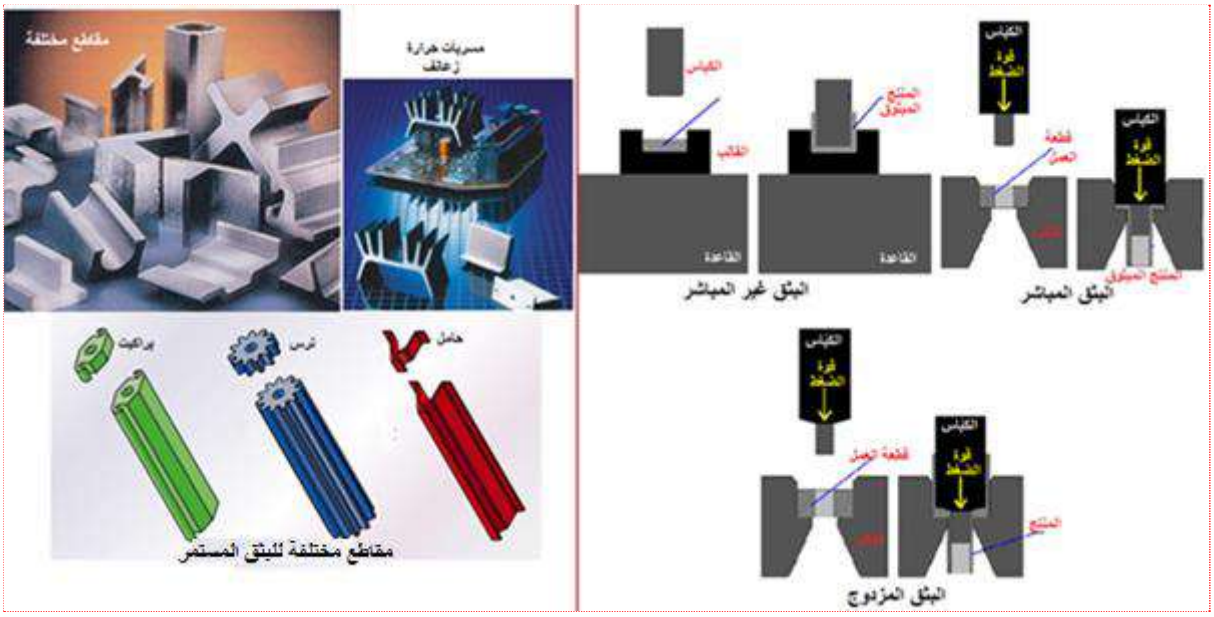
شكل 7-16 بعض منتجات الحدادة بالطرق أو الكبس

8-7 بثق المعادن Metal Extrusion

عملية البثق هي إحدى عمليات تشكيل المعادن، إذ يتم خلالها تقليل كبير لمساحة مقطع قطعة العمل، عن طريق تسليط ضغط عالٍ على معدن قطعة العمل وإجباره على الانسياب من خلال فتحة (تجويف) القالب الذي يأخذ شكل المنتج المبثوق المطلوب، العملية تشابه عصر معجون الأسنان وإخراجه من فتحة الحاوية (العصارة). تستخدم عملية البثق بشكل واسع في إنتاج الأعمدة والأنابيب والمقاطع المعقدة التي تستخدم في صناعة الطائرات والمركبات وغيرها من الصناعات.

1-8-7 أنواع عمليات البثق Types of Extrusion

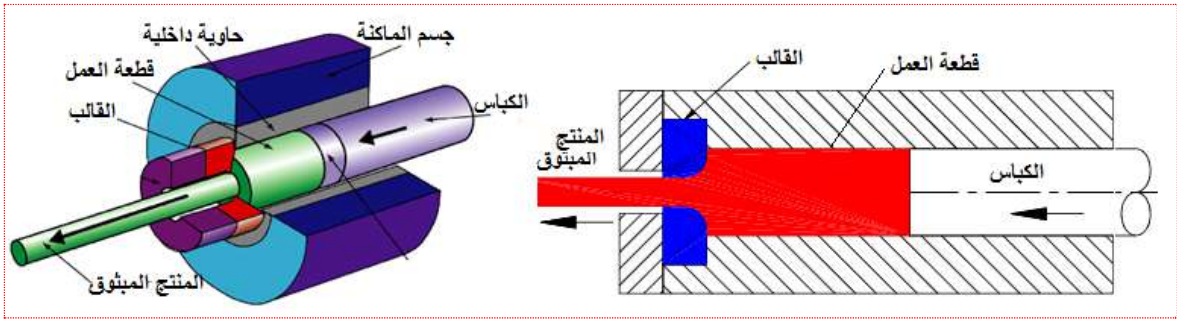
عمليات البثق تتم بطرائق مختلفة، إحدى أهم التمييز بين الطرائق هو البثق المباشر والبثق غير المباشر (Direct and Indirect Extrusion). وتصنيف آخر يعتمد على درجة حرارة قطعة العمل، البثق على البارد والبثق على الساخن، يستعمل البثق على الساخن لمعادن الألمُنيوم، النحاس، المغنسيوم، الخارصين، القصدير، سبائك هذه المعادن، وفي بعض الأحيان يتم بثقها على البارد. تبثق سبائك الفولاذ غالباً على الساخن. وتصنف الطرائق على أساس البثق المستمر وغير المستمر (المتقطع)، في البثق المستمر يمكن تشكيل مقطع طويل بدفعة واحدة ويتم تقطيعه إلى عدد معين بحسب التصميم المطلوب بعملية إضافية، أما البثق غير المستمر هو إنتاج قطعة واحدة لكل دفعة، والشكل (7-17) يبين أنواع عمليات البثق وبعض منتجاتها المختلفة. وهنالك طرائق خاصة لها علاقة بالبثق المباشر وغير المباشر تعتمد على نوعية العملية كما هو الحال في البثق الصدمي والبثق الهيدروستاتيكي.



الشكل 7-17 عمليات البثق، اليمين: طرائق البثق، اليسار: بعض منتجات البثق

7-1-8-1 البثق المباشر Direct Extrusion

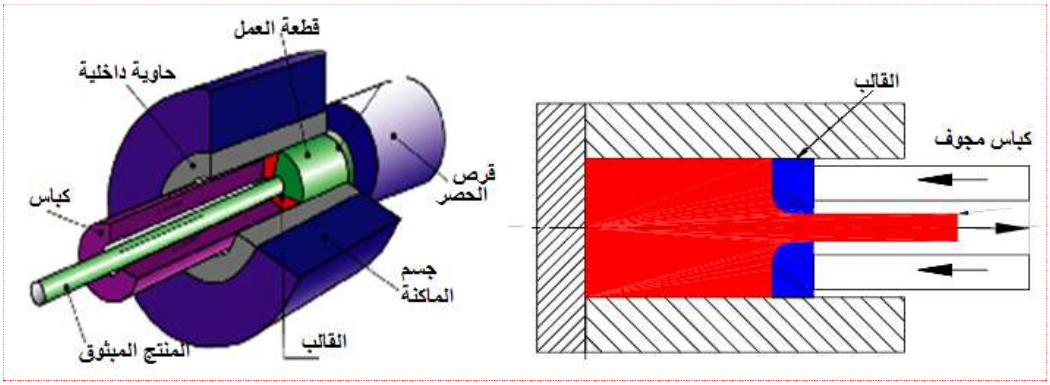
يسمى أحياناً البثق الأمامي (Forward Extrusion)، يُعد البثق المباشر من أكثر أنواع البثق انتشاراً حيث ينساب المعدن خارج فتحة القالب باتجاه حركة المكبس، كما هو مبين في الشكل (7-18). تحتاج عملية البثق هذه إلى قوة كبيرة بسبب احتكاك معدن قطعة العمل بالجدار الداخلي للحاوية لذلك يتم استعمال التزييت لتقليل الاحتكاك، وإن قوة الاحتكاك هذه ستتضاعف في حالة البثق على الساخن بسبب وجود القشرة الأوكسيدية على سطح قطعة العمل، والتي ستسبب أيضاً عيوب في المنتج المبثوق، وعادةً ما يبقى جزء صغير من المعدن الأساس داخل الحاوية الداخلية بدون بثق، بسبب انسياب المعدن إلى الأمام وخروجه من فتحة القالب الصغيرة، وتُعد هذه فضلة (خسائر بالمادة). وتُجهز قطع العمل على شكل كتل أسطوانية مصمتة، ولكن المنتجات ستأخذ أشكالاً بحسب شكل فتحة القالب ويمكن أيضاً تشكيل منتجات مبثوقة مجوفة بتحوير الكباس وإضافة محور إليه.



شكل 7-18 البثق المباشر

7-1-8-2 البثق غير المباشر Indirect Extrusion

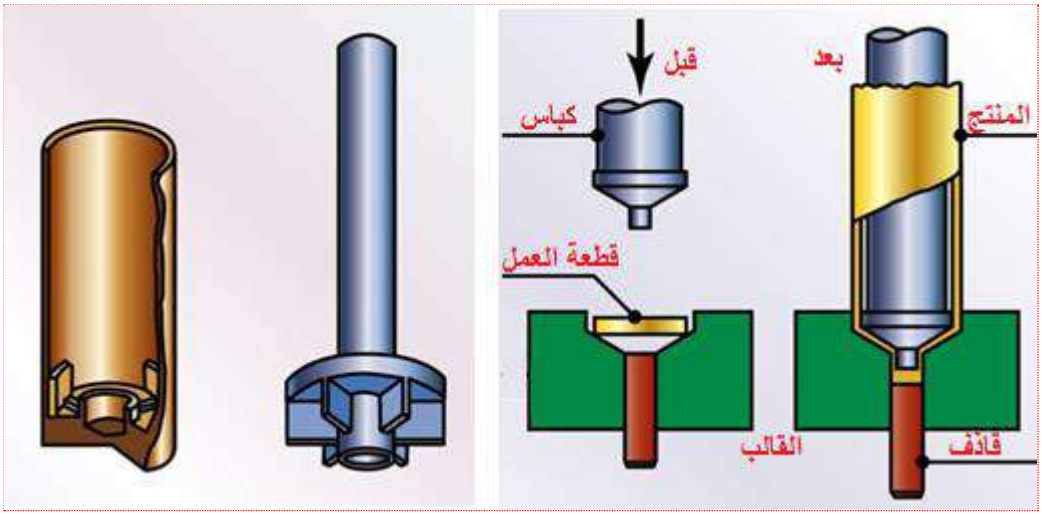
يعرف أيضاً بالبثق الخلفي والبثق العكسي (Backward or Reverse Extrusion)، وفيه ينساب المعدن خارج فتحة القالب بعكس اتجاه حركة المكبس، في هذه الطريقة يقل الاحتكاك بين المعدن والحاوية بسبب عدم وجود حركة نسبية بينهما فيكون بذلك الضغط المطلوب أقل مما هو عليه في الضغط المباشر. ويمكن إنتاج مقاطع مجوفة أو شبه مجوفه، كما هو مبين في الشكل (7-19). عملياً هنالك مشكلة في أسناد المنتجات المبثوقة الطويلة بهذه الطريقة وتُعد هذه المشكلة إحدى محدداتها.



شكل 7-19 البثق غير المباشر

3-1-8-7 البثق الصدمي Impact Extrusion

يتم هذا النوع من البثق باستخدام مكابس ميكانيكية تعمل بسرع عالية وأشواط قصيرة، لإنتاج قطع مفردة، ولهذا يُعد البثق الصدمي بنوع البثق غير المستمر. ويتضح من تسمية العملية، إن الكباس يضغط قطعة العمل على شكل صدمة وليس بشكل تسليط ضغط تدريجي، وممكن أن يكون البثق الصدمي إما أمامياً أو خلفياً وهي الأكثر تطبيقاً، كما هو مبين في الشكل (7-20). في بعض الأحيان يكون البثق مزدوجاً (أمامياً وخلفياً). غالباً ما يكون البثق الصدمي على البارد، والمعادن المستعملة هي الألُمنيوم والنحاس. تستعمل هذه الطريقة لإنتاج علب المعجون، وحاويات البطاريات، وعلب معدنية مختلفة وخصوصاً الحاويات ذات الجدران الرقيقة مثل حاويات معطر الجسم المعدنية وعلب المشروبات الغازية، كما هو مبين في الشكل (7-12).

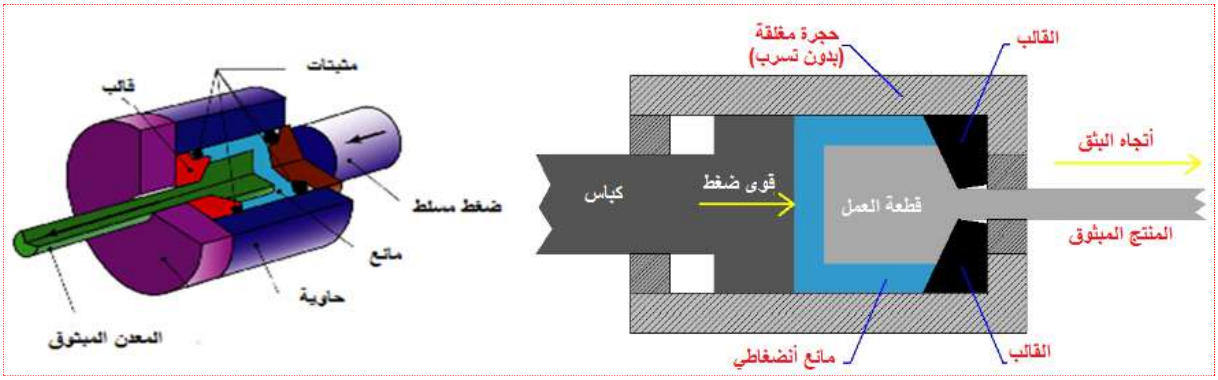


شكل 7-20 البثق الصدمي، اليمين مخطط العملية، اليسار منتجات البثق الصدمي

شكل 7-21 حاويات وعلب مختلفة مشكلة بالبثق الصدمي

4-1-8-7 البثق الهيدروستاتيكي Hydrostatic Extrusion

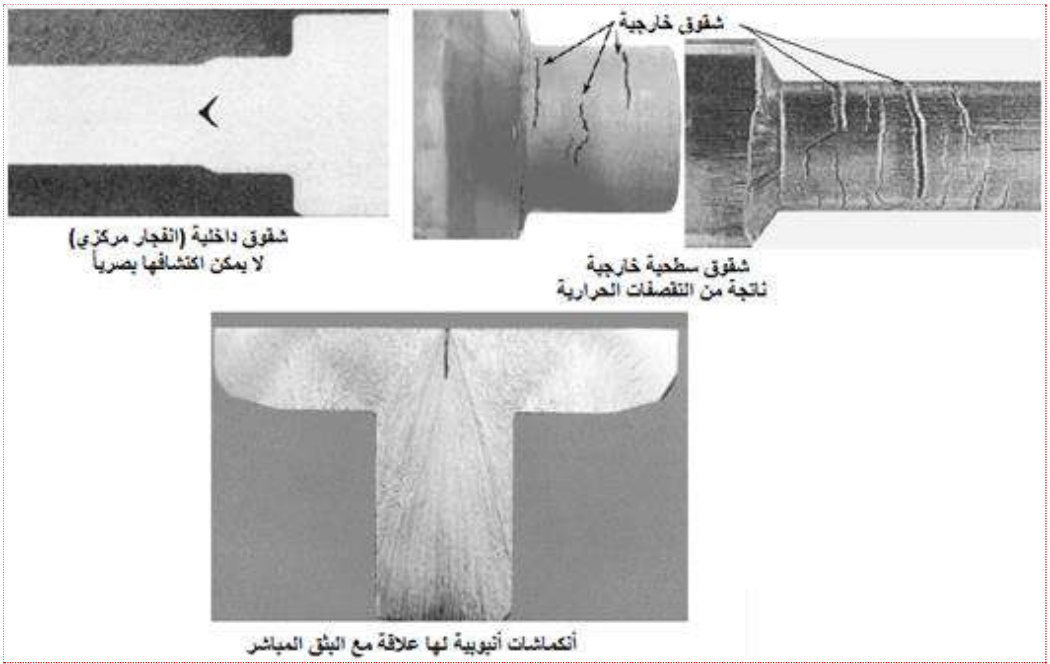
يعتمد هذا النوع من البثق على الضغط الذي يسلطه المائع على قطعة العمل، وهي طريقة حديثة نسبياً، إذ يتم بثق الخامة دون أن يكون لها أي تماس مع جدار الحاوية ويقتصر التماس مع القالب فقط وبقوى احتكاكية أقل من البثق المباشر، فضلاً على انخفاض قوة ضغط الكباس، وذلك بوجود تزييت جيد ناتج عن مرور طبقة من المائع على محيط الخامة إلى داخل القالب، ويفضل استخدام هذه الطريقة للمعادن الهشة، وكذلك يمكن أن تستخدم للمعادن المطيلية وبزيادة عالية في نسبة التشكيل. مساوئ هذه الطريقة هي الوقت الطويل نسبياً لتحضير عينة قطعة العمل. الشكل (7-22) يوضح طريقة البثق الهيدروستاتيكي.



شكل 7-22 طريقة البثق الهيدروستاتيكي

2-8-7 عيوب عملية البثق Defect in Extrusion Process

إن من أهم العيوب التي قد تتكون في عمليات البثق المختلفة موضحة في الشكل (7-23).



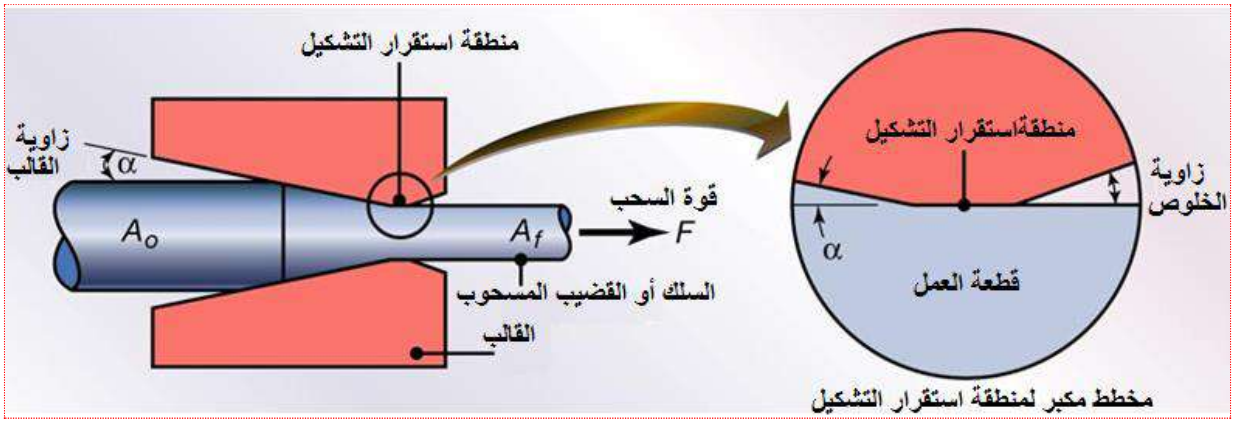
شكل 7-23 يوضح عيوب البثق

9-7 السحب Drawing

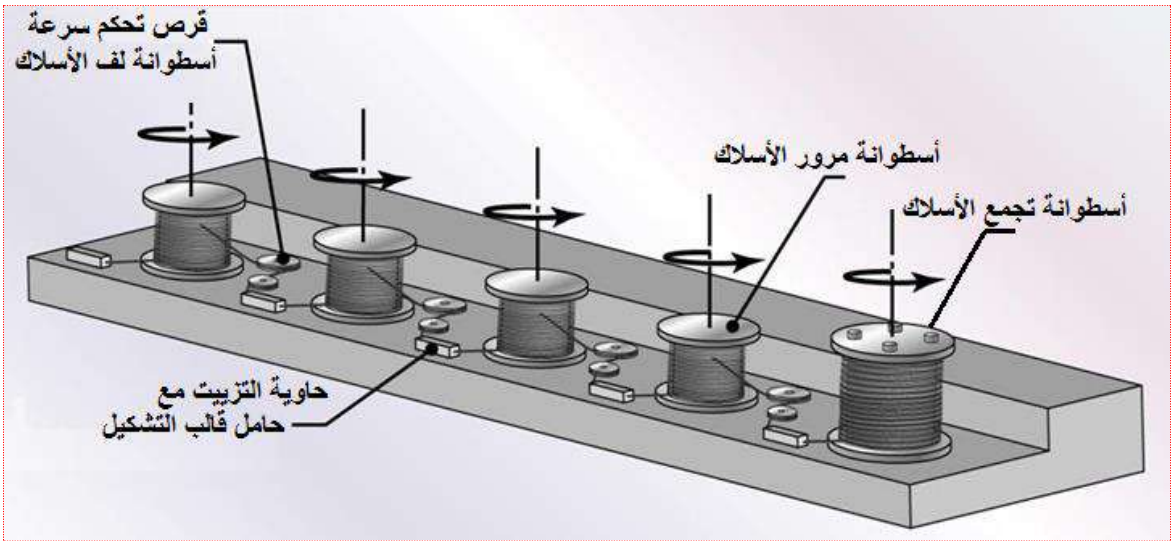
عملية السحب هي إحدى عمليات التشكيل وتستخدم عملية السحب في مجالات متعددة وخاصة في إنتاج الأسلاك والأنابيب والقضبان ذات المقاطع المختلفة. فيحصل في عملية السحب نقصان في مساحة مقطع الجزء وزيادة في طوله من خلال سحبه من فتحة القالب التي يكون قطرها الداخلي أصغر من قطر قطعة العمل المراد تشكيله، وعادة تتم عملية السحب من خلال قالب (Die)، كما هو موضح في شكل (7-24)، أو عدة قوالب تخفيض متدرجة. وعملية السحب مشابهة لعملية البثق، والفرق فيما بينهما أن في عملية السحب تسحب قطعة العمل في حين في عملية البثق تدفع قطعة العمل من خلال فتحة القالب. تحمل قطعة العمل إلى جهود الشد يجب أن تأخذ بالاعتبار، فضلاً على جهود الضغط التي تتحملها قطعة العمل في منطقة التشكيل (فتحة القالب).

الفرق الرئيس بين عمليتي سحب الأسلاك وسحب القضبان هو في قطر قطعة العمل (الخام)، إذ تكون صغيرة في الأولى، ويمكن إنتاج أسلاك بهذه الطريقة بأقطار صغيرة تصل لحد (0.03 mm) لأسلاك قطرها يبدأ من (8 mm). يكون الإنتاج في سحب القضبان متقطعاً (مفرداً لكل عملية)، أما الأسلاك فيكون الإنتاج مستمراً قد تصل أطوالها مئات الأمتار أو أكثر ولهذا تُلّف الأسلاك بشكل ملف في أثناء العملية، وتحتاج إلى مراحل عديدة ما بين (4-12) قالباً لإنجاز العمل، كما هو موضح في الشكل (7-25). تتضمن العوامل المؤثرة على قوة السحب زاوية القالب، نقصان مساحة المقطع لكل مرحلة، سرعة السحب، درجة حرارة العمل، والتزييت المناسب.

تبدأ عملية سحب الأسلاك عن طريق أخذ طرف من السلك ويخفض قطره ويدبب ويمرر من خلال ثقب القالب ويثبت بأسطوانة السحب ومن خلال دوران الأسطوانة يتحرك السلك داخل فتحة القالب لتتم عملية السحب وصولاً إلى القطر المطلوب.



شكل 7-24 عملية سحب القضبان والأسلاك



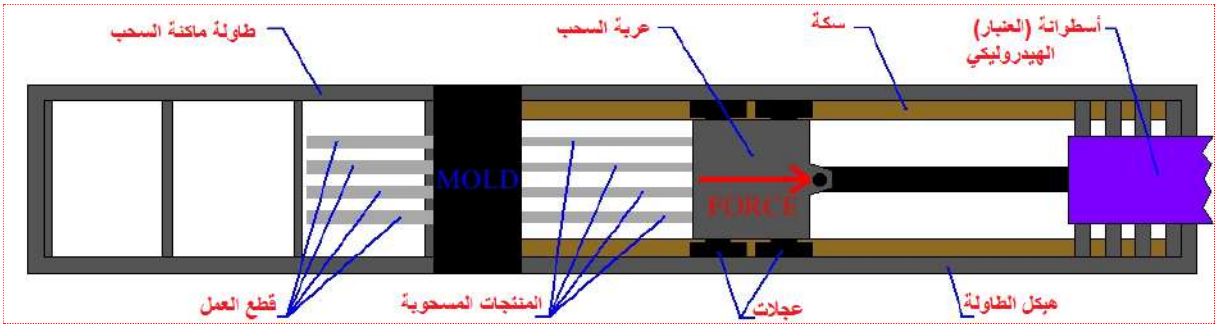
شكل 7-25 عملية سحب الأسلاك بمجموعة مراحل

7-9-1 قوالب السحب Draw Dies

تصمم قوالب السحب بدقة عالية تتوافق مع عملية الإنتاج السريع التي قد تصل إلى (50 m/s)، إذ تتضمن مجموعة من المناطق مختلفة الشكل والمقطع لتسمح بمرور الأسلاك أو القضبان من خلالها وتصغير مساحة مقطعها وإعطائها المقطع الثابت المطلوب وتسمح أيضاً بالتزييت المستمر في منطقة التشكيل. تُصنع قوالب سحب الأسلاك والقضبان من مواد ذات صلادة عالية مثل فولاذ العُدد أو تنكستن كارباید أو ما شابه، الشكل (7-26) يوضح مخططاً في مقطع القالب والحامل (حاوية القالب) مع بعض الأشكال والأحجام المختلفة لفتحات القوالب المتوفرة.

عملية السحب تنجز بمكائن تدعى طاولة السحب (Draw Bench)، تحوي منطقة دخول، حامل القالب، ومنطقة خروج المنتج المسحوب، وتعمل بقوة المكبس الهيدروليكي أو بسلاسل تقاد بمحرك كهربائي. يمكن أن يصمم حامل القالب ليحوي أكثر من قالب وبذلك يمكن سحب مجموعة من القضبان أو الأسلاك بأحجام مختلفة متوافقة مع كل قالب وبآنٍ واحد، كما هو مبين في الشكل (7-27).

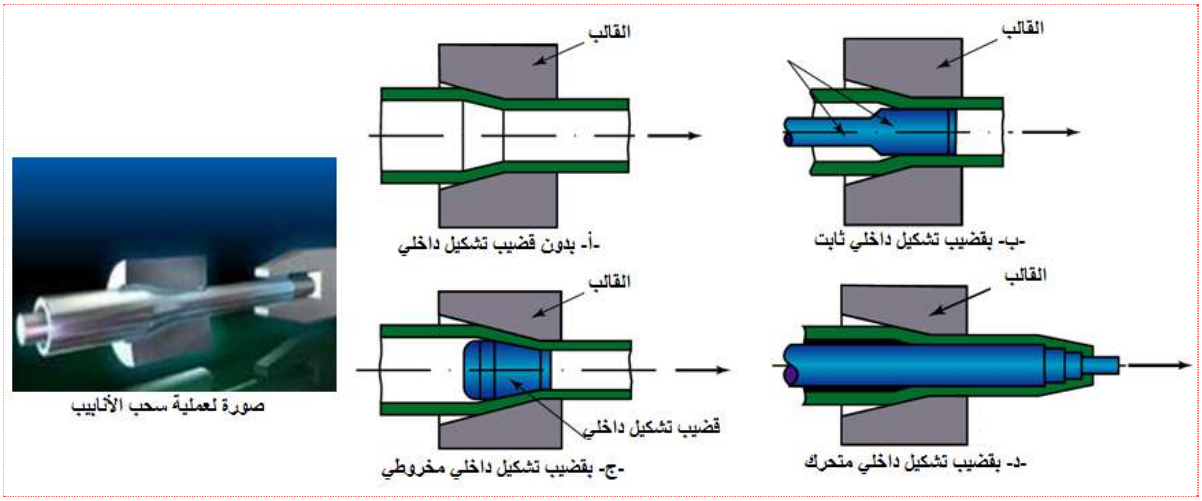
شكل 7-26 قوالب سحب الأسلاك، اليسار: مخطط للقالب والحامل، اليمين: صورة لقوالب مختلفة



شكل 7-27 مخطط لطاولة السحب بقوالب عديدة

7-9-2 سحب الأنابيب Tube Drawing

يمكن تصنيع الأنابيب أو الأسطوانات المجوفة بوساطة عملية السحب، وذلك بتقليل سمك جدران الأنابيب المراد سحبها وزيادة طولها، أي: إن قطعة العمل الخام يجب أن تكون بشكل أنبوب بعملية تشكيل سابقة، ويتم ذلك عن طريق استعمال عدة، تكون بشكل قضيب صلب يمتد داخل الأنبوب المراد سحبه ويسحب معه داخل القالب. من الجدير بالذكر أنه يمكن أن تنجز العملية بدون القضيب الداخلي ولكن السيطرة على سمك الجدار وبشكل متجانس على طول الأنبوب ستكون صعبة في هذه الحالة، والشكل (7-28) يوضح عملية سحب الأنابيب بأساليب متنوعة.



شكل 7-28 عملية سحب الأنابيب

7-9-3 مميزات عملية السحب Advantages of Drawing process

تتميز عملية السحب بالمميزات الآتية:-

- سيطرة محكمة على الأبعاد.
- إنهاءات جيدة للأسطح.
- تحسين الخواص الميكانيكية للمنتجات المسحوبة مثل خاصيتي المقاومة والصلادة.
- يعول عليها اقتصادياً بالإنتاجية المستمرة والإنتاج بالوجبات.

أسئلة الفصل السابع

س1) ما المقصود بعمليات التشكيل؟ وما هي الأهمية التجارية والتكنولوجية لها؟

س2) قارن بين التشكيل على البارد والتشكيل على الساخن. ذاكراً خصائص المعادن المشكلة بالساخن.

س3) ماذا تعني درجة حرارة إعادة التبلور ذاكراً علاقتها بعمليات التشكيل.

س4) عرف عملية الدرفلة، وما هي الأنواع المختلفة لعملية الدرفلة؟ وما هي ميزات كل نوع؟

س5) وضح بالرسم مخطط عملية الدرفلة.

س6) ما هي منتجات عملية الدرفلة؟ وما هي أهم العيوب المتعلقة بها؟ ذاكراً العلاج لكل عيب.

س7) قارن بين الحدادة المفتوحة والحدادة المغلقة.

س8) أشرح سبب استخدام قوالب الضبعة بدلاً من القوالب المغلقة كلياً في عمليات الحدادة.

س9) قارن بين الانسياب الحبيبي للقطع المنتجة بالحدادة وبالتشغيل وبالسباكة.

س10) ما المقصود بعملية البثق؟ قارن بين عملية البثق المباشر وغير المباشر.

س11) ماهي مزايا عملية البثق الهيدروستاتيكي والبثق الصدمي.

س12) وضح أهم عيوب المتعلقة بعملية البثق.

س13) عرف عملية السحب. وما هي مميزاتها؟ وما هي مواصفات قوالب السحب؟

س14) قارن بين عملية سحب الأسلاك وسحب القضبان.

س15) اشرح عملية سحب الأنابيب موضحاً إجابتك بالرسم.

س16) أملأ الفراغات الآتية:-

1- تفضل المواد ذات القابلية الجيدة على التشكيل بخاصيتي نقطة الخضوع ..... والمطيلية .....

2- تصنف عمليات التشكيل بالاعتماد على شكل قطعة العمل إلى .....و ..... .

3- تُصنف عمليات التشكيل بالاعتماد على درجة حرارة ..... إلى .....

و .....وتأخذ على أساس المقياس ..... بوحدات ..... .

4- تُعد عمليات الدرفلة ..... عمليات تشكيل أولية تتبعها عمليات تشكيل إضافية.

5- لتقليل قوى الضغط الهائلة والقدرات الكبيرة المطلوبة في عمليات الدرفلة يعمل على تنفيذ العمليات على..... وبأكثر من..... .

6- تتكون في الحدادة بقوالب الضبعة ..... على طرفي القالب تمنع من ..... معدن قطعة العمل.

س17) سلسلة من عمليات الدرفلة المستوية على الساخن بوساطة ماكنة درفلة ثنائية لتقليل سمك صفيحة من (50 mm) إلى (25 mm) وباستدقاق ثابت يساوي (5 mm) لكل مرحلة، قطر الدرفيل (36 cm)، إذا علمت أن عرض الصفيحة (35 cm) ومعدل جهد الانسياب يساوي مقاومة خضوع المادة عند التشكيل الساخن ومقداره (140 MPa) والقدرة المستهلكة للدرفيلين (64.68 kW)، أوجد عدد مراحل الدرفلة وعدد دورات الدرافيل بالدقيقة.

ج) 5 ، 14 rpm

الفصل

الثامن

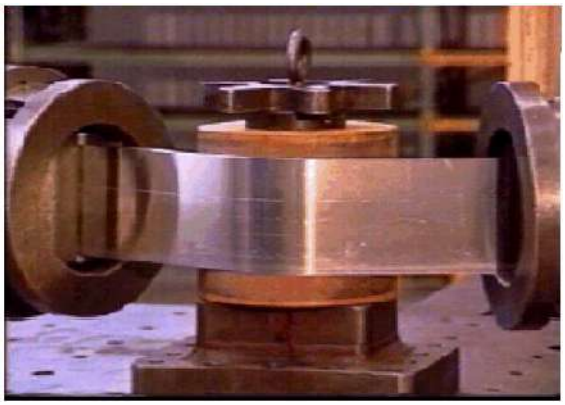
أعمال الصفائح المعدنية

Sheet Metal Working

الأهداف

الهدف العام:

في هذا الفصل سيتمكن الطالب من معرفة عمليات قطع وتشكيل الصفائح وأهميتها في المجال الصناعي، ويعرف طرائقها وتطبيقاتها المختلفة، ويعرف أيضاً أسلوب عمل كل طريقة ليتمكن بعدها من تحديد الطريقة المناسبة لكل حالة إنتاجية.



الأهداف الخاصة في نهاية هذا الفصل سيكون الطالب قد عرف ما يأتي:

1 - أهم أعمال الصفائح المعدنية.

2- يعرف أعمال قص الصفائح، وطرائقه واستخدامات كل طريقة، والأدوات والمكائن المستخدمة في كل طريقة.

3- يفهم كيفية قص الصفائح المعدنية، وتوزيع الأشكال المطلوبة على الصفيح اقتصادياً وبدون فضلات.

٤- يعرف عملية الثني والفائدة العملية من استخدامها، وأنواع المكائن المستخدمة في العملية.

٥- يعرف عملية السحب العميق، واستخداماتها، والعيوب الشائعة في هذه العملية.

٦- يعرف عملية التشكيل بالمط ومميزات واستخدامات هذا النوع من العمليات.

٧- يعرف عملية التشكيل بالرحى ومميزات واستخدامات هذا النوع من العمليات.

٨- يعرف عملية التشكيل بالتفجير ومميزات واستخدامات هذا النوع من العمليات.

٩- يعرف عملية تشكيل النقطة المفردة المتزايد واستخداماتها.

١٠- يمكنه إجراء مقارنة بين العمليات وتحديد الطريقة الملائمة للتصنيع.

أعمال الصفائح المعدنية Sheet Metal Working

٨-١ مقدمة Introduction

تُعد أعمال الصفائح المعدنية من العمليات التصنيعية المهمة جداً، التي تتضمن عمليات قص وتهيئة الصفائح وعمليات تشكيلها، قطع العمل (المادة الخام) في هذا النوع من الأعمال تكون نسبة مساحتها السطحية إلى سمكها عالية جداً، وتدعى بالصفائح الرقيقة (Sheets) عندما يتراوح سمكها ما بين (0.4-6.0 mm)، والصفائح التي يتجاوز سمكها هذا المقدار تُعد صفائح سميكة (Plates).

الأهمية التجارية المميزة لأعمال الصفائح المعدنية الرقيقة والسميكة نابعة من الطلب الهائل عليها من قبل المستهلكين وأصحاب المعامل والمصانع المختلفة. إن الكثير من المنتجات مثل عُلب المشروبات وحفظ الأغذية، الأواني المنزلية، الأجهزة الكهربائية، أجزاء مُعدات تكييف ومجاري الهواء، أبدان الطائرات، المركبات، وسائط النقل الأخرى، تستخدم فيها الصفائح الرقيقة، في حين تدخل الصفائح السميكة في صناعة المراجل، الجسور، السفن، مواقع الطاقة النووية، وغيرها من الاستخدامات، كذلك تُعد الصفائح المعدنية واحدة من أهم المنتجات نصف النهائية التي يتم تحويلها إلى المنتج المطلوب دون خلل أو كسر، وتدخل في العديد من الصناعات الأخرى التي من الصعوبة حسرها جميعاً في هذا الكتاب.

الصفائح بنوعيها الرقيقة والسميكة يتم تشكيلها أولياً بالدرفلة المستوية التي ذكرت في الفصل السابق، يتم تجهيز الصفائح الرقيقة عادةً بشكل لفات (Coil) ومن ثم تقطع، بينما الصفائح السميكة تجهز بشكل طبقات. وتمتلك الصفائح المعدنية بصورة عامة خصائص مميزة كونها ذات مقاومة عالية، دقة عالية بالأبعاد، إنهاءات جيدة للسطوح، فضلاً على كلفها الواطئة نسبياً. تنجز أعمال الصفائح المعدنية غالباً بدرجة حرارة الغرفة، أي: الشغل على البارد، عدا الحالات التي تتضمن الصفائح السميكة، صفائح المعادن الهشة، أو إذا كان مقدار نسبة التشكيل كبيراً جداً؛ في هذه الحالات يكون تشكيل الصفائح على الساخن ولكن بدرجات حرارة ليست بالعالية. تتم عملية قص وتشكيل الصفائح إما يدوياً أو باستخدام مُعدات أو مكائن ومكابس خاصة. تصنف أعمال الصفائح المعدنية إلى ثلاثة أقسام رئيسة هي:

- ***القطع Cutting***
- ***الثني Bending***
- ***السحب Drawing***

يتم قطع الصفائح إلى قطع صغيرة من صفائح كبيرة وعمل ثقوب وتجاويف بها لتلائم عمليات تشكيل الصفائح المذكورة أعلاه (الثني والسحب) إلى الأشكال المطلوبة كمنتجات نهائية أو نصف مصنعة.

٨-٢ عمليات القطع Cutting Operations

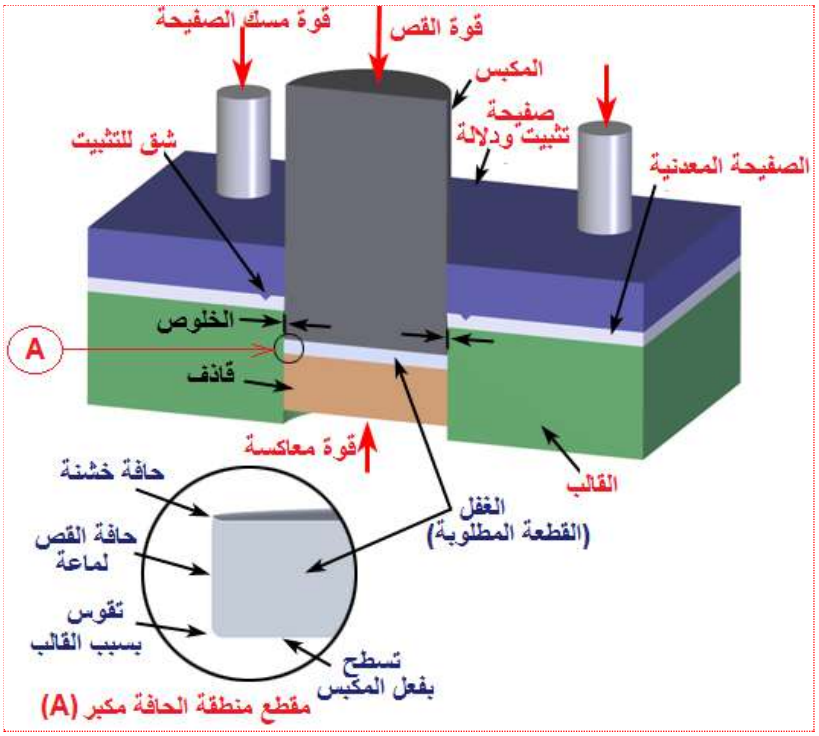
هنالك طرائق وأساليب متعددة في عمليات قطع المعادن تتضمن القطع بالمنشار التي تصنف تحت عنوان إزالة رايش (التشغيل)، القطع بالشُعلة طريقة شائعة أخرى تستخدم في قطع الصفائح السميكة المستعملة في بناء السفن والمقاطع الإنشائية، القطع بالأقراص الاحتكاكية (حجر كوسرة) نظرية عملها تعتمد على توليد الحرارة المطلوبة نتيجة الاحتكاك لصهر منطقة القطع الضيقة، وهذه الطرائق تتم بأساليب قد تكون يدوية أو باستخدام المُعدات أو المكائن الخاصة. وهنالك طرائق غير تقليدية أخرى مثل القطع بالليزر، القطع أو التخريم بالمحاليل الكيميائية، القطع بنفث الماء، ومعظم هذه الطرائق تحتاج إلى أجهزة ومكائن خاصة.

إحدى طرائق القطع الأخرى هي القص وتتضمن طريقتين، الأولى أن تتم بعملية قص على طول خط مستقيم بين حافتين حادتين باستعمال مكائن القص الآلية، والشكل (٨-١) يبين ماكنة قص الصفائح حديثة تعمل بالسيطرة المحوسبة، وتستخدم لقطع صفيحة كبيرة إلى مجموعة صفائح صغيرة.

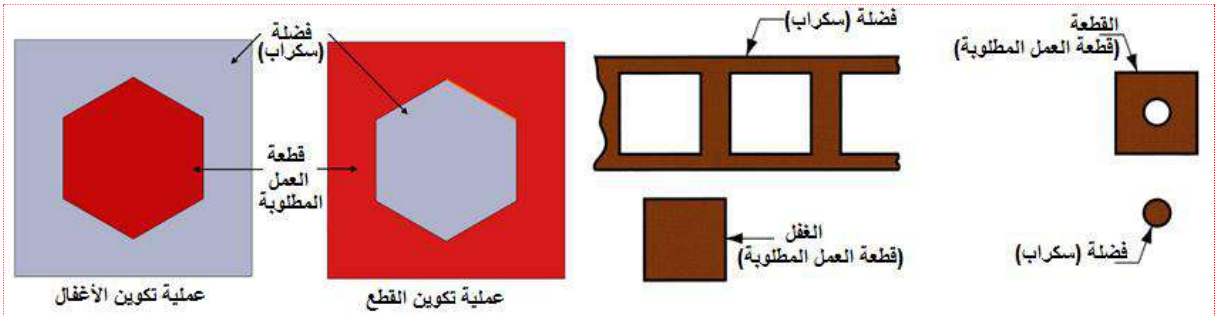
شكل ٨-١ صورة ماكنة قص آلية حديثة

الطريقة الثانية في عملية القص هي بشكل منحنٍ أو مضلع مغلق محدد للحصول على قطعة العمل المطلوبة بوضع الصفيحة الخام بين مكبس (مثقب) وقالب (Punch & Die) بضربة واحدة، إذ يتحرك المكبس إلى الأسفل بقوة وسرعة كافيتين للحصول على القطع المطلوب نتيجة الإجهادات القصية العالية المسلطة على معدن الصفيحة. يجب أن يكون هنالك خلوص مناسب بين فتحة القالب والمثقب (دائماً فتحة القالب أكبر من المثقب) لكي تتم العملية بنجاح وتكوين قطعة العمل المطلوبة بصورة صحيحة وبدون حصول أي تشويه للمعدن، ويعتمد الخلوص على سمك المعدن ونوعه ويتراوح مقداره ما بين (4%-8%) من سمك الصفيحة.

ومن الجدير بالذكر إن كانت قطعة العمل المطلوبة التي تسمى الغفل (Blank) هي الجزء المقطوع من الصفيحة الخام فإن أبعاد المثقب تكون أقل من الأبعاد الأسمية المطلوبة وبمقدار الخلوص، إذ يؤخذ بنظر الاعتبار التمدد الخاص بالمعدن. أما إن كان الجزء المتبقي بعد القطع هو القطعة المطلوبة للتشكيل اللاحق ويسمى بالقطعة (Part) ويُعد الجزء المقطوع في هذه الحالة فضلة (Scrap)، فيجب أن تكون فتحة القالب في هذه الحالة أكبر من الأبعاد المطلوبة بمقدار الخلوص إذ يؤخذ بنظر الاعتبار الانكماش الذي يحصل بعد العملية، كما هو مبين في الشكل (٨-٢) الذي يوضح عملية تكوين الأغفال وتكوين القطع مبيناً فيه تفاصيل العملية والمصطلحات المستعملة لها، يحتاج الأسلوبان المذكوران أعلاه إلى مكابس آلية خاصة، الشكل (٨-٣) يوضح ماكنة قص لتكوين القطع والأغفال مع بعض من المكابس والقوالب المستعملة معها، والشكل (٨-٤) يوضح بعض منتجات هذه العملية.



-أ- مخطط العملية مع المصطلحات المستعملة



- ب- نماذج الأغفال والقطع

شكل ٨-٢ عملية القص بالمثقب والقالب

شكل ٨-٣ نماذج لمكابس وقوالب مختلفة مع ماكنة القص

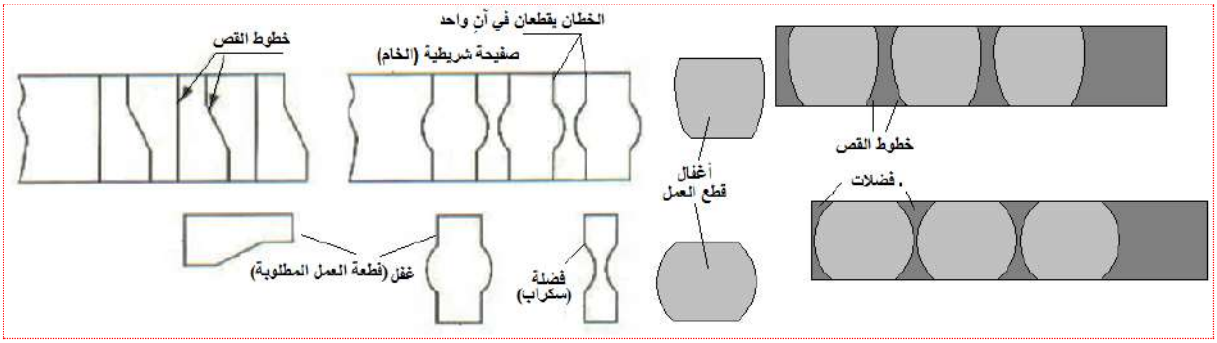
شكل 8-4 منتجات القص من الصفائح

لعملية القص أسلوب آخر يدوي باستخدام المقص الذي له ثلاثة أنواع بالاعتماد على اتجاه القص، المقص للخط المستقيم، وآخر للخط المنحني باتجاه اليمين، والثالث هو لقص الخط المنحني باتجاه اليسار، لاحظ الشكل (٨-٥) المجاور.

شكل ٨-٥ طقم من مقص الصفائح اليدوي

٨-٢-١ القص الاقتصادي للصفائح Economical Sheet Cutting

خلال عملية القص يجب أن يتم توزيع الأشكال المراد قطعها على الصفيح المعدني بصورة متجانسة ومنتظمة وخصوصاً في حالة الإنتاج الكمي أو المستمر لغرض تحقيق أقل خسارة ممكنة في الصفيح، أي تقليل الجزء التالف من المعدن (Scrap)، كما هو موضح في الشكل (6-8).



شكل ٨-٦ توزيع الأشكال على الصفيح المعدني للقص الاقتصادي

تحسب نسبة التلف (الفضلات) (Ps) من خلال المعادلة الآتية:-

$$\mathbf{Ps} = \frac{A - B_T}{\mathbf{A}} \times \mathbf{100\%}$$

$$A = L \times w$$

إذ إن:

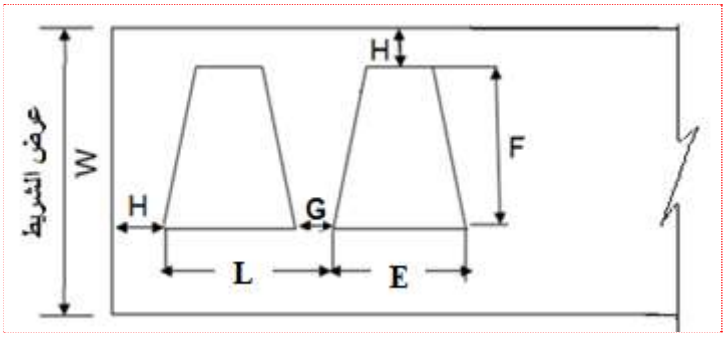
A	مساحة الصفيحة المعدنية التي يحصل بها القص
$\mathbf{B_T}$	المساحة الكلية لشكل قطعة العمل المطلوبة: مساحة قطعة عمل واحدة (B) × N
L	طول القص (عرض قطعة العمل زائد الخلوص ما بين القطعتين)
W	عرض الشريط الواحد المقطوع من الصفيحة المعدنية (عرض القص)
N	عدد الأجزاء المراد قصها بضربة واحدة من المثقب

ويعتمد الجدول الآتي لتحديد الأبعاد الخارجية للصفيح المعدني نسبة إلى أبعاد الجزء المراد قصه.

طول أو عرض المنتج المطلوب أيهما أطول (mm) **E , F**	الخلوص بين قطعتين متجاورتين **G** (mm)	الخلوص بين قطعة طرفية وحافة الصفيحة **H** (mm)
0 - 50	١ t	1.25 t
50 - 150	1.25 t	1.5 t
150 - 250	1.5 t	1.75 t
250 - 400	1.75 t	2 t

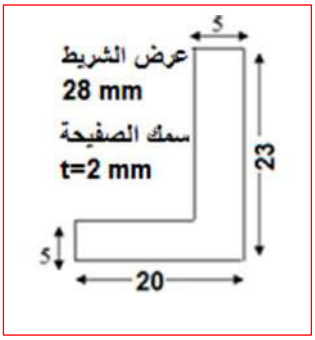
t : تمثل سمك الصفيح المعدني

والشكل (7-8) يوضح كيفية تخطيط الصفيحة المعدنية قبل عمليات القص مع توضيح الرموز المستخدمة في حسابات القص الاقتصادي.



شكل 7-8 تخطيط الصفيحة مع الرموز المستخدمة

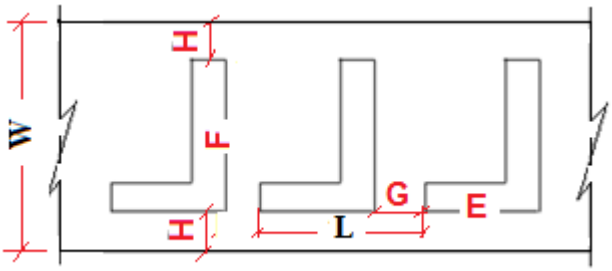
مثال



احسب النسبة المئوية للجزء التالف من الصفيح المعدني الناتج من قطع الشكل المجاور وصولاً إلى أفضل نسبة اقتصادية.

الجواب

نفرض أن ترتيب الشكل عند القطع يكون بالأسلوب أدناه:



من اختيار هذا الترتيب تكون (N=1)

$\mathbf{E = 20\ mm,\ F = 23\ mm,\ t = 2\ mm}$ (معطى بالسؤال)

من الجدول: $\mathbf{G = 1 \times t = 1 \times 2 = 2\ mm}$

$$\boldsymbol{H = 1.25 \times t = 1.25 \times 2 = 2.5\ mm}$$

$$\boldsymbol{L = E + G = 20 + 2 = 22\ mm}$$

$$\boldsymbol{W = F + 2 \times H = 23 + 2 \times 2.5 = 28\ mm}$$

$$\boldsymbol{A = L \times W = 22 \times 28 = 616\ mm^2}$$

مساحة الجزء المراد الحصول عليه يقسم إلى مستطيلين كالآتي:

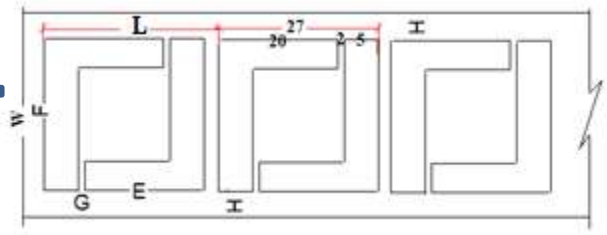
$$\boldsymbol{B = (5 \times 20) + (5 \times 18) = 190\ mm^2}$$

$$\boldsymbol{B_T = B \times N = 190 \times 1 = 190\ mm^2}$$

$$\mathbf{Ps = \frac{A - B_T}{A} \times 100\% = \frac{616 - 190}{616} \times 100\% = 69\%}$$

يلاحظ من النتائج أن نسبة التالف (الفضلة) كبيرة جداً، لذلك يجب إيجاد ترتيب آخر لغرض الحصول على الشكل المطلوب وبأقل قطع صفيح تالفة (القص الاقتصادي)، وليكُن الترتيب الآتي:

هذا الترتيب سيكون عدد القطع بضربة واحدة هو قطعتان: N = 2



$$L = 20 + G + 5 = 20 + 2 + 5 = 27\ mm$$

$$W = F + 2 \times H = 23 + 2 \times 2.5 = 28\ mm$$

$$A = L \times W = 27 \times 28 = 756\ mm^2$$

المساحة الكلية لقطع العمل بضربة واحدة هي:

$$B_T = B \times N = 190 \times 2 = 380\ mm^2$$

$$Ps = \frac{A - B_T}{A} \times 100\% = \frac{756 - 380}{756} \times 100\% = 49\%$$

حالة الترتيب الثانية تُعد افضل لكون نسبة التلف في المادة الخام (السكراب) أقل بمقدار 20% من الحالة الأولى، هل بالإمكان اقتراح حالة ثالثة من الترتيب للحصول على نسبة تلف أقل ما يمكن؟

3-8 عمليات تشكيل الصفائح المعدنية Sheet Metal Forming Operations

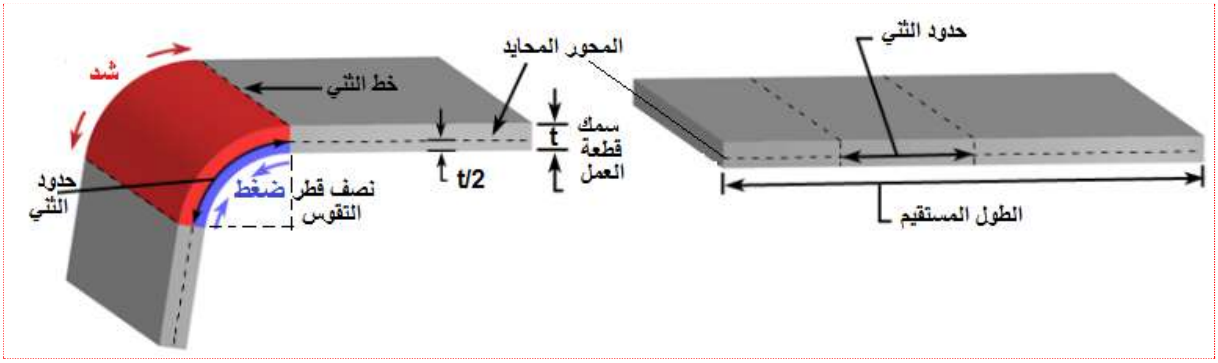
إن الفرق بين عمليات التشكيل الكتلي وتشكيل الصفائح أو بعبارة أخرى، ما هو الفرق الرئيس بين عمليات التشكيل التي ذكرت في الفصل السابق وعمليات التشكيل التي سيتم شرحها في هذا الفصل؟ الجواب عن هذا الاستفسار هو بكل بساطة أن عمليات التشكيل الكتلي يتم فيها التشكيل على الجسم بالكامل، أي: بمعنى آخر سيكون التغيير بالأبعاد الثلاثة لقطعة العمل، أما عمليات التشكيل للصفائح المعدنية فإن التشكيل سيكون على سطح قطعة العمل فقط، أي: إن سمك القطعة سيكون ثابتاً تقريباً بسبب طبيعة شكل الصفيحة التي تكون فيها نسبة البعدين إلى السمك كبيرة جداً.

هناك بعض العمليات المستحدثة لتشكيل المعادن التي تمتاز بتكاليف عالية ومعدات معقدة لإنجاز عملية التشكيل. وتستعمل هذه الطرائق لتشكيل المعادن التي لا يمكن تشكيلها بالطرائق الاعتيادية أو المعروفة، فضلاً على أن هنالك منتجات ذات مواصفات وأشكال خاصة لا يمكن تصنيعها بالطرائق الاعتيادية ومن أهم هذه الطرائق طريقة التشكيل بالتفجير أو التشكيل بالمتفجرات وهو أحد أنواع التشكيل بالطاقة العالية. العمليات المهمة في تشكيل الصفائح المعدنية هي الثني والسحب العميق.، وهنالك عمليات أخرى أقل أهمية سيتم تناولها خلال الفقرة اللاحقة.

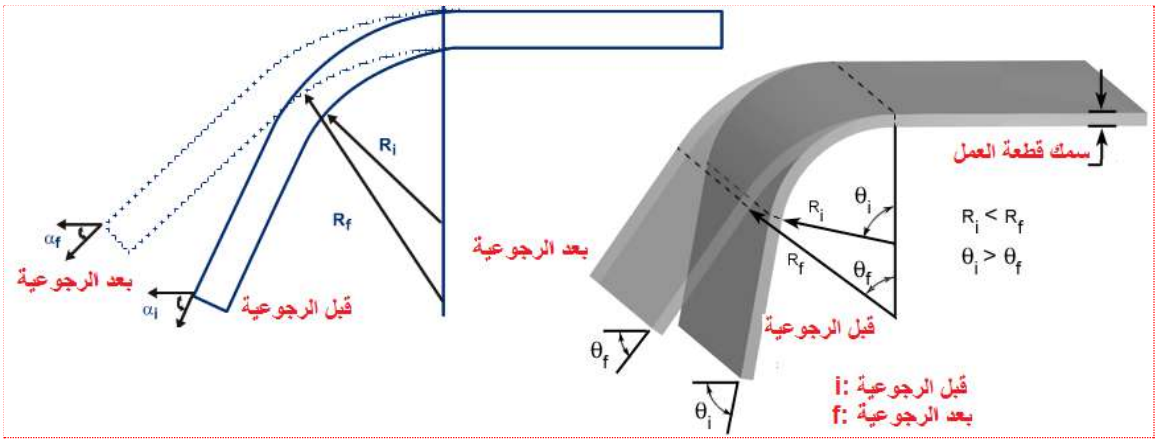
1-3-8 الثني Bending

الثني أو الحني هو أحدى العمليات المهمة في تشكيل الصفائح المعدنية، تتم العملية بالتواء قطعة العمل حول محور مستقيم كما هو موضح في الشكل (٨-٨)، ليس الغرض من هذه العملية تشكيل المنتجات المألوفة مثل البراميل، الخزانات، الصفائح المتموجة، وغيرها من المنتجات فقط، بل تستعمل لتحسين جساءة (القوة النظرية لتماسك الذرات وتسمى في بعض المصادر بـ صُلبية المادة) (Stiffness) المادة وخصوصاً لقطع العمل الطويلة. تتم عملية الثني بتسليط قوى على سطح قطعة العمل مسبباً ثني هذه القطعة بزاوية ونصف قطر تقوس محددين ولهما حدود معينة لا يمكن تجاوزها تعتمد على الخواص الميكانيكية لقطعة العمل وسمكها. وفي أثناء عملية الثني هذه يحصل شد (مط) الجزء الخارجي لمنطقة الثني (طبقات المعدن أعلى من المستوي الحيادي) وزيادة في طوله، في حين الجزء الداخلي يحصل به ضغط ويصغر طوله.

يرافق عملية الثني حصول ظاهرة تسمى الرجوعية (Springback) أي حصول رجوع للمعدن بعد إجراء عملية الثني وزوال القوة المؤثرة عليه، كما هو موضح في الشكل (8-9)، حيث تحصل عملية تغير في أبعاد المنتج عن الأبعاد المحددة ، لذلك يجب أخذ هذا في نظر الاعتبار عند إجراء عملية الثني للحصول على منتجات تمتاز بدقة عالية في الأبعاد.



شكل 8-8 عملية الحني



شكل ٨-٩ ظاهرة الرجوعية

عملية الثني تتم بوساطة مكائن خاصة تعمل يدوياً أو آلياً، إذ تتكون الماكنة من جزء علوي يسمى المكبس وجزء سفلي يسمى القالب الذي تحصل به عملية الثني فيأخذ المنتج شكل القالب، والشكل (10-8) يبين مكائن الثني المستخدمة.

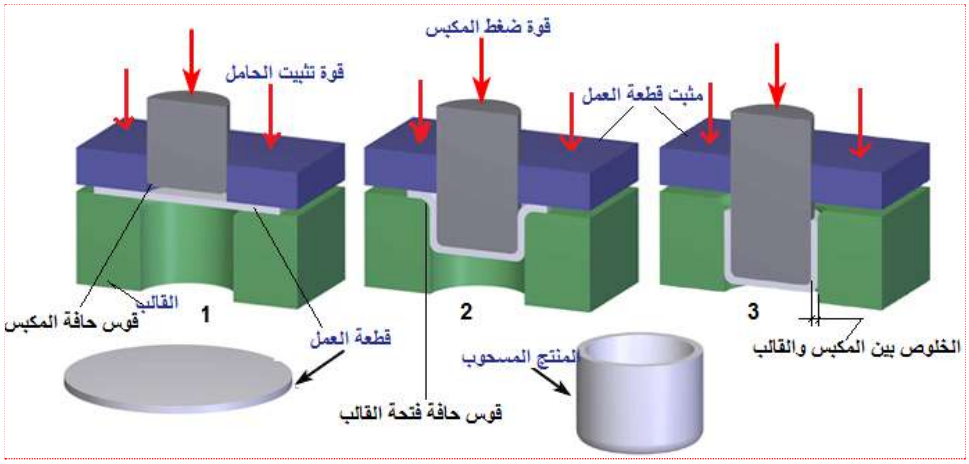
شكل 8-10 مكائن ثني مختلفة

8-3-2 السحب العميق Deep Drawing

السحب العميق هو إحدى عمليات تشكيل الصفائح، إذ يتم بها تشكيل صفيحة من المعدن إلى أشكال كأسية مثل بعض أجزاء المركبات، ظرف العيارات النارية وقذائف القنابل، علب المشروبات، الأواني المنزلية المعدنية، حوض غسيل الأواني، ومنتجات أخرى كثيرة، كما مبين في الشكل (٨-11).

شكل ٨-١١ بعض منتجات السحب العميق

تجري عملية السحب العميق بوضع قطعة العمل الدائرية المراد تشكيلها على فتحة القالب بحيث تنساب قطعة العمل في داخلها بتأثير قوة ضغط المكبس، قطعة العمل يجب أن تثبت تثبيتاً مناسباً بوساطة حامل قطعة العمل، لغرض تلافي التشوهات التي من الممكن أن تحصل خلال عملية السحب ويجب أن يصمم القالب والمكبس بشكل صحيح وأن يتم اختيار أقواس مناسبة لحافاتهما وخلوص مناسب فيما بينهم بحدود (١٠%) أكبر من سمك قطعة العمل (أي يساوي ١.١ سمك قطعة العمل)، فضلاً على الاختيار المناسب لقوى ضغط المكبس وسرعته والتزييت بمواد مناسبة بحسب نوع المعدن في أثناء العملية. هنالك حدود قصوى لعمق التشكيل يعتمد على متغيرات كثيرة أهمها نوع المعدن وقابليته للسحب (Drawability) ونسبة قطر قطعة العمل إلى قطر المكبس. والشكل (8-12) يوضح عملية السحب العميق ومراحلها.

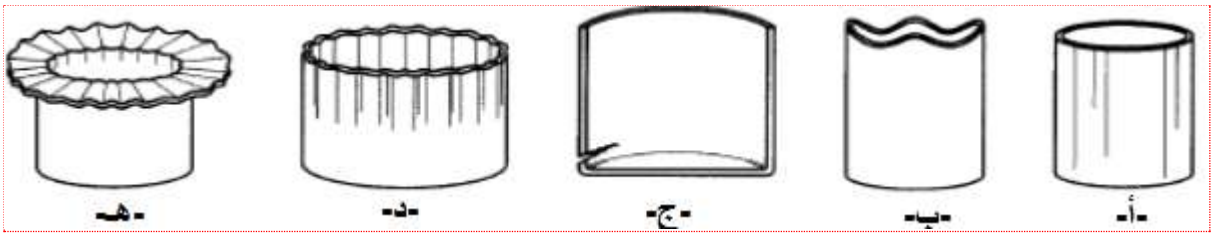


شكل 8-12 عملية السحب العميق ومراحلها

بالرغم من المزايا الكثيرة لعملية السحب العميق وهي المزايا العامة لعمليات التشكيل ومزايا خاصة مثل القابلية العالية على الإنتاج، ولكن هنالك بنفس الوقت الكثير من المحددات تتضمن محدودية المعادن القابلة للتشكيل بهذه الطريقة والتي تمتلك خصائص معينة مثل الألُمنيوم والفولاذ واطئ الكاربون، محددات أبعاد المنتج، العيوب المرادفة والشائعة مع هذه العملية والتي تتضمن الآتي:

- آثار بقعية ونقطية أو خطية على سطح المنتج، كما هو مبين في الشكل (٨-١٣-أ).
- حدوث ظاهرة التأذن (شكل الأذن)، كما هو مبين في الشكل (٨-١٣-ب).
- الشقوق والتمزق، كما هو مبين في الشكل (٨-١٣-ج).
- تجعد في جوانب وحاشية المنتج، كما هو مبين في الشكل (٨-١٣-د،هـ).

قسم من هذه العيوب له علاقة بنظافة العُدد وقسم آخر له علاقة بمتغيرات العملية نفسها، فالآثار البقعية مثلاً يمكن علاجها بالتنظيف الجيد للمكبس والقالب، أما الآثار التي لها علاقة بمتغيرات العملية نفسها فيمكن علاجها بمعالجة هذه المتغيرات مثل قوة ضغط المكبس وسرعته أو قوة مسك حامل القطعة أو التزييت الجيد والمناسب.



شكل ٨-١٣ أهم عيوب السحب العميق

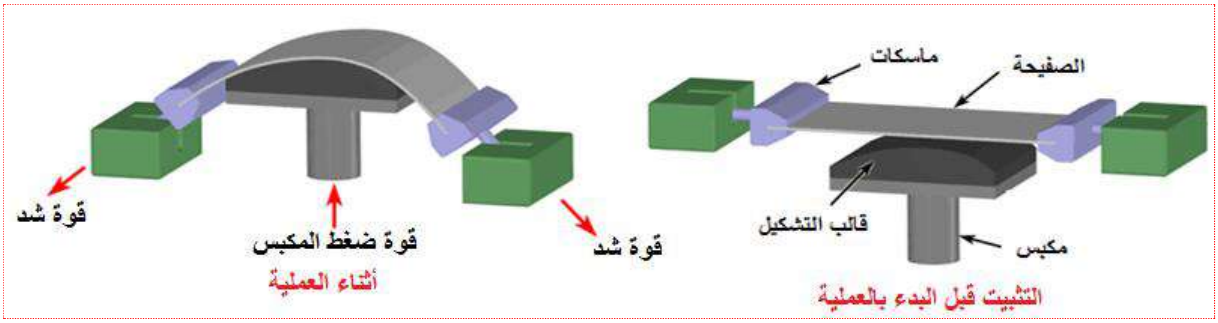
هنالك تقنيات خاصة في عملية السحب العميق لتحسين أو إضافة معالم للمنتجات لا يتسع المجال لذكرها بالتفاصيل.

3-3-8 عمليات أخرى لتشكيل الصفائح المعدنية

Other Sheet Metal Forming Operations

٨-٣-٣-١ التشكيل بالـمط Stretch Forming

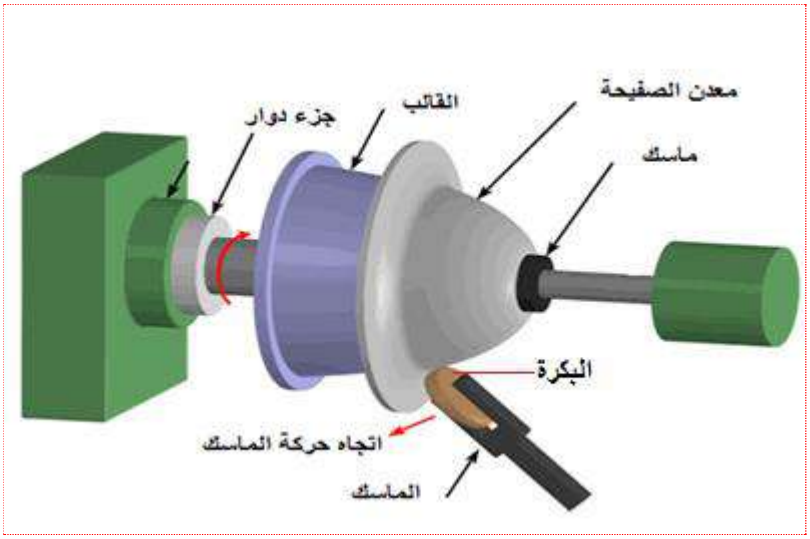
هي عملية تشكيل تتم باستخدام قوى شد مثل طريقة مط وثني المعدن فوق قالب وتستعمل هذه الطريقة على مدى واسع في مصانع الطائرات والصناعات الفضائية لإنتاج قطع كبيرة من الصفائح المعدنية اقتصادياً ولكن بكميات قليلة، وإنتاج الأقواس ذات الأقطار الكبيرة، تتم هذه العملية عن طريق تثبيت نهايتي الصفيحة بين فكين ثم وضع الصفيحة على القالب الخاص بالتشكيل الذي يتم دفعه من قبل مكبس هيدروليكي وعند تحرير قطعة العمل من قوى الشد ستأخذ الشكل الذي كانت عليه بسبب التشوه اللدن الدائمي الذي حصل فيها، والشكل (8-14) يوضح عملية التشكيل بالمط. وتمتاز المنتجات التي يتم الحصول عليها بهذه الطريقة بدقة عالية في الأبعاد ونعومة عالية في الأسطح.



شكل 8-14 عملية التشكيل بالمط

٢-3-3-8 التشكيل بالـرحى Spinning Forming

هي احدى عمليات تشكيل الصفائح المتناظرة وتسمى أيضا التشكيل بالتدوير، إذ تستعمل لتشكيل الأجزاء ذات المحاور المتماثلة المخروطية والمنحنية وتشكيل الصفائح الكبيرة تصل إلى (5 m)، يتم تثبيت قطعة العمل على قالب بهيئة الشكل المنتج المطلوب يدور بسرعة عالية، وباستعمال عدة تسمى الماسك (قد تكون ماسكين للتوازن) ذات رأس كروي أو بشكل بكرة (رولة) تضغط ضغطاً موقعياً (دائماً التماس بنقطة) على قطعة العمل بصورة مستمرة وتتحرك تدريجياً على طول القالب في أثناء دورانه ويكون الضغط هذا إما يدوياً أو بطريقة آلية هيدروليكية وبمكائن خاصة، فتأخذ الصفيحة شكل القالب محدداً بذلك الشكل النهائي المطلوب للمنتج، الشكل (8-15) يوضح عملية التشكيل بالرحى. هنالك ثلاثة أنواع للعملية التشكيل بالرحى الاعتيادية، والتشكيل بالرحى القصية التي تختلف عن سابقتها بتنحيف سمك القطعة، والتشكيل بالرحى للأنابيب التي تستعمل لتصغير أقطارها وزيادة طولها. منتجات عملية التشكيل بالرحى هي الأواني المنزلية والتحفيات المعدنية، صحون التقاط البث الفضائي، وغيرها من التطبيقات، والشكل (8-16) يوضح بعض هذه المنتجات التي يتم إنتاجها بطريقة التشكيل بالرحى.

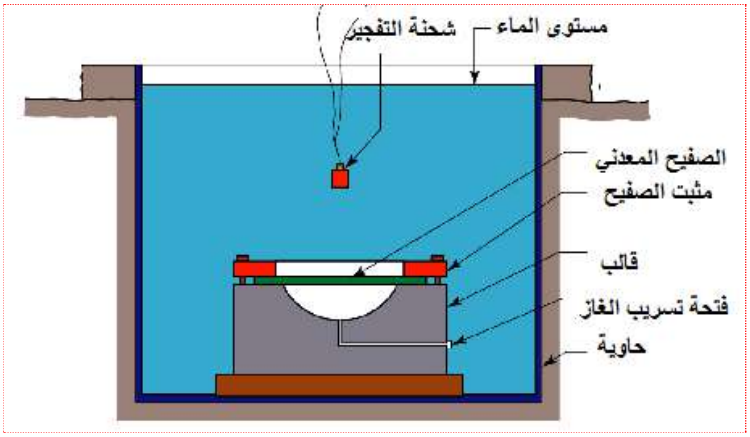


شكل 8-15 عملية التشكيل بالرحى

شكل 8-16 منتجات التشكيل بالرحى

٢-3-3-8 التشكيل بالـتفجير Explosive Forming

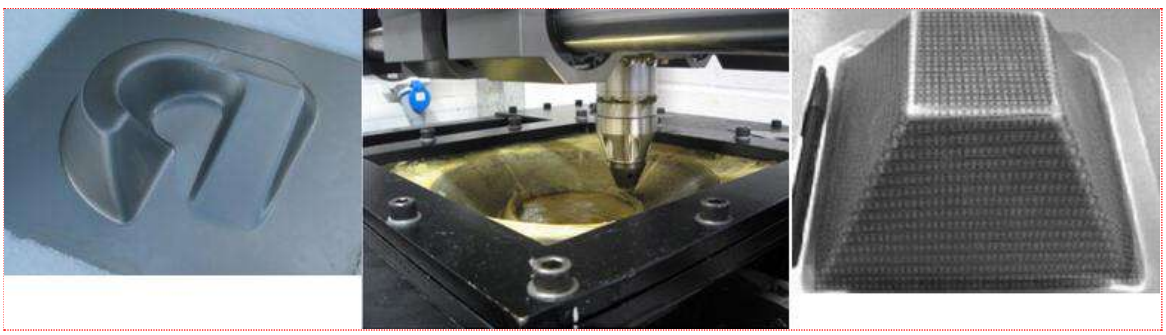
تتم هذه العملية عن طريق استخدام قالب متين جداً يحتوي على فراغ يمثل شكل المنتج المطلوب الحصول عليه ويتصل فراغ القالب بقناة ذات قطر صغير نسبياً يعمل على تسريب الهواء إلى الخارج، يوضع الصفيح المعدني المراد تشكيله فوق القالب ويوضع في وعاء حاوٍ على سائل مثل الماء، وتعلق فوقه شحنة من مادة متفجرة على مسافة معينة مثل التي أن تي (TNT) فعند تفجير الشحنة تتولد موجة ارتدادية هائلة جداً داخل السائل إذ ترتطم هذه الموجة بالصفيح المعدني فيدفعه إلى داخل تجويف القالب بقوة فائقة متخذاً شكل التجويف الذي يمثل شكل المنتج، والشكل (8-17) يوضح مخطط عملية التشكيل بالتفجير. تستعمل هذه الطريقة للحصول على المنتجات كبيرة الحجم وخصوصاً في الصناعات الفضائية والتي تمتاز موادها بصلادة عالية. ويوضح الشكل (8-18) بعض منتجات التشكيل بالتفجير.



شكل 8-17 التشكيل بالتفجير

شكل 8-18منتجات التشكيل بالتفجير

هنالك عمليات تشكيل غير التي ذكرت في هذا الفصل لها تطبيقاتها الخاصة والتي تستخدم في بعضها طاقة كبيرة كما هو في التشكيل بالتفجير لغرض عملية التشكيل الإنتاجية السريعة وبدقة متناهية مثل التشكيل الهيدروليكي بالتفريغ الكهربائي، والتشكيل المغناطيسي الكهربائي والذي يستخدم في تشكيل الأنابيب لإعطائها تفاصيل معينة. كذلك هنالك عملية تشكيل للصفائح حديثة تسمى تشكيل النقطة المفردة المتزايد (Incremental Single Point Forming)، مميزات هذه الطريقة تكمن في عدم الحاجة إلى تحضير قوالب أو مكابس لغرض إنتاج القطع المشكلة بل يستعاض عنها بأداة تشبه القلم برأس كروي أو ما شابه تثبت على ماكنة تفريز CNC ومن خلال برنامج الحاسوب تتم عملية التشكيل، لاحظ الشكل (٨-١٩) الذي يوضح العملية ومنتجاتها.



شكل ٨-١٩ عملية تشكيل النقطة المفردة المتزايد ومنتجاتها

أسئلة الفصل الثامن

س١) ما المقصود بعملية القص، وما هي طرائقه عددها فقط؟ وما هي استخدامات كل طريقة؟

س٢) ما هو الفرق الرئيس بين التشكيل الكتلي وتشكيل الصفائح المعدنية؟

س٣) ما هو الفرق بين الغفل والقطعة، وضح إجابتك بالرسم.

س٤) عرف عملية الثني، عدد استخداماتها.

س٥) ما المقصود بالرجوعية، ومتى تحدث هذه الظاهرة؟ كيف يتم علاج الظاهرة من ناحية دقة الأبعاد.

س٦) ما هي العوامل التي تؤخذ بنظر الاعتبار لتلافي العيوب الحاصلة في أثناء عملية السحب العميق؟

س٧) عرف عملية التشكيل بالمط، واذكر أهم استخداماتها ومميزات المنتجات بهذه الطريقة.

س٨) أذكر أنواع عمليات التشكيل بالرحى، وما الفرق بين عملية وأخرى؟

س٩) اشرح آلية عملية التشكيل بالتفجير، ومتى يتم استخدامها؟

س١٠) ما هي أهم عمليات التشكيل الإنتاجية غير التقليدية السريعة والدقيقة؟

س١١) أملأ الفراغات الآتية:-

1) تُصنف أعمال تشكيل الصفائح المعدنية الرئيسة إلى .....و ..... و.....

2) تدعى الصفائح بالرقيقة عندما يكون سمكها .....وما زاد سمكها عن ذلك تسمى .....

3) يعتمد مقدار الخلوص في عملية القص بالمكبس والقالب على ..... و ..... ويتراوح مقداره بحدود ..... من .....

4) في عملية السحب العميق تعتمد الحدود القصوى لعمق التشكيل على عدة متغيرات أهمها:

..... و ..... و .....

5) أهم العيوب الشائعة والمرافقة لعملية السحب العميق هي: ..... و .....و ..... و .....

6) الغرض من استخدام عمليات تشكيل الصفائح باستخدام طاقات هائلة هي و ..... و .....

7) لا تحتاج عملية التشكيل بطريقة النقطة المفردة المتزايد إلى ..... أو ..... .

س٩) أحسب النسبة المئوية للجزء التالف من الصفيح المعدني الناتج من قص الشكل المجاور وصولاً إلى أفضل نسبة اقتصادية، موضحاً إجابتك بالرسم، علماً أن عرض الصفيحة لا يتجاوز (55 mm).