جمهورية العراق

وزارة التربيــة

المديرية العامة للتعليم المهني

العلوم الصناعية

الصناعي/ اللحام وتشكيل المعادن

الثالث

تأليف

أ.م.د. المهندس إحسان كاظم النعيمي أ.م.د. المهندس احمد زيدان الشمري

أ.م.د. المهندسة خنساء داود الشمري المهندس نزار عبد المحسن خليل

الطبعة الخامسة

2024 م – 1446 هـ

استناداً إلى القانون يوزع مجاناً ويمنع بيعه وتداوله

المقدمة

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين، المبعوث رحمة للعالمين، محمد وعلى آله الطيبين الطاهرين وصحبه المنتجبين وبعد:

انطلاقاً من إيمان المديرية العامة للتعليم المهني بأهمية الارتقاء بالعملية التعليمية، فقد رأت المديرية ضرورة تحديث المناهج الدراسية في التعليم الصناعي بما ينسجم مع متطلبات المرحلة الحالية ومواكبة التقدم العلمي والصناعي وتلبية لحاجة سوق العمل في مختلف قطاعاته العامة والخاصة، لذا تم تكليف لجنة علمية متخصصة بتأليف كتاب العلوم الصناعية للمرحلة الثالثة والذي يحمل عنوان (اللحام وتشكيل المعادن).

فقد عقدت لجنة تأليف الكتاب اجتماعات عديدة تمخض عنها وضع الأسس العلمية والمنهجية الخاصة بأعداد الكتاب وفصوله العلمية بحيث يكون مكملاً للكتابين المؤلفين حديثاً واللذين قد درسهما الطالب في المرحلتين الأولى والثانية، وتجدر الإشارة هنا إلى أن لجنة التأليف حرصت على أن يتضمن الكتاب الأساليب التكنولوجية الحديثة في اللحام وتشكيل المعادن ليواكب التغيرات الحاصلة في التقدم العلمي والتكنولوجي وليكون الكتاب ركيزة أساسية في عملية التعليم والتعلم لاحتوائه على معارف ومعلومات علمية عُرضت بأسلوب سهل ومنطقي بحيث يوفر للطالب خبرات علمية متنوعة ذات مؤشرات واضحة وتوازي مستواه العلمي.

ويتكون الكتاب من ثلاثة أجزاء، إذ يتناول الجزء الأول موضوع طرائق اللحام المختلفة والبنية المجهرية وجودة الملحومات وقد جاء بخمسة فصول، أما الجزء الثاني فقد عالج موضوع تشكيل المعادن في فصل واحد، وقد احتوى الجزء الثالث الفصل السابع الذي تضمن عمليات المعالجة ما بعد اللحام والتشكيل. إذ تضمن الفصل الأول طريقة اللحام بالقوس الكهربائي وأهم المتطلبات التكنولوجية لها وتضمن أيضاً بعض الطرائق المهمة بلحام القوس الكهربائي، أما الفصل الثاني فقد تطرق بشرح مفصل إلى طرائق اللحام القوس الكهربائي بالغازات المحجبة وتم التركيز في هذا الفصل على طريقة اللحام بالأقطاب المستهلكة (MIG/MAG) والأقطاب غير المستهلكة (TIG). فيما أهتم الفصل الثالث بموضوع طرائق اللحام اللاتقليدية وتضمن الفصل الرابع المبادئ الأساسية لميتالورجيا اللحام وكيف تتأثر البنية المجهرية للمعادن بعمليات اللحام. أما الفصل الخامس فقد شمل جودة اللحام والفحوصات الإتلافية واللاإتلافية، والفصل السادس احتوى على عمليات التشكيل بنوعيه التشكيل الكتلوي وتشكيل الصفائح، أما الفصل الأخير فقد تضمن الحديث عن عمليات المعالجة ما بعد اللحام والتشكيل. وقد تظافرت جهود لجنة التأليف لإظهار هذا الكتاب متناغماً مع كتاب العلوم الذي درسه الطالب في المرحلة الثانية ومكملاً له وبدون تكرار موضوعاته مع الحفاظ على وحدة الموضوعات والرموز العلمية. وتعزيزاً لإدراك الطالب فقد احتوى الكتاب على

مجموعة من الصور والمخططات والجداول التي تعطي تصوراً واضحاً لطرائق اللحام والتشكيل، وتضمن الكتاب كذلك مجموعة من التحليلات الهندسية والرياضية تم استعراضها بشكل مبسط يسهل فهمها على الطالب وعند استيعابه لهذهِ التحليلات سيتمكن من اختيار الأسلوب الأمثل لعملية اللحام وبشكل اقتصادي ويتمكن من معرفة العوامل المؤثرة في تشكيل المعادن والحسابات التصميمية اللازمة لعملية التشكيل.

وانطلاقاً من المسؤولية التربوية والتعليمية فإن المديرية العامة للتعليم المهني حريصة على تقديم المناهج الدراسية الرصينة وتطوير ملاكاتها التدريسية بهدف النهوض بالمستوى العلمي للطالب وتنمية قدراته الذهنية والعملية بحيث يكون الطالب شريكاً فاعلاً في العملية التعليمية وقادر على دفع عجلة التقدم والتنمية في البلد إلى الأمام بما يحقق تطلعاته وطموحاته.

إننا نقدم هذا الجهد العلمي المتواضع وكلنا أمل أن يوافينا الأساتذة الأفاضل والقائمون على العملية التعليمية بمقترحاتهم وآرائهم القيمة لإغناء الكتاب والإفادة منها في طبعة الكتاب التالية، ولا يسعنا هنا إلا أن نتقدم بالشكر والعرفان إلى المسؤولين في المديرية العامة للتعليم المهني ووزارة التربية لدعمهم اللامحدود من اجل إعداد هذا الكتاب، وفي الختام نتقدم بالشكر والعرفان إلى كل من ساهم في إعداد الكتاب وبالأخص أ. د. عدنان نعمة عبود الخبير العلمي للكتاب. ونسأله تعالى أن يوفقنا ويسدد خطانا إلى ما فيه الخير والصلاح إنه ولي التوفيق.

المــؤلفــون

بغــداد – 2015 م

المحتـــويات

	الفصل الأول	رقم الصفحة		الفصل الخامس	رقم الصفحة
الفصل الأول	لحام القوس الكهربائي	6	الفصل الخامس	جودة اللحام	98
	تكنولوجيا القوس الكهربائي	9		المقدمة	98
	التحليل الرياضي للقدرة المجهزة بالقوس الكهربائي	17		الإجهادات المتبقية والتشوهات	98
	لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة	21		عيوب اللحام	100
	اللحام تحت الماء	25		اختبارات اللحام	107
	أسئلة الفصل الأول	28		أسئلة الفصل الخامس	118
الفصل الثاني	الفصل الثاني		الفصل السادس	الفصل السادس	
	اللحام بالغازات المحجبة	29		تشكيل المعادن	120
	لحام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المحجوب بالغاز الخامل	30		مقدمة	120
	الغازات الخاملة	31		درجة حرارة إعادة التبلور	121
	اللحام بطريقة TIG	42		عمليات التشكيل الميكانيكي على البارد	121
	أسئلة الفصل الثاني	48		أسئلة الفصل السادس	147
الفصل الثالث	الفصل الثالث		الفصل السابع	الفصل السابع	
	طرائق اللحام اللا تقليدية	49		عمليات المعالجة ما بعد اللحام والتشكيل	149
	مقدمة الفصل	50		مقدمة الفصل	150
	اللحام بأشعة الليزر	50		المعاملات الحرارية	150
	أنواع الليزر	53		المعالجة ما بعد اللحام والتشكيل	154
	اللحام بالحزمة الإلكترونية	60		الطلاء	165
	لحام اللدائن	63		أسئلة الفصل السابع	168
	أسئلة الفصل	66			
الفصل الرابع	الفصل الرابع				
	ميتالورجيا اللحام	68			
	البنية المجهرية	68			
	مخططات الأطوار المتوازنة	72			
	المعالجات الحرارية للملحومات	92			
	أسئلة الفصل الرابع	94			

الفصل الأول

لحام القوس الكهربائي
Arc Welding

الأهداف

الهدف العام

سيتمكن الطالب في هذا الفصل من معرفة طريقة اللحام بالقوس الكهربائي وأهم المتطلبات التكنولوجية لها، وسيتم تسليط الضوء على طريقتين مهمتين من طرائق اللحام بالقوس الكهربائي، وهما: طريقة لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة الحاوية على مساعد الصهر، وطريقة لحام القوس الكهربائي تحت الماء. إذ سيتمكن الطالب من التعرف على كل طريقة وتطبيقاتها وتحديد الطريقة المناسبة لحالة اللحام المطلوبة.

الأهداف الخاصة: بعد الانتهاء من دراسة الفصل الأول سوف يتمكن الطالب من فهم الآتي:

1. أسس القوس الكهربائي.
2. أهم متطلبات تكنولوجيا القوس الكهربائي.
3. التصنيف القياسي لأقطاب القوس الكهربائي.
4. مصادر التيار الكهربائي والربط بالقطبية.
5. مساعد الصهر وأهميته ووسائل إضافته.
6. حجاب القوس الكهربائي وأهميته.
7. التحليل الرياضي للقدرة المجهزة للحام القوس الكهربائي.
8. مفهوم الأقطاب المجوفة الحاوية على مساعد الصهر واختلافها عن الأقطاب العادية بلحام القوس الكهربائي.
9. أهمية تكنولوجيا لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة الحاوية على مساعد الصهر واستخداماتها ومحدداتها.
10. أهمية تكنولوجيا لحام القوس الكهربائي تحت الماء وأنواعه.

لحام القوس الكهربائي Arc Welding

1-1 مقدمة Introduction

يُعد اللحام أحد عمليات ربط المعادن فهو عملية ربط قطعتين أو أكثر بتسليط الحرارة أو الضغط أو كليهما وتكون المجموعة المربوطة عبارة عن وصلة دائمة لا يمكن تفكيكها دون إيقاع الضرر بالأجزاء المربوطة وتسمى بالملحومة (Weldment). وفي بعض عمليات اللحام لا بد من استعمال مادة مضافة (معدن حشو) (Filler Metal) لإتمام عملية اللحام. وقد سبق وأن تعلم الطالب في المراحل الدراسية السابقة أن طرائق اللحام تصنف إلى ثلاثة أصناف رئيسة، وهي: اللحام الانصهاري، ولحام الحالة السائلة- الصلبة، ولحام الحالة الصلبة. وفي هذا الفصل سيتم تناول لحام القوس الكهربائي الذي يمثل جزءاً من طرائق لحام الحالة السائلة، وسيتم التطرق إلى طريقتين مهمتين من طرائق اللحام بالقوس الكهربائي، إما بالنسبة إلى الطرائق الأخرى للحام القوس الكهربائي فسيتم تناولها في الفصول اللاحقة.

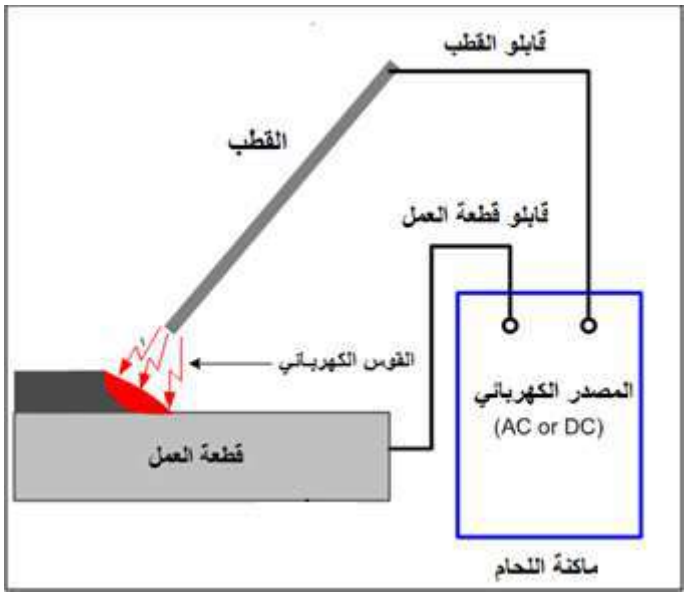
تتم عملية اللحام بالقوس الكهربائي عند ملامسة قطب اللحام قطعة العمل لوقت قصير جداً يتم خلاله تكوّن دائرة كهربائية مغلقة في منطقة اللحام تؤدي إلى سريان التيار الكهربائي بتحرك الشحنات الكهربائية من الإلكترود إلى قطعة العمل أو العكس، وتتولد حرارة عالية جداً عند موضع التلامس، ويتحول الهواء الموجود بين قطب اللحام وقطعة العمل إلى جزيئات متأينة أي موصلة للتيار الكهربائي تدعى بالبلازما (Plasma). ويتكون القوس الكهربائي بعد رفع التلامس بين القطب وقطعة العمل وترك مسافة قصيرة جداً بينهما بسبب استمرار سريان التيار الكهربائي عبر الفجوة الهوائية المتأينة. فالقوس الكهربائي عبارة عن تفريغ التيار الكهربائي عبر تلك الفجوة يولد حرارة عالية جداً بحيث ترتفع درجة حرارة منطقة اللحام لتصل إلى (5500°C) أو أكثر كافية لصهر معظم المعادن.

ومن الجدير بالذكر أنه تتكون ثلاث مناطق لحام نتيجة انصهار معدن قطعة العمل، فالمنطقة الأولى تتمثل بالمنطقة المنصهرة (Fusion Zone) والتي تتكون من خليط من مادة الحشو ومادة قطعة العمل وهي منطقة منصهرة تماماً وذات تجانس عالٍ بين مكوناتها التي انصهرت أثناء اللحام لتملأ بركة اللحام، وإن عملية انجماد هذه المنطقة يشبه إلى حدٍ كبير عملية السباكة، والمنطقة الثانية تكون منطقة اللحام المتداخلة (Weld Interface) وهي المنطقة التي تفصل بين المنطقة المنصهرة والمنطقة المتأثرة بالحرارة Heat Affected Zone (HAZ) وتتكون من شريط رقيق نتيجة الانصهار الكلي أو الجزئي لمعدن قطعة العمل، أما بالنسبة إلى المنـطقة الثالثة فهي المنطقة المتأثرة بالحرارة (HAZ) والمعدن في هذه المنطقة يتعرض إلى درجة حرارة أقل من درجة حرارة انصهاره بحيث تكون كافية لأحداث تغيرات في البنية المجهرية له وهو في الحالة الصلبة، علماً أن مكونات التركيب الكيمياوي في هذه المنطقة تشبه مكونات التركيب الكيمياوي لمعدن قطعة العمل الأساس.

2-1 لحام القوس الكهربائي Arc Welding

يُعد لحام القوس الكهربائي أحد أنواع لحام الحالة السائلة (اللحام الانصهاري)إذ لم يتم استخدام لحام القوس الكهربائي إلا بعد عام 1800م حينما اكتشف العالم البريطاني (همفري دافي) القوس الكهربائي، وقد بدأت بها مسيرة تطوير لحام القوس الكهربائي واستمرت باختراع الروسي (سلافيانوف) الإلكترودات المعدنية وغيرها، واستخدمت الطريقة في نهاية القرن التاسع عشر، وانتشر تجارياً خلال الحرب العالمية الثانية في بناء السفن. واليوم يتم استخدامه بشكل واسع على المستوى الصناعي لربط الهياكل الفولاذية وغيرها.

تستخدم طريقة اللحام بالقوس الكهربائي لربط المعادن وتتضمن مجموعة من أنواع مختلفة لطرائق اللحام، إذ تتم عملية اللحام بانصهار المعدن نتيجة الحرارة المتولدة من القوس الكهربائي بين قطب ماكينة اللحام وقطعة اللحام ولا يتم تسليط أي ضغط على الأجزاء الجاري لحامها، والشكل (1-1) يوضّح مخطط عملية اللحام بالقوس الكهربائي.



الشكل 1-1 مخطط عملية اللحام بالقوس الكهربائي

يعرف القوس الكهربائي عبارة عن تفريغ للتيار الكهربائي عبر الفجوة الهوائية بين القطب والقطعة المراد لحامها كما ذكر سابقاً، ويساعد الهواء أو الغاز المتأين (البلازما) حول منطقة اللحام باستمرار تفريغ التيار الكهربائي وتوليد الحرارة وبالتالي استمرار عملية اللحام. وإن حالة التأين هي أن يصبح الهواء الموجود بين القطب وقطعة العمل موصلاً للتيار الكهربائي. وللبدء بعملية اللحام بالقوس الكهربائي لا بد أن يتم تماس القطب الكهربائي بالقطعة المراد لحامها لمدة قصيرة جداً وعند حصول القدح يرفع القطب مباشرة بمسافة قليلة جداً عن قطعة العمل تحافظ على استمرارية القوس الكهربائي، والخلوص المناسب يعتمد على عدة عوامل منها طريقة اللحام وقطر سلك اللحام وسرعة عملية اللحام وغيرها من العوامل. وتتطلب عملية القدح والبدء باللحام 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، وبالأخص في عملية اللحام بالقوس الكهربائي بالأقطاب المستهلكة. إن الطاقة الكهربائية إحدى أهم مصادر الحرارة المطلوبة لإجراء عمليات اللحام بالقوس الكهربائي، لسهولة استخدامها وتوافرها مقابل الحرارة العالية المطلوبة التي يزودها هذا المصدر، فضلاً على بساطة مُعداتها اللازمة وقلة كلفها، إذ يتم تزويد الطاقة الكهربائية من خلال ماكينة اللحام التي تعمل بالتيار المستمر (DC) أو التيار المتناوب (AC). تتم عملية اللحام إما يدوياً ومثالها اللحام بالقوس الكهربائي بقطب التنكستن (Gas Tungsten Arc Welding GTAW) واللحام بالقوس الكهربائي اليدوي (Manual Metal Arc Welding MMAW)، أو آلياً بتقنيات مختلفة مثل اللحام بالقوس الكهربائي والقطب المعدني (Gas Metal Arc Welding GMAW)، اللحام بالقوس الكهربائي الغاطس ولحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة الحاوية على مساعد الصهر (Flux– Cored Arc Welding FCAW).

3-1 تكنولوجيا القوس الكهربائي Arc Welding Technology

في هذه الفقرة سيتم التعرف إلى أهم المتطلبات التكنولوجية للقوس الكهربائي والتي تشمل أقطاب القوس الكهربائي وحجاب القوس الكهربائي ومصادر التيار الكهربائي:

1-3-1 أقطاب القوس الكهربائي

بالإمكان تقسيم الأقطاب المستخدمة في طريقة اللحام بالقوس الكهربائي إلى الأقطاب المستهلكة (Consumable Electrodes) والأقطاب غير المستهلكة (Non-consumable Electrodes). إذ يُعد القطب المستهلك المصدر الأساس لمعدن الحشو (Filler) المطلوب في لحام القوس الكهربائي وتكون على شكل أسلاك أو أقطاب أسطوانية ويتراوح طول القطب المستهلك بين (225-450 mm) وذات أقطار (1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.25, 4, 5, 6, 8, and 10 mm). يُعد استهلاك الأقطاب وتعويضها بأخرى جديدة من مشاكل وعيوب اللحام بالقوس الكهربائي بالأقطاب المستهلكة، نظراً للوقت الضائع أثناء عملية تعويض الأقطاب. أما في حالة استخدام أسلاك لحام تجهز من خلال لفة أسلاك كبيرة وتغذي باستمرار بركة اللحام فلن يكون هنالك ضياع في الوقت. تصنع الأقطاب غير المستهلكة من معدن التنكستن أو مادة الكرافيت التي تقاوم الانصهار ويتم تزويد بركة اللحام بمادة الحشو من خلال سلك منفصل. ومن الجدير بالذكر أن الأقطاب غير المستهلكة تتعرض أيضاً للتآكل بسبب كثرة الاستخدام مما يؤثر سلباً على إجراء عملية اللحام فضلاً عن الحاجة إلى استبدال هذه الأقطاب. ويمكن وضع تصنيف خاصة (ترميز) لأقطاب اللحام المستهلكة حسب الجمعية الأميركية للحام (American Welding Society; AWS) وتتكون من مجموعة من الأرقام والحروف والتي تمثل نوعية المعدن والمادة المغلفة (مساعد الصهر) وأوضاع اللحام واستخدامات كل نوع، وتصنف أسلاك اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي بحسب المواصفة إلى الآتي:

أ- أسلاك اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي للفولاذ الكربوني

AWS A5.1-91 Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding

الصنف الأول خاص بأقطاب الفولاذ الكربوني الخاص باللحام بالقوس الكهربائي اليدوي ويتكون من مجموعتين من الحروف والأرقام يفصل بينهما فاصل مثلا الرمز (E7018-1 H_4R) وكل حرف أو رقم يمثل خاصية معينة في القطب، والشكل (1-2) يوضّح الرمز الخاص بأقطاب الفولاذ الكربوني.

مثال 1: **وضّح ماذا تمثل الحروف والأرقام في رمز القطب (E7018 H_4R)** من ملاحظة الجدول (1-1):

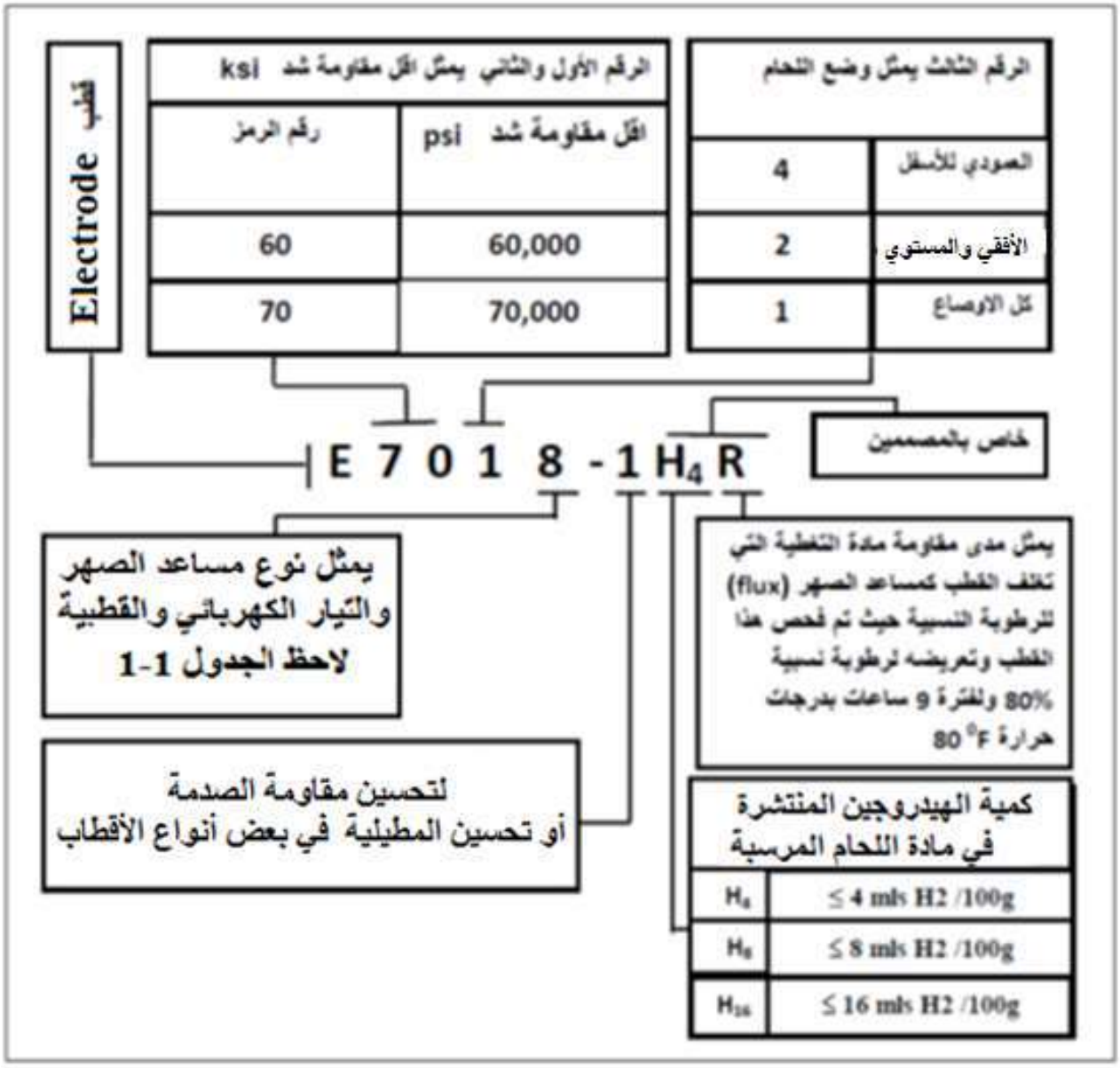
الحرف **E** يعني كلمة القطب (Electrode)

70 يمثل أقل مقاومة شد 70 ksi (كيلو باوند/إنج^2)

1 يمثل موضع اللحام: جميع مواضع اللحام F, H, V, OH.

8 يمثل نوع مساعد الصهر ونوع التيار الكهربائي والقطبية: منخفض الهيدروجين مع البوتاسيوم ومسحوق الحديد، (AC or DC$^+$).

H_4R خاص بالمصممين ويمكن مراجعة الشكل (1-2) لمعرفة المعلومات الإضافية للقطب.



شكل 1-2 الرمز الخاص بأقطاب الفولاذ الكربوني المستهلكة حسب التصنيف الأول

مثال 2: وضّح ماذا تمثل الحروف والأرقام في رمز القطب (E7024-1 H_8R)

الحرف **E** يعني كلمة القطب (Electrode)

70 يمثل أقل مقاومة شد 70 ksi (70 كيلوباوند/إنج^2)

2 يمثل وضع اللحام: الوضع الأفقي والمستوي (المسطح).

4 نوع مساعد الصهر ونوع التيار القطبية: مسحوق منخفض الحديد، (AC and DC^+ or DC^-)

1 يعني أن مقاومة صدمته تساوي أو أكثر من 27 J عند درجة حرارة 46°C−

H_8R خاص بالمصممين وبالإمكان مراجعة الشكل (1-2) لمعرفة المعلومات الإضافية للقطب.

جدول 1-1 مواصفات الأقطاب حسب التصنيف الأول AWS A5.1

رمز القطب	وضع اللحام	نوع التيار والقطبية	نوع مساعد الصهر	النفاذية
E6010	F, V, OH, H	DC^+	سيليلوزي ، صوديوم	عميق
E6011	F, V, OH, H	AC & DC^+	سيليلوزي ، بوتاسيوم	عميق
E6012	F, V, OH, H	AC & DC^+ or DC^-	أوكسيد التيتانيوم ، صوديوم	متوسط
E6013	F, V, OH, H	AC & DC^+ or DC^-	أوكسيد التيتانيوم ، بوتاسيوم	متوسط
E7014	F, V, OH, H	AC & DC^+ or DC^-	أوكسيد التيتانيوم ، بوتاسيوم	منخفض
E7015	F, V, OH, H	DC^+	الهيدروجين المنخفض ، صوديوم	متوسط
E7016	F, V, OH, H	AC & DC^+	الهيدروجين المنخفض ، بوتاسيوم	متوسط
E7018	F, V, OH, H	AC & DC^+	الهيدروجين المنخفض ، مسحوق الحديد ، بوتاسيوم	متوسط
E7018M	F, V, OH, H	DC^+	الهيدروجين المنخفض ، مسحوق الحديد	متوسط
E6019	F, V, OH, H	AC & DC^+ or DC^-	أوكسيد الحديد ، بوتاسيوم ، تيتانيوم	متوسط
E6020	F, H-Fillets	AC & DC^+ or DC^-	عالي أوكسيد الحديد	متوسط إلى عميق
E6022	F, H	AC & DC^+	عالي أوكسيد الحديد، لحام تمريرة واحدة	عميق
E7024	F, H-Fillets	AC & DC^+ or DC^-	مسحوق الحديد ، تيتانيوم	منخفض
E6027	F, H-Fillets	AC & DC^+ or DC^-	عالي أوكسيد الحديد ، مسحوق الحديد	متوسط
E7027	F, H-Fillets	AC & DC^+ or DC^-	عالي أوكسيد الحديد ، مسحوق الحديد	متوسط
E7028	F, H-Fillets	AC & DC^+	منخفض الهيدروجين ، بوتاسيوم ، مسحوق الحديد	متوسط
E7048	F, V, OH, H, V-down	AC & DC^+	منخفض الهيدروجين ، بوتاسيوم ، مسحوق الحديد	متوسط

ملاحظة: الوضع المستوي :F (flat)، الوضع العمودي :V ، الوضع فوق الرأس (العلوي): OH
الوضع الأفقي :H ، العمودي للأسفل :V-DOWN
تيتانيا: تعني أوكسيد التيتانيوم TiO_2

مثال 3: وضّح ماذا تمثل الحروف والأرقام في رمز القطب (E7018M)

الحرف **E** يعني كلمة القطب (Electrode)

70 يمثل أقل مقاومة شد 70 ksi (70 كيلوباوند/إنج^2).

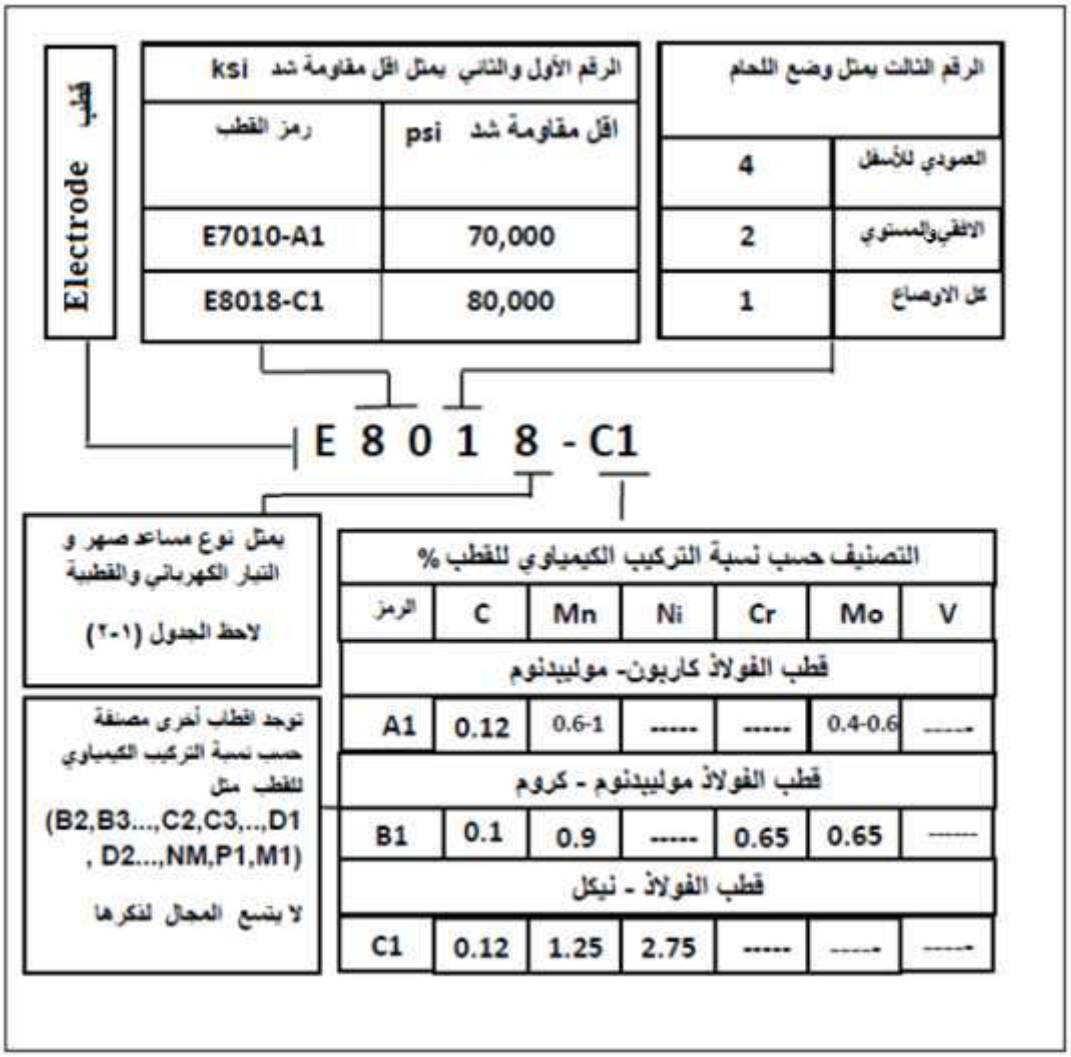
1 يمثل موضع اللحام: جميع مواضع اللحام F, H, V, OH.

8M يستخدم هذا القطب للتطبيقات العسكرية (M تعني Military) ويمتلك متانة عالية ويغطى بمساعد منصهر ذي رطوبة منخفضة ويفضل اللحام بتيار DC^+.

ب- أسلاك اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي للفولاذ منخفض السبك:

AWS A5.5 Low Alloy Steel Shielded Arc Welding Electrodes

الصنف الثاني خاص بأقطاب اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي (MMAW) للفولاذ منخفض السبك ويتكون من مجموعتين من الحروف والأرقام يفصل بينهما فاصل مثلاً القطب (E7010-A1) والقطب (E8018-C1) وكل حرف أو رقم يمثل خاصية معينة في القطب، والشكل (3-1) يوضّح الرمز الخاص بأقطاب الفولاذ السبائكي المنخفض السبك.



الشكل 3-1 الرمز الخاص بأقطاب الفولاذ منخفض السبك حسب التصنيف AWS

ملاحظة:

الرمز	C	Mn	Ni	Cr	Mo	V
	كاربون	منغنيز	نيكل	كروم	موليبدنوم	فاناديوم

تجدر الإشارة هنا إلى أن اختلاف التصنيف الأول عن التصنيف الثاني يكون في الجزء الثاني من الرمز الذي يلي الفاصل، إذ أن الجزء الثاني للتصنيف الأول وهو يمثل مدى مقاومة مساعد الصهر للرطوبة النسبية، أما الجزء الثاني للتصنيف الثاني فهو يمثل النسبة المئوية للتركيب الكيميائي للقطب (كما تمت الإشارة إليه أعلاه).

جدول 1-2 مواصفات الأقطاب حسب التصنيف الثاني AWS A5.5

النفاذية	نوع مساعد الصهر	نوع التيار والقطبية	وضع اللحام	رمز القطب
مجموعة أقطاب E70 (أقل مقاومة شد 70000 psi)				
عميق	عالي سليلوز ، الصوديوم	DC^+	F, V, OH, H	E7010
عميق	عالي سليلوز ، بوتاسيوم	AC & DC^+ or DC^-	F, V, OH, H	E7011
عميق	منخفض الهيدروجين ، صوديوم	DC^+	F, V, OH, H	E7015
متوسط	منخفض الهيدروجين ، مسحوق الحديد ،	AC & DC^+	F, V, OH, H	E7018
مجموعة أقطاب E80 (أقل مقاومة شد 80000 psi)				
عميق	عالي سليلوز ، الصوديوم	DC^+	F, V, OH, H	E8010
عميق	عالي سليلوز ، بوتاسيوم	AC & DC^+ or DC^-	F, V, OH, H	E8011
متوسط	أوكسيد التيتانيوم ، بوتاسيوم	AC & DC^+ or DC^-	F, V, OH, H	E8013
محدود النفاذية	منخفض الهيدروجين ، مسحوق الحديد	AC & DC^+	F, V, OH, H	E8018
مجموعة أقطاب E100 (أقل مقاومة شد 100000 psi)				
عميق	عالي سليلوز ، الصوديوم	DC^+	F, V, OH, H	E9010
عميق	عالي سليلوز ، بوتاسيوم	AC & DC^+ or DC^-	F, V, OH, H	E9011
متوسط	أوكسيد التيتانيوم ، بوتاسيوم	AC & DC^+ or DC^-	F, V, OH, H	E9013
محدود النفاذية	منخفض الهيدروجين ، مسحوق الحديد	AC & DC^+	F, V, OH, H	E9018
مجموعة أقطاب E90 (أقل مقاومة شد 90000 psi)				
عميق	عالي سليلوز ، الصوديوم	DC^+	F, V, OH, H	E10010
عميق	عالي سليلوز ، بوتاسيوم	AC & DC^+ or DC^-	F, V, OH, H	E10011
متوسط	أوكسيد التيتانيوم ، بوتاسيوم	AC & DC^+ or DC^-	F, V, OH, H	E10013
محدود النفاذية	منخفض الهيدروجين ، مسحوق الحديد	AC & DC^+	F, V, OH, H	E10018

مثال 4: **وضّح ماذا تمثل الحروف والأرقام في رمز القطب (E7010-A1)** من ملاحظة الجدول (1-2)

الحرف **E** يعني كلمة القطب (Electrode)

70 يمثل أقل مقاومة شد 70000 psi (باوند/إنج^2)

1 يمثل وضع اللحام: كل الأوضاع.

0 نوع مساعد الصهر ونوع التيار والقطبية: سليلوزي، صوديوم DC^+

A1 يمثل التركيب الكيمياوي للقطب ويمكن مراجعة الشكل (1-3) لمعرفة المعلومات الإضافية للقطب.

مثال 5: **وضّح ماذا تمثل الحروف والأرقام في رمز القطب (E8018 -C1)**

الحرف **E** يعني كلمة القطب (Electrode)

80 يمثل أقل مقاومة شد 80000 psi (باوند/إنج^2)

1 يمثل وضع اللحام: كل الأوضاع.

8 نوع مساعد الصهر ونوع التيار والقطبية: منخفض الهيدروجين، بوتاسيوم AC or DC^+

C1 يمثل نسبة التركيب الكيمياوي للقطب.

مثال 6: **وضّح ماذا تمثل الحروف والأرقام في رمز القطب (E9018 -B1)**

الحرف **E** يعني كلمة القطب (Electrode)

90 يمثل أقل مقاومة شد 90000 psi (باوند/إنج^2)

1 يمثل موضع اللحام: جميع مواضع اللحام F, H, V, OH.

8 نوع مساعد الصهر ونوع التيار والقطبية: منخفض الهيدروجين، بوتاسيوم $AC\ or\ DC^+$

B1 يمثل التركيب الكيمياوي للقطب ويمكن مراجعة الشكل.

مثال 7: قارن بين الرمزين المستخدمين في التصنيفين الأول والثاني لأقطاب لحام القوس الكهربائي اليدوي.

- إن التصنيف الأول يطبق في أقطاب الفولاذ الكربوني المستخدمة في لحام القوس الكهربائي اليدوي للفولاذ الكربوني، بينما التصنيف الثاني خاص بأقطاب اللحام بالقوس الكهربائي للفولاذ السبائكي منخفض السبك.
- وكلا التصنيفين يستخدمان للأقطاب المستهلكة.
- الجزء الأول من الرمز المستخدم في التصنيف الأول يشبه (من حيث الترميز) الجزء الأول من الرمز المستخدم في التصنيف الثاني.
- اختلاف التصنيف الأول عن التصنيف الثاني يكون في الجزء الثاني من الرمز الذي يلي الفاصل إذ أن الجزء الثاني للتصنيف الأول يمثل نسبة الهيدروجين المتوقع تواجدها (امتصاصها من الجو) في منطقة اللحام، أما الجزء الثاني للتصنيف الثاني فهو يمثل النسبة المئوية للتركيب الكيميائي للقطب.

وتجدر الإشارة هنا إلى أنه توجد أنواع أخرى للأقطاب المستهلكة لا يتسع المجال لذكرها.

2-3-1 حجاب القوس الكهربائي Arc Shielding

في أثناء إجراء عملية اللحام بالقوس الكهربائي فإن غازات الأوكسجين والهيدروجين والنتروجين الموجودة في الهواء ستتفاعل مع المعدن المنصهر مخلفة ورائها عيوباً تضعف الوصلة الملحومة، لهذا فإن الوظيفة الأولى للحجاب (Shielding) هي حماية منطقة وبركة اللحام وعزلها عن المحيط الخارجي تلافياً لحدوث امتصاص أو تفاعل مع الغازات المنتشرة في الهواء، فضلاً عن ذلك فإن سرعة اللحام والخواص الميكانيكية وشكل خط اللحام وتوليد الدخان واستقرار القوس الكهربائي كل هذه العوامل تتأثر بوجود الحجاب الغازي. والحجاب يتكون من انصهار مساعد الصهر وتغطية بركة اللحام.

3-3-1 مساعد الصهر Flux

هو عبارة عن مادة تقوم بمنع الأكسدة ومنع دخول أي ملوثات أخرى لبركة منصهر اللحام إذ يعمل مساعد الصهر على تحليل هذه الأكاسيد والمواد الغريبة بشكل يسهل إزالتها من منطقة اللحام.

أثناء عملية اللحام ينصهر مساعد الصهر ويصبح خبثاً سائلاً يطفو فوق بركة اللحام ليحميها، وبعد انتهاء عملية اللحام يتجمد الخبث ويزال بسهولة. تختلف طريقة إضافة مساعد الصهر إلى عملية اللحام بحسب نوع عملية اللحام ويمكن تلخيص طرائق إضافة مساعد الصهر بالآتي:

طرائق إضافة مساعد الصهر:

- طريقة مساعد الصهر على شكل حبيبات إلى منطقة اللحام مثل اللحام بالقوس الكهربائي المغمور. Submerged Arc Welding (SAW)
- طريقة تغطية قطب اللحام بمساعد الصهر مثل اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي Manual Metal Arc Welding (MMAW)
- طريقة القطب المجوف بمساعد الصهر مثل لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة Flux-Cored Arc Welding (FCAW)

وظائف مساعد الصهر:

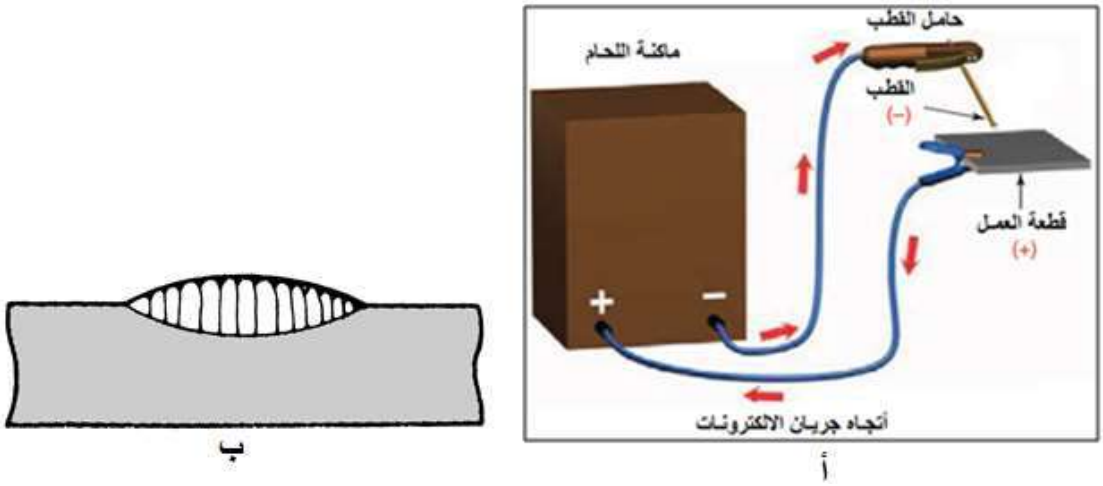
- حماية القوس الكهربائي وبركة اللحام من التأكسد.
- يعمل على استقرار القوس الكهربائي.
- يقلل من الترشش أثناء اللحام.
- يحسن شكل اللحام ويعطي شكلاً منتظماً لبركة اللحام بعد التجمد.

4-3-1 مصادر التيار الكهربائي Power Sources in Arc Welding

يستخدم كل من التيار المباشر (DC) والتيار المتناوب (AC) في طرائق اللحام بالقوس الكهربائي، وتكون مكائن اللحام بالتيار المتناوب (AC) أقل كلفة ولكنها تستخدم لغرض لحام المعادن الحديدية فقط أما مكائن لحام التيار المباشر (DC) فتستخدم لأنواع المعادن كافة وهي تعطي جودة أفضل للملحومات بسبب السيطرة بشكل أفضل على القوس الكهربائي. إن مكائن التيار المتناوب (AC) لا تتأثر باتجاه الربط لأن التيار المتناوب يغير اتجاهه كل 100 مرة بالثانية أي أن التردد الكهربائي يساوي 50 ذبذبة لكل ثانية (50 Hz)، وهذا هو التردد المعمول به في العراق ويقاس بوحدة الهيرتز (Hz)، أما مكائن القوس الكهربائي التي تعمل بالتيار المستمر فلها إمكانية الربط بطريقتين بقطبية مباشرة وبقطبية معكوسة.

الربط بالقطبية المباشرة السالبة (DC^-):

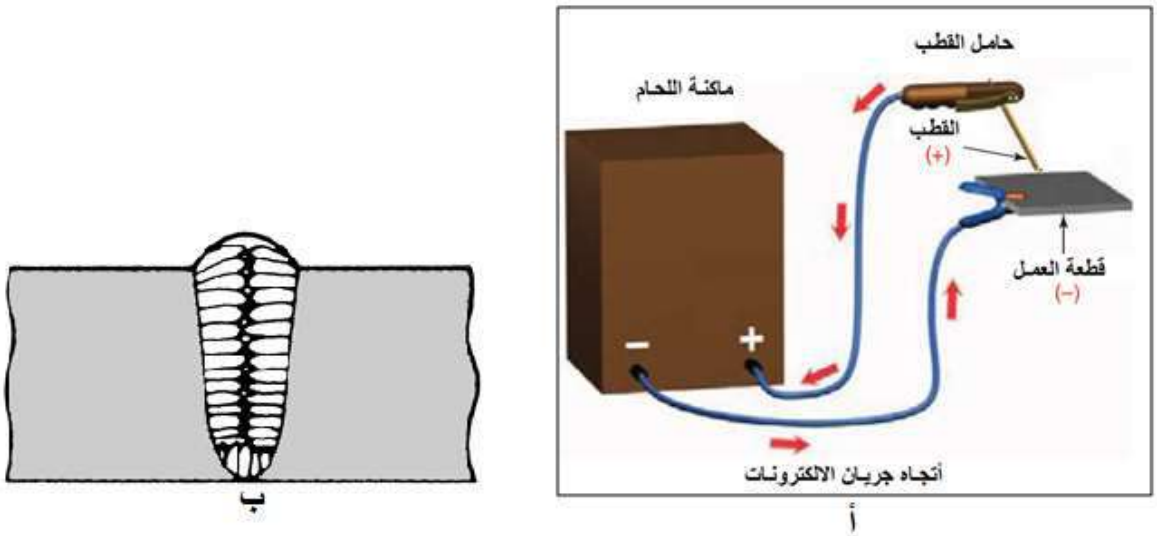
التيار الكهربائي المستخدم في عملية اللحام بالقوس الكهربائي هو عبارة عن سريان الإلكترونات ضمن الدائرة الكهربائية الخاصة بعملية اللحام، وإن اتجاه هذا السريان للإلكترونات يسمى بالقطبية (Polarized) فحينما يتم ربط قطب ماكينة اللحام (الإلكترود) بالقطب السالب ووصلة اللحام بالقطب الموجب تتجه الإلكترونات من القطب السالب إلى القطب الموجب وهذه القطبية تسمى بالقطبية المباشرة السالبة (Direct Current Electrode Negative DCEN) أو تكتب (Direct Current Straight Polarity DCSP). وتتركز الحرارة المتولدة من القوس الكهربائي في قطعة العمل بحدود (70%) نتيجة تصادم الإلكترونات في أثناء التفريغ بقطعة العمل وباقي نسبة الحرارة (30%) ستتركز بالأقطاب. لذا يسمح الربط بالقطبية السالبة للتيار المباشر باستخدام أسلاك لحام ذات أقطار صغيرة والذي يساعد في تركيز القوس الكهربائي، وشكل اللحام يكون واسعاً ومحدود النفاذية وبالتالي فهو مفيد جداً في لحام الصفائح الفولاذية وخصوصاً ذات السمك القليل. الشكل (4-1) يوضّح طريقة الربط بالقطبية المباشرة السالبة وشكل مقطع اللحام.



الشكل 1-4 أ- طريقة الربط بالقطبية المباشرة السالبة، ب- شكل مقطع اللحام

الربط بالقطبية المباشرة الموجبة (DC^+):

في هذه الحالة يكون الربط بشكل مخالف للربط بالقطبية السالبة، إذ يتم ربط القطب (الإلكترود) أي ماكينة اللحام بالقطب الموجب وقطعة العمل بالقطب السالب ويكون اتجاه سريان الإلكترونات من قطعة العمل (السالبة) إلى القطب (الموجب)، ويطلق على هذا النوع من الربط بالربط بالقطبية المباشرة المعكوسة Direct Current Reverse Polarity (DCRP) أو (Direct Current Electrode Positive DCEP)، ويمكن استخدام هذا الربط هي المعادن كافة ولكن يفضل للمعادن اللاحديدية مثل الألمُنيوم والمغنسيوم اللذين يكونان طبقة أوكسيدية على سطحهما إذ يقوم هذا الربط بفعل تنظيف جيد وبالتالي إمكانية الحصول على ملحومات خالية من العيوب. ولكون الحرارة في هذا الربط تتركز في الأقطاب أكثر مما هي عليه في قطعة العمل مما يؤدي إلى معدل انصهار عالٍ للأقطاب ليساعد على زيادة سرعة اللحام مقارنة بالربط بالقطبية السالبة. فضلاً عن استخدام هذا الربط في اللحام بالوضع العمودي والرأسي. والشكل (1-5) يوضّح طريقة الربط وشكل مقطع اللحام الذي يكون ضيقاً ونافذاً.



الشكل 1-5 أ- طريقة الربط بالقطبية المباشرة الموجبة ب- شكل مقطع اللحام

4-1 التحليل الرياضي للقدرة المجهزة بالقوس الكهربائي
Mathematical Analysis for the Power of Arc Welding Operation

إن الطاقة المتولدة في المصدر المجهز يتم استعمالها لغرض صهر المعدن المراد لحامه وتسمى بالقدرة المجهزة وتقاس بالواط (**W**) وتستعمل في أنواع طرائق اللحام بالقوس الكهربائي كافة وهي حاصل ضرب التيار الكهربائي (**I**) المار خلال القوس الكهربائي، ووحدة قياسه الأمبير (A) وفرق الجهد عليه (E) ووحدة قياسه الفولت (V)، وليست كل الطاقة المجهزة من المصدر الكهربائي يتم استعمالها لصهر المعدن، إذ أن جزءاً من هذه الطاقة يضيع كخسائر عبر التوصيل والحمل والإشعاع إلى خارج منطقة اللحام ويمكن تلخيص مراحل تخفيض القدرة المجهزة من المصدر واللازمة لعملية الانصهار بالآتي:

- مرحلة انتقال الحرارة بين مصدر الطاقة وسطح وصلة اللحام وتمثل هذه المرحلة بمعامل انتقال الحرارة (**Heat Transfer Factor** f_1) وهو عبارة عن النسبة بين كمية الحرارة الحقيقية المستلمة من وصلة اللحام مقسومة على الحرارة الكلية المتولدة في المصدر المجهز.
- مرحلة توصيل الحرارة من منطقة اللحام وانتشارها إلى بقية أجزاء وصلة اللحام وتمثل هذه المرحلة بمعامل الصهر (**Melting Factor** f_2) وهو عبارة عن نسبة الحرارة المستلمة في سطح القطعة الملحومة والتي تستعمل لغرض الصهر. يتراوح مقدار المعاملين f_1 , f_2 بين الواحد والصفر ولكونهما معاملين فهما بدون وحدات. إن معامل انتقال الحرارة (f_1) يعتمد بشكل أساس على عملية اللحام وإمكانية تحويل الطاقة الكهربائية إلى حرارة مفيدة على سطح الملحومة، أما عامل الصهر (f_2) فيعتمد بشكل مباشر على الخواص الحرارية للمعدن المراد لحامه وكذلك على عملية اللحام ونوع الربط بين القطع المراد لحامها وسمك الملحومة ويمكن تلخيص المعادلات الرياضية الخاصة بلحام القوس الكهربائي بالآتي:

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

إذ أن:

P: القدرة المجهزة بالواط (W)، I: التيار الكهربائي بالأمبير(A)، E: فرق الجهد بالفولتية (V)

يمكن حساب الطاقة الحرارية الصافية واللازمة لعملية صهر المعدن (القدرة الفعالة) من ضرب القدرة المجهزة بمعامل انتقال الحرارة وعامل الصهر بالآتي:

$$H_W = f_1 \times f_2 \times P \qquad 1\text{-}2$$

إذ أن:

H_W: القدرة الفعالة ووحدتها الواط (**W**)، ومن الممكن الاستفادة من الجدول (3-1) في معرفة قيم معامل انتقال الحرارة f_1 وسيتم إعطاء قيم f_1 , f_2 في المسائل مباشرة.

الجدول (1-3) قيم معامل انتقال الحرارة (f_1)

نوع عملية اللحام	معامل انتقال الحرارة f_1
لحام القوس الكهربائي اليدوي (MMAW)	0.9
لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المعدنية المحاطة بالغاز الحاجب (GMAW)	0.9
لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة الحاوية على مساعد الصهر (FCAW)	0.9
لحام القوس الكهربائي المغمور (SAW)	0.95
لحام القوس الكهربائي بأقطاب التنكستن (GTAW)	0.7

إن مقدار الحرارة اللازمة لصهر وحدة حجم من المعدن في عملية اللحام تسمى وحدة الطاقة النوعية ويرمز لها بالرمز U_m ووحدة قياسها J/mm^3، وهي عبارة عن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة المعدن من درجة حرارة الغرفة إلى نقطة انصهاره (حرارة محسوسة)، وكمية الحرارة اللازمة لانصهار المعدن (حرارة كامنة) (انتقال المعدن من الطور الصلب إلى الطور السائل) وسيتم ذكر قيم وحدة الطاقة النوعية في المسائل مباشرة ومنها عند ذلك يمكن استخراج معدل حجم انصهار المعدن $\dot{V}$ ووحدة قياسه (mm^3/s).

$$\dot{V} = \frac{Hw}{Um} \qquad (1\text{-}3)$$

ويمكن حساب سرعة عملية اللحام بالقوس الكهربائي بالمعادلة الآتية:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \qquad (1\text{-}4)$$

إذ أن:

v: سرعة عملية اللحام بالقوس الكهربائي ووحداتها mm/s

A: مساحة مقطع اللحام ووحداتها mm^2

$\dot{V}$: معدل حجم انصهار المعدن ووحدة قياسه mm^3/s

مثال 8: إذا كان مصدر الطاقة في إحدى عمليات اللحام بالقوس الكهربائي يعطي قدرة مجهزة بمقدار (3500 W) وكان معامل انتقال الحرارة f_1 (0.7) ومعامل الصهر f_2 (0.5)، جد مقدار القدرة الفعالة.

الحل:

$$H_W = f_1 \times f_2 \times P$$

$$H_W = 0.7 \times 0.5 \times 3500$$

$$H_W = 1225\ W$$

مثال 9: في إحدى عمليات اللحام بالقوس الكهربائي كان مقدار التيار (200 A)، وفرق الجهد (10 V) جد مقدار القدرة المجهزة.

الحل:

$$P = I \times E$$

$$P = 200 \times 10$$

$$P = 2000\ W$$

مثال 10: في إحدى عمليات اللحام بالقوس الكهربائي وحدة الطاقة النوعية ($10\ J/mm^3$) والقدرة الفعالة (1200 W)، ومساحة مقطع اللحام ($20\ mm^2$)، جد سرعة اللحام.

الحل:

$$\dot{V} = \frac{Hw}{Um}$$

$$\dot{V} = \frac{1200}{10} = 120\ mm^3/s \qquad \text{(معدل حجم انصهار المعدن)}$$

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{120}{20} = 6\ mm/s \qquad \text{(سرعة اللحام)}$$

مثال 11: في إحدى عمليات اللحام بالقوس الكهربائي وحدة الطاقة النوعية ($10.5\ J/mm^3$)، ومساحة مقطع اللحام ($25\ mm^2$)، وسرعة اللحام (4 mm/s)، جد القدرة الفعالة.

الحل:

بما أن سرعة عملية اللحام بالقوس الكهربائي: $v = \frac{\dot{}}{A}$

فإن معدل حجم انصهار المعدن: $\dot{V} = v \times A$

$$\dot{V} = 4 \times 25 = 100\ mm^3/s$$

$$\dot{V} = \frac{Hw}{Um} \quad \rightarrow \quad H_w = \dot{V} \times Um = 100 \times 10.5 = 1050\ W$$

1-4-1 دورة التشغيل Duty Cycle

إحدى تصنيفات سعة مكائن اللحام (خصائص الماكنة) هي دورة التشغيل والتي تعني قدرة ماكنة اللحام بالاستمرار في توليد تيار اللحام المطلوب خلال مدة اللحام. ***وتعرّف دورة التشغيل على أنها نسبة عدد الدقائق المستمرة في عملية اللحام لكل 10 دقائق، بشرط أن تكون ماكنة اللحام في وضع آمن عند تجهيز تيار اللحام المطلوب***.

على سبيل المثال، ماكنة لحام ذو 150 Amp مع 30% دورة تشغيل: تعني أن ماكنة اللحام يجب أن توقف (استراحة) عن اللحام لمدة لا تقل عن 7 دقائق بعد كل 3 دقائق لحام مستمر عند اللحام بالتيار الأقصى (150 Amp)، أقل من وقت اللحام هذا (3 دقائق) سيُعد خسارة اقتصادية. أما في حالة الاستمرار باللحام أكثر من هذا الوقت سيؤدي إلى تلف (عطب) الماكنة وخصوصاً في حالة عدم توافر منظومة (متحسسات) الحماية الداخلية Internal Protection System في الماكنة، إذ تعمل هذه المتحسسات على فصل الماكنة آلياً عن العمل. علماً أن المكائن ذات دورات التشغيل العالية تكون غالية الثمن، بسبب الكلفة العالية للمتطلبات التصميمية لتلك المكائن من حيث تصنيعها بمحولات ذات جودة عالية وأحجام واسعة فضلاً عن تزويدها بمنظومات خاصة لتبريد الماكنة.

وتجدر الإشارة إلى أنه وفي مكائن لحام القوس الكهربائي ذات الأقطاب المستهلكة لا تُعد دورة التشغيل عاملاً مهماً كما في مكائن اللحام ذات الأقطاب غير المستهلكة، لأنه من الطبيعي إيقاف الماكنة عن اللحام بين مدة وأخرى بسبب الحاجة إلى وضع أقطاب جديدة وبالتالي سيتم خلال هذه المدة إراحة الماكنة (تبريدها).

الموضوع المهم هو معرفة العاملين على مكائن اللحام بدورة التشغيل الحقيقية التي تمكنه من الحصول على إنتاجية أعلى مع استخدام التيار الحقيقي وعلى وفق حاجته وبأقل توقف لماكنة اللحام وبالتالي يساعده ذلك حتى في اختيار ماكنة اللحام الاقتصادية على وفق الحاجة الفعلية عند شرائها.

يمكن حساب دورة التشغيل الحقيقية من خلال تطبيق المعادلة الآتية:

$$D.C.T\ \% = (\frac{S}{I})^2 \times D.C.\% \qquad (1\text{-}5)$$

إذ إن:

D.C.T%: دورة التشغيل الحقيقية ، S: التيار التصميمي ، I: التيار الفعلي للحام،

D.C.% : دورة التشغيل التصميمية

مثال 12: ماكنة لحام قوس كهربائي التيار التصميمي لها يساوي 180 Amp ودورة التشغيل التصميمية عند هذا التيار تساوي 15%، احسب مقدار دورة التشغيل الحقيقية في حالتي اللحام بتيار يساوي 90 Amp و 60 Amp

الحل:

$$D.C.T\ \% = (\frac{S}{I})^2 \times D.C.\%$$

$$D.C.T\ \% = (\frac{180}{90})^2 \times 15\% = 60\%$$

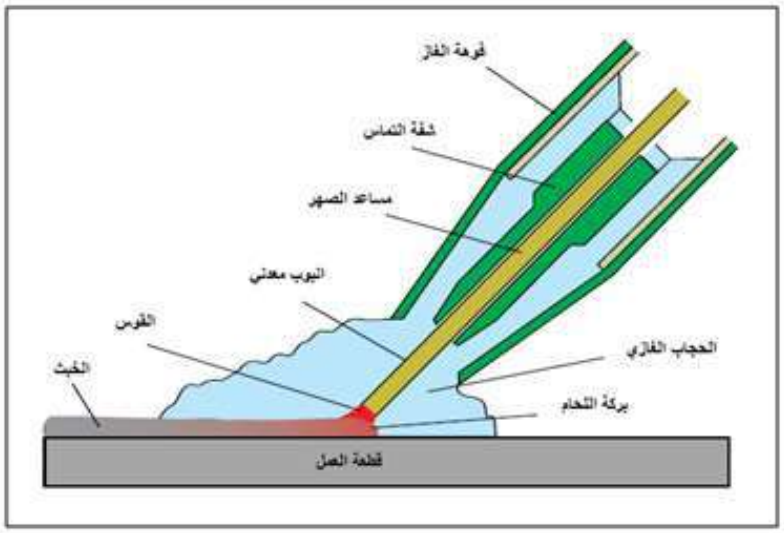
$$D.C.T\ \% = (\frac{180}{60})^2 \times 15\% = 135\%$$

ملاحظة: في حالة الناتج لدورة التشغيل الحقيقية أعلى من 100% فأن ذلك يعني أن الماكنة ستعمل بدورة تشغيل كاملة (100%) عند تيار اللحام هذا أو أي تيار لحام أقل منه.

تفسير: في هذا المثال، عند اللحام بتيار يساوي 90 Amp سيتم تشغيل الماكنة (إجراء عملية اللحام) كل 6 دقائق ويجب أن تتوقف عن اللحام 4 دقائق على الأقل لضمان ديمومة عملها. أما في حالة اللحام بتيار يساوي 60 Amp أو اقل منه فلا حاجة لإراحة (توقف عملية اللحام) الماكنة من عملية اللحام.

5-1 لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة الحاوية على مساعد الصهر
Flux-Cored Arc Welding (FCAW)

يُعد أحد أنواع طرائق لحام القوس الكهربائي وبدأ تطويره منذ عام 1950م، وهي تقنية مطوّرة لطريقة لحام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المحجوب بالغاز الخامل (GMAW)، إلا أن قطب اللحام عبارة عن قطب مجوف قابل للاستهلاك ويزود من لفة طويلة لتغذية منطقة اللحام بصورة مستمرة ويملأ القطب المجوف بمساعد الصهر ومكونات معدنية سبائكية تقوم بتوليد الحجاب الغازي حينما تتعرض إلى درجات حرارة مرتفعة أثناء إجراء عملية اللحام. إن القطب المجوف ينتج قوساً كهربائياً أكثر استقراراً، ويحسن من شكل خطوط اللحام، كذلك يحسن الخواص الميكانيكية للملحومة مقارنة مع لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المغلفة (SMAW)، وعلى الرغم من كلفته الواطئة فإنه يعطي ملحومات عالية الجودة. وتستخدم الأقطاب المجوفة التيار المباشر DC مصدراً لتوليد الحرارة اللازمة لانصهار قطعة العمل المراد لحامها والشكل (1-6) يوضّح مخطط بسيط لطريقة اللحام بالقوس الكهربائي للأقطاب المجوفة الحاوية على مساعد الصهر.



الشكل 1-6 مخطط بسيط لطريقة اللحام بالقوس الكهربائي للأقطاب المجوفة الحاوية على مساعد الصهر

وتقسم طريقة اللحام بالأقطاب المجوفة إلى تقنيتين:

الأولى: تقنية اللحام بالأقطاب المجوفة باستعمال الحجاب الغازي المتولد ذاتياً (Self-Shielding)
يستعمل هذا النوع من اللحام لغرض لحام أنواع عديدة من الفولاذ واطئ ومتوسط الكربون وكذلك يستعمل لأنواع الفولاذ منخفض السبك عالي المقاومة. ولا يحتاج إلى إضافة الغاز الحاجب. لأن الغاز يتولد ذاتياً بفعل تحلل مساعد الصهر عند تعرضه للحرارة العالية أثناء عملية اللحام. هنالك بعض المحددات لهذه التقنية تتلخص بتكون الخبث على سطح منطقة اللحام والذي يجب إزالته بعد إتمام عملية اللحام، وكذلك يقتصر استخدامها على لحام المعادن الحديدية. كما ويستخدم هذا النوع في لحام الوصلات ذات المدى الواسع من السمك (1.5 - 6 mm)، ولأشكال الوصلات كافة ويستعمل في بناء السفن والجسور والصناعات الهيكلية.

الثانية: تقنية اللحام بالأقطاب المجوفة بإضافة الحجاب الغازي (Dual Shielding)

هنا يستعمل الحجاب الغازي بإضافته من مصدر خارجي، ويستعمل هذا النوع في لحام المعادن الحديدية المختلفة كما في النوع السابق. يتميز هذا النوع عن النوع السابق (بدون إضافة الغاز الحاجب من مصدر خارجي) على إمكانية لحام الوصلات ذات سمكٍ أكبر ولغاية (12 mm). ويستعمل لوصلات اللحام التناكبي والتراكبي والزاوي لوصلات مترابطة بزاوية قائمة ويستعمل لربط خزانات السفن والأنابيب ومُعدات إزالة التربة وسكك الحديد والسيارات وتصنيع الهياكل الحديدية.

1-5-1 فوائد لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة

The Advantages of Flux-Cored Arc Welding

- يستعمل للحام الوصلات ذات الربط التناكبي والتراكبي والربط بزاوية قائمة.
- يعمل على تحسين الخواص الميكانيكية والميتولورجية للملحومة.
- قد لا يحتاج إلى إضافة الغاز الحاجب لأنه يقوم بتوليده ذاتياً ويمكن اللحام في الهواء الطلق أو تحت ظروف جوية قاسية.
- معدل انصهار عالي للملحومة والمعدن المضاف.
- معدل إنتاجية عالية لكون عملية اللحام تتم بشكل آلي أو شبه آلي.
- لا تتطلب مهارة عالية لعامل اللحام عند المقارنة مع عمليات اللحام (MMAW) و (GTAW)
- يحتاج إلى عمليات تنظيف أقل بعد عملية اللحام.

2-5-1 محددات لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة

The Limitations of Flux-Cored Arc Welding

- قد تحصل عملية التصاق لطرف القطب المجوف مع الملحومة بسبب انصهار طرف القطب.
- في بعض الأحيان تكون التغذية غير مستمرة لسلك اللحام بسبب مشاكل ميكانيكية عند التغذية من لفة السلك المغذي.
- قد تتكون عيوب مسامية في الملحومة بسبب الغازات وبالأخص من القطب المجوف بحيث تبقى الفقاعات الغازية بعد عملية التجمد.
- سلك اللحام مرتفع الثمن مقارنة بأسلاك اللحام التي تستعمل في عملية اللحام (MMAW).
- الجهاز والمُعدات المستعملة في عملية اللحام بالقطب المجوف أقل قابلية نقل مقارنة بطريقتي اللحام بـ (MMAW) و (SAW).
- كمية الدخان الناتجة من عملية اللحام بالقطب المجوف تكون كبيرة مقارنة بطريقتي اللحام (MMAW) و (SAW).

- عملية استبدال السلك المغذي تتطلب تغيير اللفة بأكملها وهذا يتم بشكل بطئ وصعب مقارنةً بطريقتي اللحام (MMAW) و (SAW).

تعتمد عملية لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة مع مساعد الصهر على العوامل الآتية:

1. الاختيار الصحيح لسلك اللحام المستهلك: يفضل أن يكون اختيار السلك متناسباً من حيث تركيبه الكيمياوي مع الملحومة فضلاً عن تحقيقه خواصاً ميكانيكية مشابه أو أعلى من المعدن الأساس. أن السلك بشكل عام يجب أن يكون خالٍ من أي شوائب سطحية أو صدأ سطحي ومعظم الأسلاك مطلية بالنحاس لتساعد على تسهيل عملية التفريغ الكهربائي، والجدول (1-4) يوضّح مقدار تيار واتجاه اللحام نسبةً إلى قطر السلك.

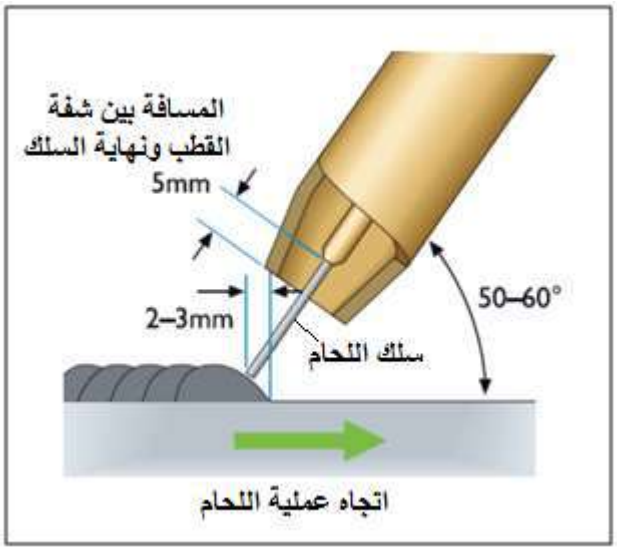
جدول 1-4 مقدار التيار واتجاه اللحام و قطر سلك لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة

قطر السلك (ملم)	*أتجاه اللحام*	*التيار (أمبير)*
1.2	أفقي	300-200
1.2	عمودي للأعلى	250-150
1.6	أفقي	400-300
1.6	عمودي للأعلى	250-180

2. الاختيار الصحيح للمصدر الكهربائي الذي يجهز عملية اللحام بالطاقة: يعتمد اختيار المصدر الكهربائي على مقدار أكبر قدرة خارجة من ماكينة اللحام ودورة التشغيل وقابلية النقل لجهاز اللحام وعوامل السيطرة الخارجية مثل (اختيار الفولتية المناسبة والسيطرة على سرعة تغذية السلك).

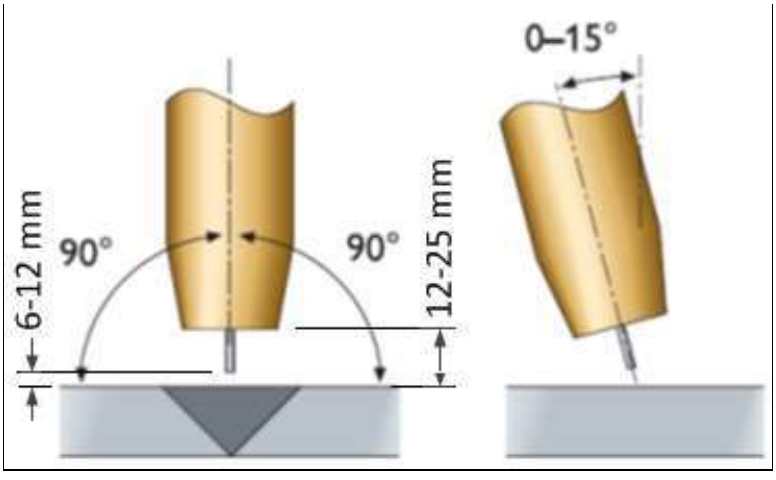
3. الاختيار الصحيح للحجاب الغازي عند استخدام تقنية اللحام بالأقطاب المجوفة بإضافة الحجاب الغازي (Dual Shielding): أن الاختيار الصحيح للحجاب الغازي يؤثر بشكل مباشر على شكل وجودة منطقة اللحام ويكون الخليط من الحجاب الغازي عبارة عن ثاني أوكسيد الكربون (CO_2) بنسبة 100% أو ثاني أوكسيد الكربون والآركون (Argon / CO_2 gas mixture).

4. التطبيق التقني الصحيح لعملية اللحام: أن التطبيق التقني الصحيح لعملية اللحام يشمل الاختيار الأمثل لاتجاه شوط اللحام (Direction of travel) وزاوية ميلان القطب نسبة إلى الملحومة (Angle of electrode) والمسافة بين شفة القطب ونهاية السلك (Electrical Stick - out) وسرعة اللحام (Travel speed). ولغرض إجراء التطبيق الصحيح لعملية اللحام بالأقطاب المجوفة ينبغي أن يكون اتجاه شوط اللحام يعتمد على تقنية السحب (Drag Technique) وبزاوية ميلان للقطب (50–60°)، كما موضح في الشكل (1-7).



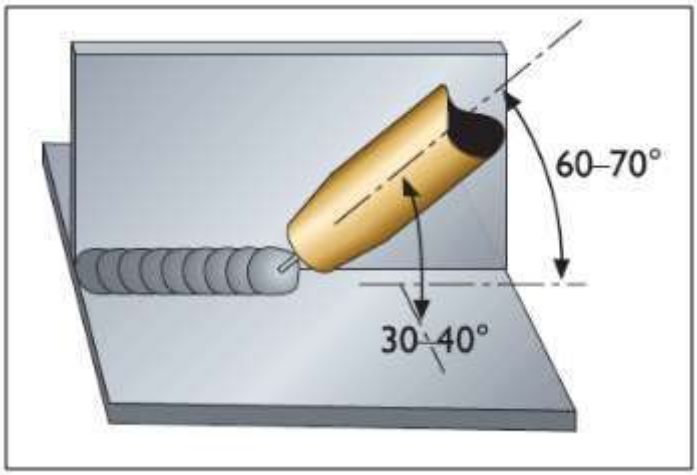
شكل 1-7 اتجاه عملية اللحام بالأقطاب المجوفة

إن اعتماد تقنية السحب في عملية اللحام بالأقطاب المجوفة من شأنه أن يعطي ملحومة ذات جودة عالية واختراق عميق للحام وعدم تكون الخبث المتطاير فوق بركة اللحام، أما في حالة استخدام تقنية الدفع (Push Technique) عند إجراء عملية اللحام فإنها تعطي ملحومة ذات جودة وعمق لحام أقل وتكوّن الخبث المتطاير عند بركة اللحام. حينما يكون اللحام تقابلي (Butt Welds) فيتم اعتماد تقنية السحب وبزاوية ميل (0-15º)، وكما موضّح في الشكل (1-8).



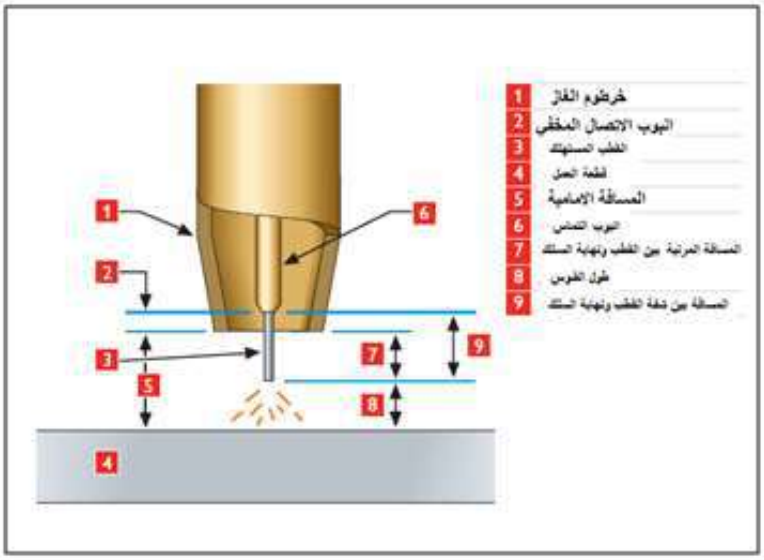
شكل 1-8 اللحام التقابلي بالأقطاب المجوفة

حينما يكون المطلوب ربط قطعتين إحداهما أفقية والأخرى شاقولية (أي أن تكون الزاوية بينهما قائمة) الأفضل اعتماد تقنية السحب وبزاوية ميل ($30–40^0$)، ويجب مراعاة تثبيت طرف السلك بمنتصف زاوية الربط، وكما موضّح في الشكل (1-9).



شكل 1-9 اللحام بالأقطاب المجوفة لقطعتين مربوطتين بزاوية قائمة

تجدر الإشارة هنا إلى أهمية ضبط المسافة بين طرف القطب ونهاية السلك (Electrical Stick-Out)، وكما موضّح في الشكل (1-10). إذ زيادة هذه المسافة تؤدي إلى زيادة المقاومة الكهربائية وتنتج عنها زيادة درجة الحرارة والذي يؤدي بدوره إلى زيادة معدل انصهار السلك والتأثير على شكل خط اللحام وجودة الملحومة.



شكل 1-10 المسافة بين طرف القطب ونهاية السلك (Electrical Stick-Out)

6-1 اللحام تحت الماء Underwater Welding

تم استخدام اللحام تحت الماء من قبل البحرية البريطانية منذ أكثر من مئة عام، لغرض تصليح التسرب أو الأعطاب التي تحدث في غاطس السفن أو أنابيب النفط والحفارات، فضلاً عن عمليات القطع تحت الماء، ومن التحديات التي واجهت تقنية اللحام تحت الماء هي مسألة تطوير الأقطاب المناسبة للعمل في ظروف البيئة المحيطة، إذ أن الماء وخصوصاً ماء البحر موصل جيد للتيار الكهربائي. ويُعد الماء وسط إخماد (تبريد سريع) للملحومات، إذ يتم بذلك إصلاد منطقة اللحام وبصفة خاصة للملحومات الفولاذية.

إن تأثير ضغط الماء العالي على غطاء القوس الكهربائي يحدد استعمال هذه الطريقة في أعماق معينة، أما تكوّن القوس الكهربائي فيجري كما هو الحال في الهواء عن طريق التوصيل القصير، وخلال مقاومة التوصيل ترتفع درجة حرارة الماء وفي منطقة التلامس يتكون البخار وخلال الفقاعات الغازية الناتجة يتكوّن القوس، وتلعب ملوحة الماء (Water Salinity) دوراً هاماً في عملية اللحام تحت الماء، فبسبب ملوحة الماء العالية ينخفض فرق جهد القوس الكهربائي ونتيجة لذلك تنخفض الطاقة اللازمة للحام، ويعود ذلك على الأغلب إلى أن الأملاح تزيد التوصيل الكهربائي للماء. ووجد أن زيادة ملوحة الماء تزيد من ثبات القوس أي عدم تبعثره أو تناثره ويعلل ذلك بأن زيادة جزيئات الأملاح مثل كلوريد الصوديوم (NaCl) تتحول إلى أيونات مثل (Na^+, Cl^-) نتيجة سريان التيار الكهربائي وتتحرك هذه الأيونات تحت تأثير المجال الكهربائي، إذ تتحرك الأيونات الموجبة باتجاه القطب السالب والأيونات السالبة باتجاه القطب الموجب. كما إن للأملاح تأثيراً مباشراً على رفع درجة حرارة المنطقة بسبب التحليل الكهربائي للماء مما يساعد على تهيئة جو أفضل للحام. وكذلك فإن زيادة ملوحة الماء تؤدي إلى ارتفاع التوصيل الحراري وازدياد كثافة التيار والتوصيل الكهربائي للوسط المحيط بالقوس.

ولغرض المحافظة على الغلاف الخارجي للألكترود الموضوع تحت الماء من التفكك يطلى بمادة عازلة كالبارافين، سمكها يتراوح من (0.1–0.2) ملم. يحدد عمق النقطة التي تجري فيها عملية اللحام بشدة التيار الكهربائي، ولا يستعمل في هذه الطريقة إلا التيار المستمر للعمل بفرق جهد منخفض لا يزيد عن 42 فولت. لأنه وباستعمال التيار المتناوب يُضطر للعمل بفرق جهدٍ عالٍ وبالتالي سيكون فرق الجهد العالي هذا خطراً على عامل اللحام تحت الماء، والشكل (1-11) يمثل عملية اللحام تحت الماء.

شكل1-11 اللحام تحت الماء

1-6-1 طرائق اللحام تحت الماء Underwater Welding Methods

1-1-6-1 اللحام الرطب Wet Welding

يتم إنجاز اللحام على تماس مباشر مع الماء، إذ يتم استخدام إلكترود خاص مغلف لحمايته من الماء، وكذلك عزل الوصلات كافة لضمان عدم وصول الماء إلى الأجزاء المعدنية، وفي حال انهيار العازلية أو تسربها فإن ماء البحر سيصبح على تماس مع الوصلات وجزءً من التيار سيتسرب خارجاً وبالتالي عدم تكوّن القوس الكهربائي، فضلاً عن تلف سريع للقابلو (كيبل) النحاسي في نقطة التسرب. ويتم إنجاز العمل بطريقة يدوية وباستعمال مُعدات مشابهة للمُعدات المستعملة في اللحام اليدوي (MMAW). ويستعمل عادةً هذا النوع من اللحام في لحام الفولاذ واطئ الكربون.

مميزات اللحام الرطب

1. السرعة والفعالية في العمل.
2. انخفاض التكلفة مقارنة بأنواع اللحام الأخرى.
3. يمكن إجراء عملية اللحام لمناطق يصعب لحامها بطرائق أخرى كأن تكون ضيقة ومحصورة.
4. لا توجد حاجة للتطويق (الحجز) ولا وقت ضائع لبناء التطويق.
5. توفر الآلات وسهولة استخدامها وسهولة الوصول لأي منطقة يراد لحامها.

محددات اللحام الرطب

1. الانكماش السريع لمعدن اللحام بسبب التبريد السريع الناتج عن الماء المحيط.
2. الصلادة العالية للملحومات الفولاذية بسبب التبريد السريع نتيجة التماس المباشر بالماء.
3. زيادة لزوجة منصهر اللحام في منطقة اللحام وبالتالي زيادة المسامية.
4. الشروخ الناتجة يمكن أن تنمو بسرعة وتحدث فشل وانهيار للملحومة.

2-1-6-1 اللحام الجاف Dry Welding

يتم تنفيذ هذه العملية باستعمال حاجز خاص يتم بناؤه حول الموقع المراد لحامه ويتم تزويد المنطقة المحجوزة بخليط من الغازات بضغط أكبر بقليل من ضغط البيئة المحيطة. المنطقة المحجوزة وفي الغالب تكون مفتوحة من الأسفل وبفعل توازن ضغط الغاز مع المحيط سيتم إخراج المياه من المنطقة.

ميزات اللحام الجاف

- جودة اللحام عالية.
- توافر عامل الأمان.
- إمكانية تطبيق اختبار الجودة.

محددات اللحام الجاف

- بُنية اللحام تتطلب كميات ضخمة من المُعدات المعقدة.
- كلفة بيئة اللحام كبيرة جداً وتزداد مع العمق، كما ويتأثر القوس بشكل كبير بضغط الحجرة.
- صعوبة استعمال هذه الطريقة على عمق كبير.

أسئلة الفصل الأول

س1) عرّف القوس الكهربائي، وكيف تحدث عملية اللحام بالقوس الكهربائي؟

س2) عدد أهم المتطلبات التكنولوجية للحام القوس الكهربائي.

س3) ما هي وظيفة الحجاب الغازي في لحام القوس الكهربائي؟

س4) عرّف مساعد الصهر، وماهي أهم وظائفه وطرائق إضافته؟

س5) ما هي أنواع تقنيات اللحام بالأقطاب المجوفة؟ اشرحها باختصار.

س6) عدد فوائد لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة.

س7) وضّح العوامل المُعتمدة في عملية لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المجوفة مع مساعد الصهر.

س8) اشرح أهمية اعتماد تقنية السحب في عملية اللحام بالأقطاب المجوفة.

س9) قارن بين طرائق اللحام تحت الماء.

س10) ماذا تمثل الحروف والأرقام في رمز القطب (E7016-H4R)؟

س11) املأ الفراغات الآتية بما يلائمها:

1. بهدف إجراء التطبيق الصحيح لعملية اللحام بالأقطاب المجوفة ينبغي اعتماد تقنية ..... لاتجاه شوط اللحام وبزاوية ميل للقطب .....
2. يستعمل كل من التيار..... و..... في طرائق اللحام بالقوس الكهربائي وتكون مكائن اللحام بالتيار..... أقل كلفة، ولكنها تستعمل لغرض لحام المعادن الحديدية فقط، أما مكائن لحام ..... فتستعمل لأنواع المعادن كافة.
3. يمكن تقسيم الأقطاب المستعملة في طريقة اللحام بالقوس الكهربائي إلى ..... و..... ويُعد ..... المصدر الأساس لمعدن الإضافة (Filler) المطلوب في لحام القوس الكهربائي.
4. تربط مكائن القوس الكهربائي التي تعمل بالتيار المستمر بطريقتين ..... و.....
5. حينما يتم ربط قطب ماكينة اللحام (الألكترود) بالقطب السالب ووصلة اللحام بالقطب الموجب فعندها تتجه الإلكترونات من القطب السالب إلى الموجب تسمى هذه القطبية .....، وحينما يتم ربط القطب (الإلكترود) أي ماكينة اللحام بالقطب الموجب وقطعة العمل بالقطب السالب تسمى.....

س12) في إحدى عمليات اللحام بالقوس الكهربائي كان مقدار التيار (225 A) وفرق الجهد (30 V) وكان معامل انتقال الحرارة (0.9) ومعامل الصهر(0.75) ووحدة الطاقة النوعية ($10\ J/mm^3$)، جد الآتي: 1. مقدار القدرة المجهزة 2. القدرة الفعالة 3. معدل حجم انصهار المعدن.

(ج1 6750 W) (ج2 4556.2 W) (ج3 455.6 mm^3/s)

الفصل الثاني

لحام القوس الكهربائي بالغازات المحجبة

Arc Welding with shielded Gases

الأهداف

الهدف العام

سيتمكن الطالب من معرفة فوائد طرائق اللحام بالغازات المحجبة وتميزها عن طرائق اللحام الأخرى وأهمية كل طريقة في العمليات الإنتاجية وسيتمكن الطالب من معرفة الأجهزة والمعدات وتشغيلها وكذلك القدرة على الاستخدام الأمثل لكل طريقة.

الأهداف الخاصة: بعد الانتهاء من دراسة الفصل الثاني يتمكن الطالب من فهم الآتي:

1. أنواع اللحام بالقوس الكهربائي بالحجاب الغازي.
2. لحام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المحجوب بالغاز الخامل GMAW.
3. طريقة اللحام MIG
4. طريقة اللحام MAG
5. الغازات الخاملة والفعالة (النشطة).
6. عناصر لحام طريقة MIG/MAG
7. مميزات ومحددات طريقة MIG/MAG
8. تصنيف أسلاك لحام MIG/MAG واستعمالاتها.
9. طرائق انتقال معدن اللحام
10. اللحام بالقوس الكهربائي TIG
11. مميزات ومحددات طريقة TIG
12. أقطاب لحام طريقة TIG

لحام القوس الكهربائي بالغازات المُحجبة (الواقية)

Arc Welding With Shielding Gases

2-1 مقدمة Introduction

إن عملية اللحام بالقوس الكهربائي المُحجب بالغاز ما هي إلا طريقة مبتكرة ومكملة لطرائق وتقنيات اللحام، وجاءت بعد أن تم دراسة اللحام بالقوس الكهربائي العادي بالطرائق التقليدية القديمة. الغازات المستعملة كحجاب غازي في اللحام بالقوس الكهربائي تتضمن نوعين من الغازات: النوع الأول عبارة عن غازات خاملة Inert Gases كالآركون والهيليوم، والنوع الثاني غازات غير خاملة مثل غاز ثاني أوكسيد الكربون. الاختيار لنوع الغاز أو خليط الغازات يعتمد بالدرجة الأساس على نوع المعدن المراد لحامه.

أنواع اللحام بالقوس الكهربائي بالحجاب الغازي:

1. **لحام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المحجوب بالغاز الخامل**
Gas Metal Arc Welding (GMAW)
2. **لحام القوس الكهربائي بأقطاب التنكستن** **Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)**

2-2 لحام القوس الكهربائي بالأقطاب العارية المحجوب بالغاز الخامل

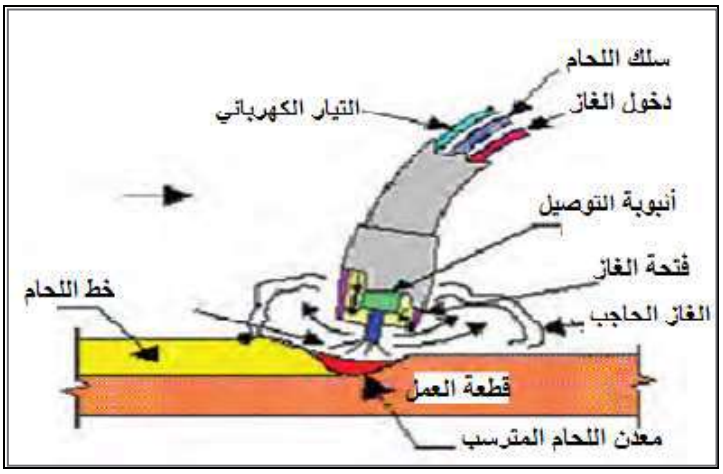
Gas Metal Arc Welding (GMAW)

إن عملية اللحام في الأساس هي من أجل الحصول على خط لحام له نفس المواصفات المكونة لمعدن القطعة التي يتم لحامها، ومن غير الممكن الحصول على ذلك إلا إذا تم عزل القوس الكهربائي وفوهة القوس المصهور عزلاً تاماً عن الهواء أثناء عملية اللحام، لأن أي تلامس من الهواء للمعدن المنصهر سيتسبب في إضعاف خط اللحام الناتج، لهذا فإن اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي يتم بعزل القوس الكهربائي عن الهواء الخارجي باستعمال أنواع خاصة من المساحيق على أسلاك اللحام. وهذه المساحيق تنصهر بفعل القوس الكهربائي وينتج عنها غازات تحيط بالقوس وتعزلهُ عن الهواء. ولهذه الطريقة مزايا كثيرة في تطوير علم اللحام، كما أن فيها بعض السلبيات مثل عدم التمكن من استعمال الطريقة ما عدا في اللحام اليدوي، وتعتمد جودة اللحام على حركة اليد وزاوية ميل السلك، مما يجعل الهواء يدخل ويتسرب إلى منطقة اللحام، إضافة إلى أن المساحيق يمكن أن تدخل في خط اللحام فتسبب فراغات وضعف. وهناك عدة أسباب أُخرى يتضح منها أن طريقة اللحام اليدوي بالقوس الكهربائي مع استخدام أسلاك لحام مغطاة بطبقة من المساحيق لا يمكن ضمانها بإنتاج خطوط لحام متواصلة وجيدة ومنتظمة، لأن أطوال هذه الأسلاك محدودة. وفي هذه الحالة لابد من إيجاد طرائق لتطوير اللحام أهمها أيجاد طريقة تضمن عزل القوس عن الهواء وقد تم ذلك باستعمال الغازات الخاملة. والشكل (2-1) يبيّن ماكينة (MIG/MAG).

إن الفرق بين الطريقتين المذكورتين هو في نوع الغاز المستعمل، فطريقة Metal Inert Gas (MIG) تستعمل غاز خامل مثل الآركون أو الهليوم، والطريقة الثانية Metal Active Gas (MAG) تستعمل فيها غازات فعالة (غير خاملة) مثل غاز ثاني أوكسيد الكربون (CO_2). الغازات المحجبة من النوع الخامل تستعمل للحام الألمُنيوم وسبائكه والفولاذ المقاوم للتآكل (Stainless Steel)، أما الغازات المحجبة من النوع الفعال فتستعمل في لحام الفولاذ واطئ ومتوسط الكربون.

شكل 2-1 ماكينة اللحام بطريقة (MIG/MAG)

تعرّف **الغازات الخاملة** بأنها لا تتفاعل كيميائياً مع غيرها من المواد وهي عناصر موجودة في الطبيعة وعددها خمسة وهي: الهيليوم، الآركون، النيون، الزينون، والرادون. ولكن الأكثر استخداماً منها في عملية اللحام وعزل القوس الكهربائي الآركون والهيليوم فقط، وذلك لإمكانية الحصول على هذه الغازات بطرائق اقتصادية. ويتم استخدام هذه الغازات الخاملة لعزل القوس بتسليط تيار منها على منطقة القوس، وبوساطة تقنية خاصة من الأنابيب تدخل في مقبض اللحام نفسه أو تكون متصلة به، كما في الشكل (2-2). إن غاز ثاني أوكسيد الكربون هو غاز فعال ولكن فعاليته محدودة مع الفولاذ.



شكل 2-2 تقنية استخدام الغازات الخاملة

وبعد أن تم حل مشكلة عزل القوس باستعمال الغازات الخاملة، أصبح بالإمكان تطوير أسلاك اللحام لأنه أصبح من الممكن استعمال أسلاك لحام بدون طبقة مسحوق عليها، وهكذا أصبحت أسلاك اللحام تصنع بأطوال كبيرة تلف على بكرات بأحجام مختلفة تكفي لعمليات لحام متواصلة لساعات عديدة، ويتم تغذية الأسلاك إلى مقبض اللحام بوساطة جهاز خاص يدار بوساطة محرك كهربائي يعمل على تغيير سرعة القوس أثناء اللحام.

2-2-1 مميزات لحام (MIG/MAG)

إن هذا النوع من اللحام يمتاز بالآتي:

1. تخفيض كلفة العمل ويتم ذلك من خلال تقليل الوقت اللازم لتنظيف القطع المعدنية الملحومة بسبب عدم الحاجة لاستعمال مساعد الصهر، وبالتالي عدم تكون الخبث بالإضافة إلى ذلك قلة تناثر المعدن وسهولة إزالته.
2. انخفاض الوقت اللازم لعملية التدريب حيث يلاحظ سُهولة إجراء عملية اللحام، وهذا يؤدي إلى تقليل وقت التدريب، بالإضافة إلى ذلك فإن الأشخاص الذين لديهم خبرة في عمليات اللحام الأخرى يمتازون بسرعة السيطرة على أسلوب اللحام بالقوس المحجب بالغاز.
3. سرعة الإداء تُعد عملية اللحام هذه سريعة مقارنة بعملية اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي، وخصوصاً عند الحاجة للحام بعدة تمريرات وذلك للاستغناء عن الوقت المهدور في تنظيف خط اللحام من الخبث المتكون بسبب مساعد الصهر.
4. جودة اللحام حيث إن السرعة العالية نسبياً في عملية اللحام تؤدي إلى الحصول على خصائص معدنية جيدة في منطقة اللحام.
5. يمكن استعمال هذا النوع من اللحام في لحام الصفائح الرقيقة بسبب انخفاض قيمة شدة التيار المستعمل وبدرجة اقتصادية مقارنة باللحام بالقوس الكهربائي.
6. يمكن استعمال وصلات متعددة المقاطع، يمكن بوساطة هذه الطريقة الحصول على تغلغل أعمق لقوس اللحام بسبب الزيادة في بروز السلك. وهذا يؤدي إلى إمكانية الحصول على تصاميم أفضل للوصلات المستعملة في اللحام.

2-2-2 عناصر عملية لحام (MIG/MAG)

تتكون العناصر الرئيسة لعملية اللحام من الآتي- وكما هي موضّحة في الشكل (2-3):

1. مصدر الطاقة وماكينة اللحام.
2. وحدة التغذية والتحكم بسلك اللحام.
3. مجموعة الخراطيم ومقبض اللحام.
4. نظام الحجب بالغاز.
5. مجموعة بكرة السلك.

شكل 2-3 ماكنة لحام MIG مع ملحقاتها

أولاً: ماكينة اللحام: إن ماكينة اللحام بطريقة (MIG/MAG) تستعمل مصدراً ذا قطبية مستمرة وبفولتية ثابتة (Constant Volt) وهذا المصدر يمكن أن يكون مولد تيار مباشر يتم تشغيلهُ بوساطة محرك. وتختلف ماكينات اللحام بالقطبية المباشرة بشكل طفيف من حيث الفولتية، ويتم التحكم بتيار اللحام بوساطة جهاز التحكم بسرعة التغذية بالسلك.

ثانياً: وحدة التغذية والتحكم بسلك اللحام: في هذه الوحدة يتم التحكم بإدارة السلك وتغذيتهُ ميكانيكياً بوساطة محرك خاص لسحب السلك ويتم التحكم بسرعة السلك والمحرك بوساطة وحدة التحكم الخاصة بذلك ووحدة سحب السلك، وتتكون وحدة التغذية من الأجزاء الآتية:

1. محرك كهربائي
2. صندوق التروس
3. منظومة الضغط
4. مثبت منظومة الضغط.
5. مسار خروج السلك
6. مسار السلك إلى المقبض.
7. سلك اللحام
8. منظومه التحكم.

ثالثاً: مجموعة الخراطيم ومقبض اللحام: ويستعمل مقبض اللحام لتشغيل سلك اللحام والغاز والتيار الكهربائي. عند بدء التشغيل يتم توليد القوس الكهربائي وخروج الغاز الحاجب عبر الخراطيم الخاصة بالغاز، وتتوافر مقابض اللحام بأشكال مختلفة ومنها:

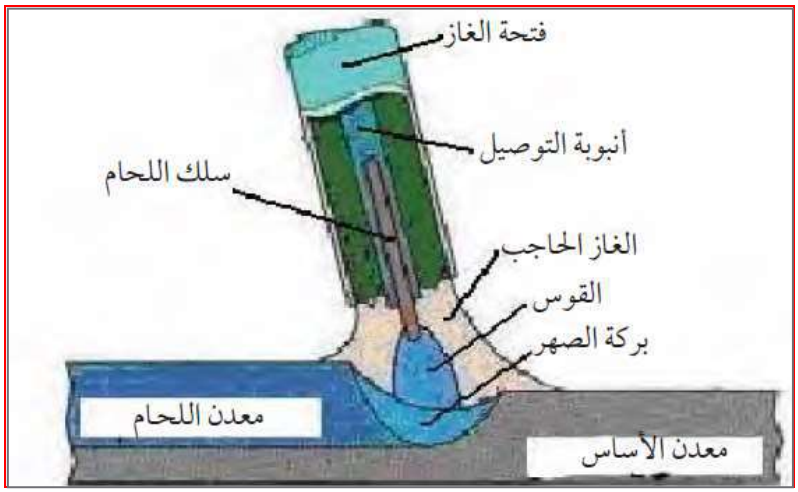
- المقابض ذات التبريد بالهواء.
- المقابض ذات التبريد بالماء.

رابعاً: نظام الحجب (الوقاية) بالغاز: في نظام الحجب بالغاز الخامل كالآركون أو الغاز الفعال ثاني أوكسيد الكربون يحصل تدفق للغاز من الإسطوانة إلى المبخر (المسخن) ومن ثم يمر إلى المنظم للغاز ومن ثم إلى الخرطوم المغذي للمقبض عن طريق مروره عبر ناشرة (Gas Diffuser) داخل الماكينة، يتم التحكم فيه بوساطة الضغط على مقبض اللحام الذي يتحكم بفتح وإغلاق الغاز إلى المقبض.

خامساً: مجموعة بكرة السلك: يتم تركيب بكرة السلك على عمود الدوران الحامل للبكرة لتزويد وحدة التحكم والتغذية بالسلك اللازم، وعند انتهاء بكرة السلك يقوم فني اللحام بتغيير بكرة السلك بأخرى جديدة وتركيبها في مكانها.

3-2-2 نظام غاز الحجب واستعمالاته

إن الهدف من استعمال غاز الحجب (الوقاية) في عملية اللحام هو عزل الهواء عن منطقة اللحام بوساطة غازات الحجب المختلفة من دون التأثير على المعدن المنصهر وهذا التأثير يحدث نتيجة لوجود غازي النيتروجين والأوكسجين بالإضافة إلى بخار الماء في الهواء الجوي المحيط بالقوس الكهربائي، ويتم عزل القوس بوساطة غازات الحجب وإن دخول النيتروجين إلى منطقة اللحام يتسبب في تقليل متانة المعدن المتجمد بعد اللحام، كما ويقلل من قوة اللحام وهذا يسبب التشققات، وعند زيادة كمية النيتروجين عن الحد اللازم فإنها تؤدي إلى الشوائب بالإضافة إلى تشكيل مسامات كثيرة. والأوكسجين بدوره يتحد مع الكربون الموجود بالفولاذ مكوناً مركب أول أوكسيد الكاربون CO. وهذا بدوره يؤدي إلى عيوب وشوائب كثيرة لمعدن اللحام، بالإضافة إلى زيادة كمية الأوكسجين التي تتحد مع العناصر الأخرى الموجودة بالمعدن مكونة مركبات تسبب المسامية في معدن اللحام. وكذلك حينما يتواجد الهيدروجين حول معدن اللحام فإنه يمتص، ونتيجة لذلك ستظهر الكثير من المسامات والتشققات في بركة اللحام. والشكل (2-4) يوضّح نظام الحجب بعملية لحام (MIG/MAG).



شكل 2-4 نظام الحجب بعملية لحام (MIG/MAG)

الغازات الرئيسة المُحجبة (الواقية) لعمليات اللحام بالقوس المعدني (MIG/ MAG) هي:

- غاز الآركون - غاز خامل.
- غاز الهيليوم - غاز خامل.
- غاز ثنائي أُوكسيد الكربون – غاز شبه خامل عند درجات الحرارة الاعتيادية مع الفولاذ فقط.

ملاحظة

يعرّف الغاز الخامل بانه الغاز الذي لا يتفاعل مع غيره كيميائياً حتى في درجات الحرارة العالية.

الغرض من استعمال الغازات في لحام (MIG/MAG)

عند استعمال الغازات الخاملة لغرض حجب القوس الكهربائي عن الهواء الجوي المحيط لتركيز اللحام فإنها لا تتفاعل مع المعدن المنصهر ولا تذوب فيه مثل غازات الآركون، الهيليوم (MIG). أما غاز ثاني أوكسيد الكربون فإنه يتحلل في حالة ارتفاع درجات الحرارة إلى غاز أول أوكسيد الكربون والأوكسجين وبالتالي سيعمل على حماية منصهر اللحام من الأكسدة لكون غاز أول أوكسيد الكربون هو عامل مؤكسد فعال وعليه ستكون الملحومات ذات جودة عالية.

4-2-2 خواص وميزات الغازات المحجبة

1. خاصية زيادة الحرارة.
2. التفاعل الكيميائي للغازات مع بعض العناصر الموجودة بالسلك أو قطعة العمل.
3. تأثير كل غاز على طريقة انتقال المعدن أثناء عملية اللحام.
4. التوصيل الحراري للغاز يزيد من الطاقة الحرارية المتولدة للحام، وكذلك يزيد من فولتية القوس وهي ضرورية لاستمرار القوس. ويُعد التوصيل الحراري لكل من غاز الهيليوم وغاز ثاني أوكسيد الكربون أكبر بكثير من التوصيل الحراري لغاز الآركون لهذا فإن الحرارة الناتجة عنها أكبر وتحتاج إلى فولتية أعلى وطاقة أكثر للحفاظ على ثبات القوس.

الغازات المستخدمة في لحام (MIG /MAG)

أولاً: غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2: يُعد غاز ثاني أوكسيد الكربون من الغازات الرخيصة الثمن مقارنة مع غاز الآركون، وهو غاز أثقل من الهواء بمرة ونصف، ويُعد غازاً فعالاً في حجب القوس ولا يسبب أي عيوب مقارنةً بغاز الآركون مثل التنقر وخصوصاً إذا استخدم للحام الفولاذ. ولكن يجب الحذر عند استعمال هذا النوع من الغازات في مكان ضيق ولذا يفضل التهوية في منطقة العمل لمنع استنشاق هذا الغاز، لأنه يتحلل أثناء اللحام من غاز ثاني أوكسيد الكربون إلى أول أوكسيد الكربون CO والذي هو غاز سام.

ثانياً: غاز الآركون Ar: خصائص غاز الآركون التي لها علاقة بعملية اللحام هي: 1. هو غاز أثقل من الهواء بحدود 23% وعشر مرات من غاز الهليوم وهذه ميزة تعطي الغاز وضعاً مثالياً في عملية العزل لبركة اللحام، 2. ليس له لون وكذلك سهولة الرؤيا عبر الغاز (لا وجود للضبابية) خلال عملية اللحام، 3. ليس له رائحة، 4. اشتعال القوس بغاز الآركون أسهل منه لغاز الهليوم، ويستعمل خليط غازي الآركون والهليوم عادةً في لحام المعادن التي تحتاج إلى تسخين عالٍ. يستعمل غاز الآركون النقي في عملية عزل القوس، ويستعمل عادةً في لحام المعادن غير الحديدية مثل الألمنيوم والمغنيز والنحاس والنيكل وسبائكه ولا يستعمل في لحام الفولاذ لأنهُ يسبب تنقر على جوانب اللحام ولكن يستعمل في لحام الفولاذ السبائكي والفولاذ المقاوم للتآكل. ويمتاز القوس الناتج عن عملية اللحام بأنه مستقر، ويمكن مزج غاز الآركون مع الغازات الأخرى وكما يأتي:

1- آركون 75% مع 25% ثاني أوكسيد الكربون، أو آركون 80% مع 20% ثاني أوكسيد الكربون. ويستعمل بكثرة هذا المزيج في لحام الفولاذ الكربوني للأسماك الرقيقة حيث لا حاجة للحام العميق ولأوضاع اللحام كافة، وسبائك الفولاذ المنخفضة السبك. وأهم ميزات هذا المزيج هو تقليل معدلات التشوه في القطع الملحومة، ويعطي متانة جيدة لخط اللحام وثبات في القوس الكهربائي ومظهر جيد.

2- آركون مع هيليوم، أن زيادة نسبة الهيليوم من 50% إلى 75% ترفع من فرق جهد القوس وبالتالي زيادة حرارة القوس الكهربائي، ويستعمل هذا المزيج في لحام المعادن غير الحديدية وخصوصاً المقاطع السميكة للألمُنيوم ، مغنسيوم، والنحاس. وكذلك يستعمل في لحام الوضع فوق الرأس (العلوي). نسبة الخلط للمزيج 25% آركون مع 75% هيليوم يستعمل للحام بطريقة (TIG). ومن ميزات استعمال هذا المزيج زيادة مقاومة المعدن للتآكل وصغر المنطقة المتأثرة بالحرارة ويقلل من حدوث العيوب، مما يؤدي إلى تقليل مقدار التشوه في القطع الملحومة.

3- آركون 70% مع ثاني أوكسيد الكربون 28% ومع الأوكسجين 2%، ويستعمل هذا المزيج بكثرة في لحام الفولاذ المنخفض السبائكية ومن ميزاته أن له إشعاعاً محدوداً للقوس ويعطي متانة عالية لمنطقة اللحام مع استقرارية في القوس وقليل من الرذاذ على خط اللحام.

4- آركون مع نسبة قليلة من الأوكسجين 1% إلى 5%، الزيادة في نسبة الأوكسجين ستؤدي إلى المسامية في اللحام. ويمتاز هذا المزيج بإعطاء ملحومات ذات أسطح ناعمة ويقلل من تطاير الشظايا (الترشش) عند اللحام. وبإضافة القليل من الهليوم لهذا المزيج سيزيد من فرق جهد القوس الكهربائي.

5-2-2 أسلاك لحام (MIG/MAG) واستخداماتها

هناك عوامل مهمة يجب أن تؤخذ بنظر الاعتبار عند اللحام بطريقة الغازات المحجبة وكيفية الاختيار الأمثل لسلك اللحام فضلاً عن نوع الغاز المحجب المستعمل. ومن العوامل الرئيسة التي يتم على أساسها اختيار سلك اللحام هي:

1. التركيب الكيميائي للمعدن الأساس المراد لحامه وخواصه الميكانيكية وهي من الأهمية القصوى.
2. سمك قطعة العمل وتصميم مفصل اللحام، إذ تحتاج القطع السميكة والمفاصل المعقدة إلى أسلاك لحام من النوع الذي يكوّن معدن اللحام بمطيلية عالية.
3. حالات السطح، يتوجب اختيار نوع سلك اللحام المناسب لسطح المعدن الأساس من حيث تكوّن الصدأ أو القشور.
4. شروط الخدمة أو خواصها.

هنالك تصنيف دولي لأسلاك لحام (MIG/MAG) ورموز خاصة لأسلاك لحام الفولاذ الكربوني مثل:

E70S-2 , E70S-3 , E70S-4 , E70S-7 , E70S-5 , E70S-6

وتعرف الأحرف E : تعني إلكترود، وفي حالة كون سلك لحام يستخدم كمعدن حشو يكتب R.

S : إن السلك صلد Solid غير مجوف.

الرقم 70: يعني قوة الشد لمعدن خط اللحام المترسب من سلك اللحام مضروباً في 1000 وبوحدات (psi) وهذا سلك اللحام من النوع الفولاذ الكربوني، ولأسلاك اللحام للفولاذ الواطئ السبك سيكون الرقم 80 أو أكثر.

الرقم الأخير: يدل على التركيب الكيميائي لسلك اللحام أو نوع الغاز المحجب، أما فيما يخص أسلاك المعادن الأخرى فيعتمد ترميزها على تركيب سبيكة المعدن التي تستعمل هذه الأسلاك للحامها.

أنواع أسلاك اللحام للمعادن الحديدية

لابد من تحديد أسلاك اللحام بالقوس الكهربائي للمعادن الحديدية، إذ أن هناك تشابه أساس تشترك فيه الأسلاك في التركيب السبائكي المضاف إلى الحديد. فمثلاً عند لحام الفولاذ الكربوني بالقوس الكهربائي فأن الغرض الأساس في إضافة السبائك هو التحكم والسيطرة على الأكسدة التي تحدث في بركة اللحام للمساعدة في الحصول على الخواص الميكانيكية المناسبة. وينتج منه خبث أو تكون غطاء، لذلك فإن إزالة الأوكسجين من بركة اللحام يقلل من تكوين المسامية التي تحدث أثناء اللحام.

1. السليكون Si إن عنصر السيليكون هو الأكثر شيوعاً لإزالة الأوكسجين المستعمل للحام القوس الكهربائي وإن الأسلاك التي تحتوي على 0.40 % إلى 1.15% من السليكون تعتمد نوعيتها على هذه النسبة، فالسليكون يعمل على إزالة الأوكسجين بشكل جيد، كما أن زيادة كمية أو نسبة السليكون ستزيد من قوة اللحام الناتج وزيادة المتانة، ولكن إذا ازدادت هذه النسبة على 1.2% فربما يتعرض لحدوث تشققات.

2. المنغنيز Mn إن عنصر المنغنيز شائع الاستعمال لإزالة الأكسدة وزيادة القوة والمتانة، ويحتوي سلك لحام الفولاذ الطري على عنصر المنغنيز بنسبة (0.9-2%) وزيادة نسبة المنغنيز تزيد من قوة معدن اللحام بشكل يفوق السيليكون لأن المنغنيز يقلل من قابلية المعدن للتشقق وبخاصة في معدن اللحام.

3. الكربون C إن عنصر الكربون يؤثر على البنية الأساس والخواص الميكانيكية للمعدن أكثر من جميع العناصر الأخرى، ولغرض لحام الفولاذ بالقوس الكهربائي فإن نسب الكربون في أسلاك اللحام تتراوح ما بين 0.06-0.15% وهذا المستوى كاف لزيادة القوة المطلوبة لمعدن اللحام بدون التأثير على قابلية السحب والصلابة أو تكوين المسامية وزيادة الكربون في كل من المعدن أو السلك تزيد من المسامات خاصة عند استعمال غاز ثاني أوكسيد الكربون.

4. معادن أخرى مثل Cr, Ni, Al الكروم، النيكل، الألمُنيوم وبعض المواد الأخرى تضاف عادةً لتحسين الخواص الميكانيكية أو لإضافة ميزات مقاومة الصدأ وإضافة كميات قليلة منها لأسلاك الفولاذ الكربوني تؤدي إلى زيادة القوة والصلابة.

أسلاك اللحام للمعادن الحديدية واستعمالاتها

1. **سلك لحام رقم E70S-2** هذا النوع من الأسلاك مقاوم للأكسدة بشكل كبير ومصمم لإنتاج ملحومات بخواص جيدة لجميع أنواع الفولاذ الكربوني، أن نسبة الكربون لهـــذا السلك هي 0.6% ونســبة المنغنيز (0.9 – 1.4) ونسبة السليكون (0.4 – 0.7) ونسب قليلة من معدن التيتانيوم والألمنيوم والزركونيوم، ولإضافة المواد المقاومة للتأكسد مثل الألْمنيوم، الزركونيوم، التيتانيوم، إضافة إلى السيليكون فإنها تنفع أكثر للحام الفولاذ الكربوني. ويستعمل ثاني أوكسيد الكربون في كوه غازاً محجباً أو في بعض الأحيان يستعمل مزيج غاز الآركون مع ثاني أوكسيد الكربون والأوكسجين. وعامةً ستعطي بركة لحام لزجة جداً مما يجعله صالحاً لزيادة سيولة بركة اللحام.

2. **سلك اللحام رقم E70S-3** السلك الذي يحمل هذه المواصفات هو أحد الأسلاك المستعملة على نطاق واسع لعمليات اللحام المختلفة، نسبة الكربون في هذا السلك هي بحدود 0.06-0.015%، بالإضافة إلى نسبة من المنغنيز 0.9-1.4% والسليكون 0.45-0.7%. وهذا السلك يستعمل مع غاز ثاني أوكسيد الكربون، أو مزيج من الآركون والأوكسجين أو الآركون وثاني أوكسيد الكربون. ويجب أن يكون مستوى التيار عند الحد الأدنى لأنهُ إذا أزداد التيار يقلل من خواص الملحومة.

3. **سلك لحام رقم E70S-6** هـــذا السلك يحتوي علـــى نسبة كربون 0.07-0.15% والمنغنيز 1.4-1.85% والسليكون 0.8-1.15%، يعمل بشكل جيد مع غاز ثاني أوكسيد الكاربون النقي، وغاز الآركون، وخليط الأوكسجين والآركون وثاني أوكسيد الكربون.

أنواع أسلاك لحام الفولاذ المقاوم للتآكل

إن الاختيار المناسب لأسلاك لحام الفولاذ المقاوم للتآكل يتطلب مراعاة عدة عوامل مثل:

1. غاز الحجب المستعمل يحدد بخليط من غاز الآركون والأوكسجين بنسبة (1-2%) للحصول على القوس الكهربائي بطريقة الرش، ويمكن استعمال جميع الأسلاك مع الغازين المذكورين.

2. يجب أن يكون سلك اللحام المختار لجميع أنواع القطع ملائماً للتركيب الكيميائي للمعدن الأساس.

1. سلك اللحام رقم ER308

يستعمل هذا السلك عادةً في لحام الفولاذ المقاوم للتآكل رقم AISI 304 أو أي سبيكة فولاذ مقاوم للتآكل تحتوي على كربون بنسبة 0.08% وكروم 19.5% ونيكل 10.5% بالإضافة إلى المنغنيز 2.5% والسليكون 0.9%.

2. سلك اللحام رقم ER308L

يستعمل هذا السلك للحام للفولاذ المقاوم للتآكل، الذي يحتوي على كلٍ من الكروم والنيكل بنسب مشابهة للسلك السابق رقم ER308 ولكن كمية الكاربون قليلة (أقل من 0.03%)، وهذا يقلل من احتمالية تكوين الكاربيد.

ويمكن للطالب الرجوع إلى المصادر العلمية للاطلاع على بقية أنواع أسلاك اللحام وتصنيفاتها واستعمالاتها بشكل موسع، وقد ذكرت الأسلاك أعلاه كأمثلة عن ترقيمها واستعمالاتها.

أنواع أسلاك لحام المعادن غير الحديدية

الألُمنيوم وسبائكه: العناصر الرئيسة المستعملة لإنتاج أسلاك لحام الألُمنيوم وهي المغنيسيوم، المنغنيز، الخارصين، السيليكون، النحاس، وبنسب أقل لبعض الأسلاك يضاف الحديد، الكروم والتيتانيوم. والهدف الأساس من إضافة هذه العناصر هو زيادة قوة سبيكة الألُمنيوم النقي كذلك مقاومة الصدأ وقابلية اللحام، وكل سلك يحتوي على عدد من العناصر السبائكية المختلفة لتحسين خواص وميزات اللحام ومصمم خصيصاً للحام نوع معين من سبائك الألُمنيوم. والأسلاك الشائعة جداً هي التي تحتوي على نسبة عالية نوعاً ما من المغنسيوم 4.5-5.5% هو سلك ER5356 والأسلاك التي تحتوي على السيليكون بنسبة 4.5-6.0% ورقمها ER4043.

أسلاك لحام النحاس وسبائكه: معظم أسلاك لحام النحاس تحتوي على عناصر سبائكية وعلى الرغم من أن هذه العناصر تقلل من قابلية التوصيل الحراري للمعدن النقي، إلا أنها ضرورية لزيادة الصلادة، كما أنها تساعد في عملية إزالة الأكسدة من اللحام ولمطابقة المعدن الأساس كيميائياً. ومن الأمثلة على ذلك:

1. السلك (ERCu): سلك محدد للحام النحاس النقي، والنحاس غير المؤكسد بحيث يمكن الحصول على خواص ميكانيكية جيدة، هذا السلك فيه نسب ضئيلة من معادن الألُمنيوم، السليكون والرصاص، المنغنيز والقصدير.

2. السلك ECuSn-A: سلك مصمم خصيصاً للحام سبيكة النحاس التي تحتوي على عنصر السيليكون، وكذلك يمكن استعماله للحام النحاس الذي يحتوي على عنصر الخارصين. يضاف القصدير للنحاس بنسبة 4.0-6.0% لهذا السلك، ويستعمل أيضاً كأسلاك لحام المونة Brazing.

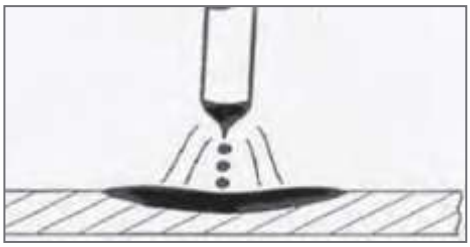
6-2-2 الطرائق المتبعة لانتقال معدن اللحام والعوامل المؤثرة في لحام (MIG/MAG)

تتأثر عملية لحام (MIG/MAG) بعوامل عديدة ولا بد من التعرف عليها لإتقان عملية اللحام. ولا بد من التعرف على طرائق انتقال معدن اللحام في لحام (MIG/MAG) إذ يتم عادةً انتقال معدن اللحام من طرف سلك اللحام إلى بركة الصهر في لحام (MIG/MAG) بطريقتين هما:

1. انتقال المعدن بطريقة الرش.
2. انتقال المعدن بالدائرة المغلقة.

أولاً: انتقال معدن اللحام بطريقة الرش

ويتم استعمال طريقة الرش للحام قطع ذات أسماك كبيرة بسبب حاجتها إلى تيارات لحام عالية وكذلك يتم انتقال جزيئات و دقائق صغيرة جداً تنفصل من سلك اللحام وتنتقل عبر القوس الكهربائي إلى بركة الصهر، وكما في الشكل (2-5).



شكل 2-5 عملية انتقال معدن اللحام بطريقة الرش

ويتم انفصال أعداد كبيرة من الجزيئات (مئات الجزيئات في الثانية الواحدة) وتترسب على شكل معدن لحام و تتحكم بعملية انتقال معدن اللحام بالرش عدة عوامل أهمها:

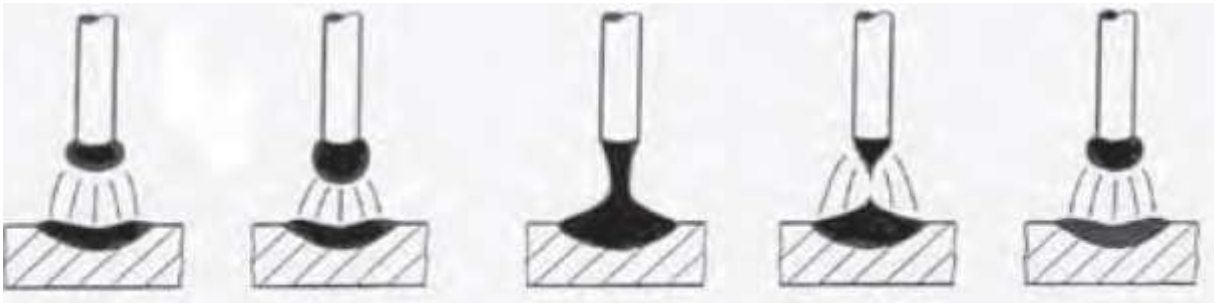
1. استعمال تيار لحام عالي مستمر بقطبية معكوسة.
2. استعمال غاز الآركون مع نسبة بسيطة من الأوكسجين كغاز حجب، وتعتمد قيمة شدة تيار اللحام المستعمل لانتقال معدن اللحام بطريقة الرش على نوع سلك اللحام وقطره ونوع السبيكة، كما هو مبيّن في الجدول (2-1).

جدول 2-1 مواصفات أسلاك اللحام لعملية لحام (MIG/MAG)

معدن سلك اللحام	قطر سلك اللحام (mm)	نوع الغاز الواقي	الحد الأدنى لشدة التيار (أمبير)
فولاذ كاربوني	0.6	98% آركون + 2% أوكسجين	150
فولاذ كاربوني	0.9	98% آركون + 2% أوكسجين	165
فولاذ كاربوني	1.2	98% آركون + 2% أوكسجين	220
فولاذ كاربوني	1.6	98% آركون + 2% أوكسجين	275
ألمنيوم	0.8	آركون	95
ألمنيوم	1.2	آركون	135
ألمنيوم	1.6	آركون	180

ثانياً: طريقة الدائرة المغلقة (القصيرة)

يعتمد اللحام بالدائرة المغلقة والحصول عليها على سلك اللحام وقطعة العمل، فالحرارة الناتجة من مرور تيار اللحام الكهربائي في سلك اللحام تجعل طرف السلك ينصهر مكوناً قطرة بشكل كرة صغيرة تقترب من قطعة العمل إلى أن تتلامس معها مولدة دائرة مغلقة فينطفئ القوس ويؤدي إلى زيادة شدة التيار الكهربائي المار في سلك اللحام و بالتالي انفصال طرف السلك وبركة الصهر وتتكرر العملية مجدداً، ويبيّن الشكل (2-6) مراحل انتقال معدن اللحام بقصر دائرة القوس.



شكل 2-6 مراحل انتقال معدن اللحام بطريقة الدائرة المغلقة

ولحدوث عملية انتقال معدن اللحام بهذه الطريقة لا بد من استعمال الآتي:

- تيار لحام منخفض مع قطبية معكوسة للتيار المستمر.
- أسلاك لحام بأقطار صغيرة.
- الغاز الواقي هو غاز ثاني أوكسيد الكربون أو مزيج من غاز الآركون وثاني أوكسيد الكربون.

والجدول (2-2) يبيّن قيم شدة التيار المستعملة مع هذه الطريقة عند استعمال أسلاك لحام الفولاذ الكربوني وبسبب انخفاض تيار اللحام المستعمل في هذه الطريقة فأنها تستعمل للحام القطع ذات السُمك القليل.

جدول 2-2 قيم شدة تيار اللحام بطريقة الدائرة المغلقة (القصيرة)

قطر سلك اللحام (mm)	شدة تيار اللحام في الوضع الأرضي (A)	شدة تيار اللحام في الأوضاع الأخرى (A)
0.8	150-50	125-50
1	180-70	150-70
1.2	250-90	180-90

العوامل التي تؤثر في لحام (MIG/MAG) هي:

أولاً: الجهد (فولتية) القوس

إن ماكينة اللحام المستعملة في لحام الميك (MIG/MAG) هي في العادة ذات جهد ثابت، لذلك يتم اختيار ومعايرة جهد القوس المناسب قبل البدء بعملية اللحام ويبقى هذا الجهد ثابتاً أثناء عملية اللحام، ومع تغير طول القوس تتغير قيمة شدة التيار في سلك اللحام فقط.

ثانياً: سرعة تغذية السلك

يتم اختيار سرعة تغذية سلك اللحام بحيث تحافظ على طول قوس معين، لذلك يكون طول القوس ثابتاً في ماكينات اللحام ذات الجهد الثابت إلى حد ما. أي كلما زادت المسافة بين طرف فوهة المقبض وقطعة العمل يزداد طول القوس، فينخفض تيار اللحام المار ويؤدي ذلك إلى تخفيض سرعة انصهار سلك اللحام، ومع استمرار تقدمه بالسرعة نفسها تقل المسافة بين طرف السلك وبركة الصهر فيعود طول القوس إلى ما كان عليه سابقاً. وعند زيادة طول القوس تزداد شدة التيار وسرعة انصهار سلك اللحام مما يزيد المسافة بين طرف سلك اللحام وقطعة العمل فيعود طول القوس إلى ما كان عليه سابقاً.

ثالثاً: معدل تدفق غاز الحجب

إن معدل تدفق غاز الحجب بشكل مناسب يعطي حماية جيدة لمعدن اللحام، والنقص في معدلات التدفق ينتج عنه عيوب اللحام، وأما الزيادة في التدفق فإنها تؤدي إلى عدم وجود خط اللحام الناتج وكذلك تؤدي إلى استهلاك الغازات بكمية أكبر وهذا يؤدي بدوره إلى زيادة الكلفة.

رابعاً: بروز سلك اللحام عن مقبض اللحام

المقصود ببروز سلك اللحام هو المسافة بين أنبوب التماس في مقبض اللحام وطرف سلك اللحام. ويتعرض هذا الامتداد من سلك اللحام إلى تسخين مسبق بسبب مرور التيار الكهربائي وحينما يزداد بروز سلك اللحام يزداد مقدار التسخين المسبق لعملية اللحام مما يؤدي إلى خفض قيمة شدة التيار اللازم لصهره، أما إذا نقص طول امتداد سلك اللحام ينخفض مقدار التسخين المسبق للسلك وتزداد قيمة شدة التيار اللازم لصهره. وفي هذه الحالة يكون تأثير طول بروز السلك في مقطع وجود خط اللحام مهم، فالامتداد القليل لسلك اللحام لغاية (6 mm) يعطي عرضاً قليلاً لخط اللحام مع تغلغلٍ عالٍ، أما إذا نقص طول البروز للسلك عن (6 mm) فذلك يؤدي إلى صعوبة رؤية القوس في أسفل فوهة المقبض ويحدث زيادة في كمية الشرر الناتج (المتطاير) وقد ينغمس طرف فوهة المقبض في بركة الصهر ويلتصق طرف سلك اللحام المنصهر بفوهة المقبض في حالة استعمال امتداد سلك قصير جداً. أما البروز الطويل لسلك اللحام لغاية (18 mm) فيؤدي إلى خط لحام عريض وتغلغل قليل لخط اللحام. وإذا زاد هذا الامتداد على (18 mm) فإنهُ يؤدي إلى صعوبة اشتعال القوس والتحكم ببركة الصهر وينتج عنهُ تغلغلاً قليلاً لخط اللحام، وبسبب بعد المسافة بين فوهة مقبض الغاز وبركة الصهر فإن حماية الغاز الواقي لا تكن فاعلة وتسبب مسامات وفقاعات فراغية في اللحام. لذا فهناك امتداد وبروز مناسب لخط اللحام يتراوح بين (6 – 18 mm) وعادةً يستعمل امتداد أقصر لأسلاك اللحام ذات الأقطار الصغيرة.

3-2 اللحام بالقوس الكهربائي بالأقطاب غير المستهلكة (التنكستن) المحجب بالغاز الخامل
Tungsten Inert Gas Welding (TIG)

التسمية المتعارف عليها في ورش العمل هو لحام الآركون أو لحام (TIG) وتتمثل هذه العملية بتوصيل قطعتين من المعدن مع بعضهما البعض وذلك بتسخينهما بوساطة القوس الكهربائي المتولد بين قطعة العمل والإلكترود غير المستهلك والمصنوع من معدن التنكستن بحيث تكون عناصر لحام الألكترود والقوس الكهربائي والنقطة المنصهرة والمنطقة الساخنة محمية من الجو الخارجي بوساطة غطاء واق من غاز خامل وعند التغذية بسلك يدخل السلك بضمن هذه العناصر.

وهذا النوع من اللحام ليس بالحديث إذ تم تطويره في عام 1940م للحام المعادن التي يصعب لحامها بطرائق اللحام التقليدية مثل الألمنيوم والمغنيسيوم بالإضافة للحام الفولاذ المقاوم للتآكل. وفي الوقت الحاضر وبوساطة هذا النوع من اللحام يمكن لحام المعادن كافة تقريباً.

2-3-1 مفهوم لحام القوس المحجب بالغاز الخامل (TIG)

إن مصدر حرارة اللحام هو القوس الكهربائي بين الإلكترود المصنوع من التنكستن أو سبائكه وقطعة المعدن المراد لحامها وتحاط قطعة العمل بغاز محجب من النوع الخامل، وقد يستعمل معدن أضافي في اللحام. إن لحام القوس المعدني المحجب بغاز خامل مع إلكترودات غير مستهلكة، يماثل أساليب اللحام الأخرى بالقوس الكهربائي بطريقة MIG/MAG من حيث تسخين المعادن المراد لحامها إلى درجة حرارة الانصهار بقوس كهربائي يتكون ما بين الشعلة والكترود اللحام. تصل درجة الحرارة في القوس الكهربائي إلى 6100°C، وهي كافية لصهر جميع المعادن المراد لحامها. وغالباً ما يستعمل غاز الآركون أو قد يستعمل أحياناً خليط من الآركون والهليوم كغاز الحجب، ويغذى الغاز خلال فوهة تحيط بالإلكترود.

2-3-2 أهم مميزات اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل (TIG)

1. إمكانية لحام معظم المعادن والسبائك المعدنية وبجودة عالية.
2. عدم استعمال مساعدات الصهر لحمايه منطقة اللحام مما يؤدي إلى التخلص من العديد من العيوب الناتجة عن اختلاطها مع المعدن المنصهر. وكذلك عدم الحاجة إلى تنظيف منطقة اللحام بعد عملية اللحام.
3. القوس الكهربائي وبركة اللحام ترى بشكل واضح لعامل اللحام.
4. إمكانية اللحام في أوضاع اللحام كافة.
5. قلة الأبخرة والغازات الناتجة عن عملية اللحام.

2-3-3 محددات اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل (TIG)

1. عملية اللحام المحجب بالغاز الخامل أبطأ من عملية اللحام بالقوس الكهربائي عند أجراء عملية اللحام بالطرائق اليدوية، ولهذا فإن معدل الإنتاجية منخفض.
2. تنمو حبيبات منطقة اللحام نتيجة الحرارة العالية.
3. إجراء هذا النوع من اللحام يتطلب تجهيزات ذات كلفة عالية بالإضافة إلى كلفة الغاز المستعمل كغاز محجب.

4-3-2 عناصر عملية اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل (TIG)

يمكن تشخيص العناصر الرئيسة لعملية اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل بالآتي، والشكل (2-7) يوضّح أجزاء ماكنة اللحام (TIG):

أولا: المصدر الكهربائي

يتكون المصدر الكهربائي بعملية اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل من ماكينة لحام بتيار ثابت أو تيار متردد. تستعمل ماكينة التيار المتردد من أجل لحام الألُمنيوم والمغنيسيوم، أما ماكينة لحام التيار الثابت تستعمل في لحام المعادن الحديدية وسبائك النحاس مع استعمال القطبية المستقيمة غالباً، وتصل قيمة التيار المستعمل إلى حدود 450 A، ويكون فرق الجهد الكهربائي للدائرة المفتوحة (OCV) من (150-80 V)، فيما يخص دورة التشغيل يجب أن تكون على الأقل 60% عند التشغيل اليدوي و 100% عند التشغيل الآلي.

ثانياً: مشعل اللحام Welding Torch

يحتوي مشعل اللحام على مجرى لماء التبريد عند التيارات التي تزيد عن 160 A، وما قل عن ذلك فإن التبريد يكون بالهواء ومجرى لمرور الغاز الحاجب الخامل. ويتوفر مشعل اللحام بتصاميم وأشكال مختلفة ويتحكم التيار الكهربائي بشكل مشعل اللحام وتختلف زاوية رأس مشعل اللحام حسب طبيعة الأعمال المراد إنجازها وأكثرها استعمالاً بزاوية ميل 120°.

شكل 2-7 أجزاء ماكنة اللحام (TIG)

5-3-2 تيار اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل (TIG)

عند إجراء أعمال اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل (TIG) فإنه يمكن استعمال كِلا التيارين الكهربائيين المستمر والمتردد، وللتيار الكهربائي المستمر (DC) نوعان:

أولاً: تيار كهربائي ثابت ذو قطبية مستقيمة (DCSP)

ويستعمل في لحام المعادن كافة باستثناء الألّمنيوم والمغنيسيوم، إذ يرافق توليد القوس الكهربائي تدفق الإلكترونات من القطب السالب إلى القطب الموجب بمعدل 70% من التركيز الحراري على القطب الموجب للقوس الكهربائي بحيث يكون خط اللحام عميق و عريض. ويكون تركيز الحرارة على القطب السالب أقل ما يمكن مما يجعل الألكترود يتحمل تيار لحام عالٍ دون تعرضه للتلف وعلى سبيل المثال إذا كان قطر إلكترود اللحام (1.6 mm) فإنهُ يتحمل تياراً لغاية (125 A).

ثانياً: تيار كهربائي ثابت ذو قطبية معكوسة (DCRP)

وهذه الطريقة نادراً ما تستعمل وذلك بسبب عدم مقدرة الألكترود على تحمل تيار اللحام العالي حيث أن الألكترود الذي قطره (6.4 mm) يتحمل فقط (145 A) ولكن بهذه الطريقة فإنهُ يمكن لحام الصفائح الرقيقة بنجاح إذ أن هذه الطريقة تعطي جذر لحام غير عميق وغير عريض وأهم ما يميز اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل (TIG) ذو القطبية المعكوسة هو إزالة طبقة الأوكسيد الموجود على سطح صفائح الألّمنيوم والمغنيسيوم.

ثالثاً: التيار المتردد (AC)

إن اللحام بتيار AC يحقق عملية تطبيق أعلى من DCSP وأقل من DCRP مع الحفاظ على عمر الإلكترود وعدم تلوث منطقة اللحام بالتنكستن باستعمال القطبية المستقيمة وأكبر من محيط منطقة اللحام عند استعمال القطبية المعكوسة. وأهم ما يميز استعمال التيار المتردد في اللحام هو إزالة طبقة الأوكسيد من دون الحاجة إلى تحديد التيار، وهذا يؤدي إلى ضرورة الحاجة إلى الحفاظ على استمرارية وثبات القوس الكهربائي. أثناء إجراء عملية لحام (TIG) باستعمال التيار المتردد يعاني القوس الكهربائي من عدم الاستقرار والسبب في ذلك إن القطبية تتغير في الثانية الواحدة ما بين السالب والموجب 50 مرة وتكون نصف دورة القطبية المعكوسة أقل من نصف دورة القطبية المستقيمة نظراً لتباين التوصيل الكهربائي ما بين الإلكترود وقطعة العمل وهنالك العديد من طرائق المعالجة منها استعمال تيار متردد AC بتردد عالٍ.

6-3-2 أقطاب اللحام Welding Electrodes

يستعمل في عملية اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل (TIG) قطب لحام غير مستهلك مصنوع من مادة التنكستن. والتنكستن هو واحد من المعادن ذات المقاومة العالية والصلادة الجيدة، ويمتاز بدرجة انصهار عالية تصل (3410°C) وهي أعلى درجة انصهار للمعادن ويحتفظ بنفس مواصفاتهُ حتى لو تم تسخينهُ إلى درجة الاحمرار. وتتوافر أقطاب التنكستن بأطوال مختلفة وتصنع من التنكستن أو سبيكة التنكستن والتي تكون فيها نسب المواد المضافة بسيطة جداً وذلك من أجل تحسين خواص الإلكترود. ومن هذه المواد، أوكسيد الثوريوم وأوكسيد الزركونيوم وأوكسيد السيريوم، ويمكن أن تصنع بحسب المواصفات الخاصة، وكما مبيّن في الجدول (2-3).

الجدول 2-3 المواصفات الكيميائية الخاصة بإلكترود التنكستن المستعمل في (TIG)

لون السلك	الرمز	التنكستن %	أوكسيد الثوريوم %	أوكسيد الزركونيوم %	أوكسيد سيريوم %	المواد المحسنة %
أخضر	EWP	99.5	-	-		0.5
أصفر	EWTh-1	98.3	0.8-1.2	-		0.5
أحمر	EWTh-2	97.3	1.7-2.2	-		0.5
برتقالي	EWCe-2	97.3			2	0.5
بني	EWZr-1	99.1	-	0.15 - 0.40		0.5

أولاً: السلك (EWP) يحتوي على نسبة 99.5% تنكستن

وقدرتهُ على تحمل تيار أقل من الأقطاب الأخرى وعند استعمال هذه الأقطاب في التيار المتردد فإنها تعطي ثباتاً في القوس الكهربائي، إلا أنها تستعمل أيضاً عند اللحام بالتيار الثابت مع الآركون أو الهيليوم أو خليط من هذين الغازين كغاز حاجب، بحيث تحافظ على نظافة المنطقة المنصهرة وتجعلها نظيفة وخالية من الشوائب وذلك عند لحام الألمنيوم أو المغنسيوم. وبشكل عام هذا النوع من الإلكترودات يستعمل في الأعمال التي لا تتطلب تيارات عالية نسبياً، باستثناء لحام الألمنيوم.

ثانياً: السلك EWTh-1

ويحتوي على نسبة 1% أوكسيد الثوريوم، والهدف من إضافة الثوريوم هو تحسين خواص القوس الكهربائي والمحافظة على استمرارية هذا القوس، وجعل السلك (الإلكترود) يتحمل تيارات لحام عالية وإطالة مدة استعماله من دون تعرضه لتعرية Erosion. ولهذا القطب قدرة عالية على أطلاق الإلكترونات. يستعمل الألكترود الأصفر عند أجراء اللحام بالتيار الثابت ويمكن استعماله مع التيار المتردد.

ثالثاً: السلك EWTh-2

وتكون نسبة أوكسيد الثوريوم 2% ويكون له مواصفات الألكترود الأصفر نفسه مع إمكانية تحمل تيارات لحام اعلى من مستواه.

رابعاً: السلك EWCe-2

ويحتوي على نسبة أوكسيد السيريوم بحدود 2% وأهم ميزاته استعماله مع كلا النوعين التيار الثابت والمتردد مع محدودية تعرضه للتعرية مقارنة بالإلكترودات الأخرى.

خامساً: السلك EWZr-1

يحتوي على نسبة 0.35% أوكسيد الزركونيوم ويستعمل في عملية اللحام التي تتطلب أقل نسبة تلوث لمنطقة اللحام وتصمم لأعمال اللحام باستعمال التيار المتردد ولهُ مقاومة عالية للتعرية عند تيارات اللحام العالية.

عند اختيار نوع الإلكترود لا بد من الأخذ بنظر الاعتبار الآتي:

1. نوع وسُمك المعدن.
2. نوع القطبية والتيار الكهربائي.
3. نوع الغاز الخامل المستعمل.
4. نوع الوصلة.
5. وضعية اللحام.
6. مواصفات اللحام المطلوبة.

2-3-7 الغازات الخاملة المستعملة

الوظيفة الأساس للغاز الخامل هي عزل منطقة اللحام عن المحيط الخارجي لمنع أكسدة اللحام، والمقصود بمنطقة اللحام (إلكترود التنكستن، النهاية المنصهرة لسلك التغذية والمنطقة المنصهرة لقطعة العمل)، الغازات المستعملة كغاز حاجب لهذه الطريقة هي فقط الغازين الخاملين الآركون والهيليوم لأن بقية الغازات الخاملة تُعد باهضه الثمن، ويعتمد استعمال نوع الغاز مع المعدن الأساس على الرغم من أن الطريقة الشائعة هي استعمال غاز الآركون ويستعمل غاز الهليوم عند الحاجة إلى توليد حرارة أعلى في منطقة القوس، وفي بعض الأحيان يتم مزج الغازين لحالات خاصة بحسب نوع المعدن.

2-3-8 معدن الحشو للحام القوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل (TIG)

من أجل تعيين معدن الحشو يجب تحديد الآتي:

1. نوع المعدن المراد لحامه.
2. الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمعدن.
3. نوع الوصلة.
4. طبيعة التشطيبات النهائية لقطعة العمل.

لا يستعمل غالباً معدن الحشو لهذه الطريقة مع قطع العمل ذات السمك القليل وفي حالة استعماله فهو متوافر غالباً على شكل قضبان مستقيمة، ومصنعة بأقطار بحسب سمك قطعة العمل وغالباً ما تضاف بطريقة يدوية، وفي حالة إضافة معدن الحشو آلياً فتستعمل أسلاك على شكل بكرة. وتصنيف وترقيم واستعمالات أسلاك اللحام المستعملة في لحام القوس الكهربائي بالأقطاب المغلفة هي غالباً نفسها التي تستخدم في لحام TIG ويعتمد الحرف R لكلمة Rod عند ترقيم القضبان وتعني أن هذه القضبان ليست جزءاً من الدائرة الكهربائية. ويتم اختيار معدن الحشو بحيث يكون مشابهاً للمعدن المراد لحامهُ من حيث التركيب والخواص الميكانيكية والفيزيائية، إذ يتم لحام معدن الألُمنيوم بسلك من الألُمنيوم ويمكن استعمال شرائح من نفس المعدن المراد لحامه. وتصنع أسلاك التغذية من معادن مختلفة أو سبائكها كما في الألمنيوم وسبائكهُ، والنحاس وسبائكهُ، وسبائك النيكل والفضة.

أسئلة الفصل الثاني

س1) ما أنواع اللحام بالقوس الكهربائي بالغاز الخامل؟

س2) ما هي ميزات اللحام بطريقة (MIG\MAG)؟

س3) عدد الغازات المستعملة في اللحام بالقوس الكهربائي بطريقة (MIG\MAG).

س4) ما هي ميزات الغازات المحجبة في اللحام بالقوس الكهربائي بطريقة (MIG\MAG)؟

س5) فسّر رموز أسلاك اللحام الآتية: E70S-3 ، E70S-6 ، E70S-5

س6) عرّف اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل.

س7) قارن بين التيار المستمر والتيار المتناوب.

س8) ما هو تأثير معدل تدفق غاز الحجب في عملية اللحام بالقوس الكهربائي بطريقة (MIG\MAG)؟

س9) وضّح عملية اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بطريقة (TIG).

س10) ما أنواع أقطاب اللحام القوس الكهربائي المحجب بطريقة (TIG)؟

س11) املأ الفراغات الآتية بما يلائمها:

1. في لحام (MIG\MAG) يستعمل الآركون مع ثاني أوكسيد الكربون بنسبة ..... أو الآركون مع الهليوم بنسبة .....
2. تصنف أسلاك الفولاذ الكربوني في لحام (MIG\MAG) دولياً إلى .....
3. تتم عملية انتقال معدن اللحام من طرف السلك اللحام إلى بركة الصهر بطريقتين هما .....و .....
4. تصنف أسلاك الفولاذ المقاوم للتآكل في لحام (MIG\MAG) دولياً إلى .....
5. العوامل المؤثرة في عملية لحام (MIG\MAG) هي.....
6. أنواع الغازات الخاملة المستعملة في عملية اللحام (TIG) هي .....
7. العناصر الرئيسة في عملية اللحام بالقوس الكهربائي بطريقة (TIG) هي .....
8. أنواع التيارات في عملية اللحام بالقوس الكهربائي بطريقة (TIG) هي .....

س12) ضع علامة **صح** أو **خطأ** أمام العبارات الآتية، **وصحح الخطأ** إن وجد:

1. تعرّف الغازات الخاملة بانها لا تتفاعل كيمياوياً مع غيرها من المواد.
2. من أهم عناصر عملية لحام (MIG\MAG) هو نظام الحجب بالغاز.
3. غاز الآركون من الغازات غير الرئيسة في عملية لحام (MIG\MAG).
4. طريقة الرش هي إحدى طرائق انتقال معدن اللحام من طرف السلك إلى بركة الصهر.
5. من أهم ميزات اللحام بالقوس الكهربائي المحجب بالغاز الخامل (TIG) هو استعمال مساحيق اللحام.

الفصل الثالث

طرائق اللحام اللاتقليدية

Non Traditional Methods of Welding

الاهداف

الهدف العام:

في هذا الفصل سيتمكن الطالب من معرفة أساسيات مبدأ العمل والتطبيقات العملية لطرائق اللحام اللاتقليدية، وكذلك سيتكمن من معرفة أنواع وميزات ومساوئ هذه الطرائق. وكذلك معرفة عملية القطع بالليزر.

الأهداف الخاصة:

بعد الانتهاء من دراسة الفصل الثالث سيتمكن الطالب من فهم الآتي:

1. اللحام بحزمة الليزر وأنواعها.
2. جهاز الليزر والتطبيقات.
3. الفوائد والمحددات.
4. اللحام بالحزمة الإلكترونية (المتغيرات، المزايا، المحددات، الاستعمالات)
5. لحام اللدائن وأساليبه.
6. عملية القطع بالليزر (أنواعها، استعمالاتها، فوائدها).

طرائق اللحام اللاتقليدية

Non Traditional Methods of Welding

1-3 مقدمة Introduction

تُعد عملية اللحام إحدى أقدم عمليات الإنتاج والتشكيل التي عرفها التاريخ القديم. فلقد استعمل السومريون في ارض الرافدين هذه العملية لإنتاج بعض الأدوات المنزلية النحاسية كما عرفها الإغريقيون وسكان فلسطين قبل آلاف السنين قبل الميلاد. وكانت عملية اللحام تقتصر على إصلاح الأجزاء المعدنية والمعدات التالفة. إلا أن التطبيقات الحديثة لأساليب اللحام والقطع التي أحدثت تحسينات هائلة وتكاليف منخفضة وإنتاجية أكبر جعلت من عملية اللحام عملية إنتاجية هامة لأغراض التصنيع والإنشاء والصيانة. لقد كان تطور هذه العملية من خلال القرون الماضية بطيئاً نسبيا نظراً لبساطة الأساليب والطرائق وبدائية التقنية التي استعملت لإنجازها. ولقد بدأت عملية اللحام بالتطور السريع في خلال نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين. إذ تُعد اليوم إحدى أوسع عمليات الإنتاج. وقد أدى التطور في مجالات هندسة ميتالورجيا المعادن إلى ظهور سبائك ذات صلادة ومتانة عاليتين لا يمكن تشغيلها بسهولة كسبائك المواد الكاربيدية والسيراميكية والتيتانيوم والتنكستن. وتم تطوير طرائق لحام أخرى تعتمد على متغيرات أخرى مثل الذبذبات والموجات فوق الصوتية وغيرها وتتميز هذه الطرائق بإعطائها دقة ونعومة سطحية جيدتين وتحت ظروف تشغيل اقتصادية. وتم استعمال طرائق اللحام والقطع هذه في الآونة الأخيرة بشكل واسع في العمليات الإنتاجية.

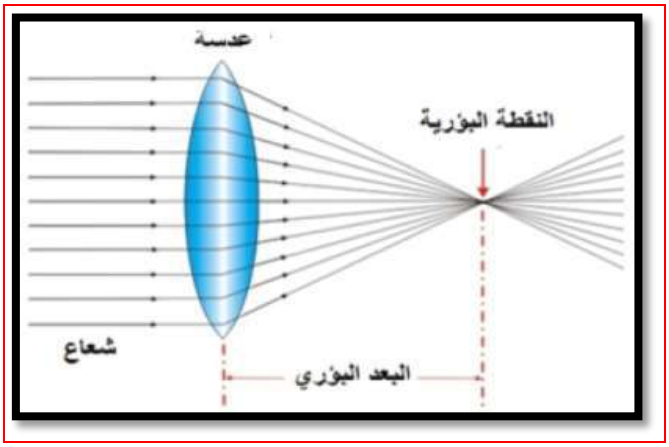
2-3 اللحام بحزمة الليزر Laser Beam Welding

عملية اللحام بأشعة الليزر هي عملية تركيز بؤري لضوء أحادي اللون إلى حزمة شديدة التركيز حيث يتكون ضوء بأكمله من موجات تشبه الموجات الراديوية أو الموجات المايكروية تكون هذه الموجات غير مترابطة في الضوء الاعتيادي وذات أطوال وترددات متباينة تطلق إلى كافة الاتجاهات، أما أشعة الليزر فتتكون من ضوء مترابط أي إن موجاته تكون متناظرة ومتوازية وذات قابلية على الانتقال مسافات طويلة من دون أن تفقد شيئاً من شدتها، لاحظ الشكل (3-1).

تستعمل عملية اللحام حزمة ضوئية مركزة بؤرياً بدقة، مما يؤدي إلى تركز كميات هائلة من الطاقة في مساحة ضيقة مسببة الانصهار فيها. وتتكون حزمة متوازية من الإشعاع من مصدر مثل أنبوب الوميض (Flash Tube) وذلك بوضع مصدر مشع في المستوى البؤري لمنظومة ضوئية. وتكون الحزمة الناتجة ليست متوازية تماماً، ومقدار الانفراج الزاوي يساوي مقدار الانفراج (التباعد الزاوي للمصدر) ويستعمل جزءاً بسيطاً من المصدر المشع لتحسين دقة الحزمة. وتستهلك كمية من طاقة هذا المصدر أيضاً بتأثير فتحة المنظومة الضوئية التي تعمل ككابح مزيلاً كمية كبيرة من الإشعاع. إن إنتاج حزمة ضوئية متوازية تقريباً يصبح ممكنا باستعمال جزء صغير من طاقة المصدر الضوئي الاعتيادي فقط. وكلما ازدادت درجة التوازي كلما قل هذا الجزء من الطاقة المشعة. ولا يمكن استعمال الضوء العادي في عملية اللحام لأن الطاقة المشعة من المصدر الضوئي العادي تتوزع على مدى طيفي واسع بمعنى آخر فانه لا يتوافر مصدر أحادي اللون في هذا الضوء كضوء الليزر، بالإضافة إلى أن الطاقة

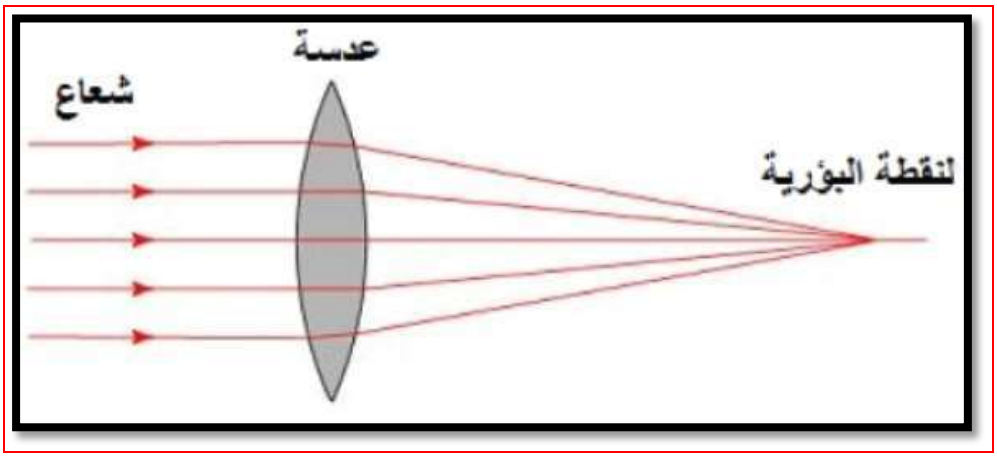
المشعة من الضوء الاعتيادي لا يمكن توجيهها بالاتجاه المطلوب. أشعة الليزر ليست بالغة الشدة وحسب، بل يمكن أيضاً تركيزها بؤرياً بسرعة مع المحافظة على الشدة. تنطلق موجات الضوء الاعتيادي في مناطق مصادرها المختلفة بشكل يجعل الضوء الذي ينتقل بخطوط مستقيمة يمر من خلال العدسة بزوايا مختلفة. ونتيجة لذلك ينتشر الضوء محددا بذلك الحد الأدنى من المساحة التي يمكن تركيزه فيها بؤرياً. يحتوي الضوء الاعتيادي على عدد كبير من الأطوال الموجية المختلفة. وهذه الأطوال الموجية تدخل العدسات منتقلة من الوسط الأقل كثافة إلى الوسط الأكثر كثافة، لتسبب انكسار الأشعة الناصعة. وتتغير زاوية الانكسار لكل طول موجي وبذلك فالشعاع المنطلق من العدسة سيتركز بؤرياً في نقاط مختلفة مما يجعل الطاقة الإشعاعية المنبعثة من مصادر الضوء الاعتيادي غير ملائمة كمصدر حراري، كما موضّح في الشكل (3-2).

الشكل 3-1 اللحام بأشعة الليزر



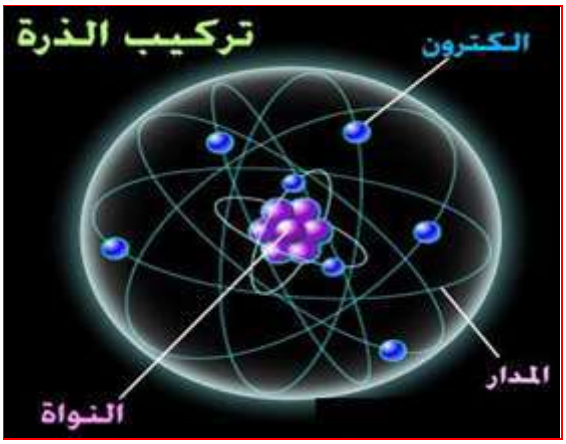
الشكل 3-2 التركيز البؤري للضوء الاعتيادي

ولغرض الاستفادة من التركيز البؤري للطاقة الضوئية والسماح باستعمالها لعمليات لحام أو قطع المعادن، لا بد من دخول الحزمة الضوئية إلى العدسة بخطوط مستقيمة وان تكون ذات طول موجي أحادي التردد أو ذات موجات مترابطة بحيث أنها تكون متوازية. وتستجيب أشعة الليزر لهذه الشروط وبالإمكان نظريا تركيزها بؤريا إلى نقطة لا يتجاوز قطرها الطول الموجي الواحد للضوء، أي لا يتجاوز قطرها (0.0001 cm). وتتوافر أنواع عديدة من الإشعاعات مثل الموجات الراديوية Radio Waves والأشعة السينية X-Ray وأشعة كاما Gamma –Ray، والشكل (3-3) يوضّح التركيز البؤري.



الشكل 3-3 يمثل التركيز البؤري لضوء الليزر

وكل هذه الأنواع من الإشعاع ترتبط بحركة الإلكترون ومجالات القوة المغناطيسية أو بمعنى آخر هي كلها صور من الإشعاع الكهرومغناطيسي فيما يكون الضوء واحداً من هذه الصور التي تتميز بحركة الموجة والجسيم، ومع إن الضوء أحياناً يتصرف وكأنه مركب من موجات إلا أنه أيضاً يؤثر كما لو كان مركب من جسيمات الطاقة (Photons) والأساس في ذلك هو الذرة والتي تتكون من نواة (Nucleus) والإلكترونات تدور في مدارات محددة والنواة تحتوي على جسيمات موجبة الشحنة تعرف بالبروتونات (Protons) وجسيمات متعادلة الشحنة تعرف بالنيوترونات (Neutrons). والإلكترونات تحمل شحنة سالبة، وتساوي في عددها عدد البروتونات وتدور في مدارات تعرف بالأغلفة (Shells)، لذا فالذرة عادة متوازنة كهربائياً وتعرف حالة التوازن هذه بالحالة المستقرة، لاحظ الشكل (3-4).

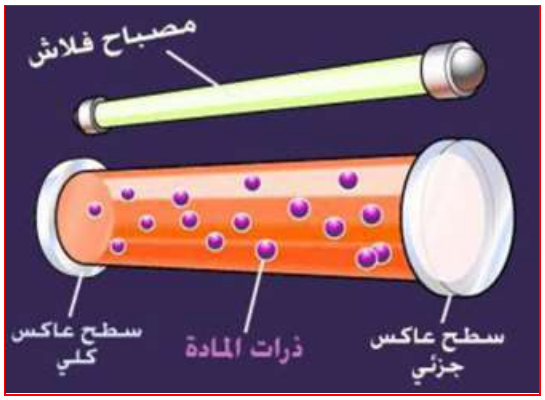


الشكل 3-4 يمثل تركيب الذرة

الذرات في هذه الحالة ليس لها دور في جهاز الليزر. ولو أرغمت ذرة الكروم على الانتقال من مستوى الحالة المستقرة إلى مستوى طاقة اعلى باستعمال قوة خارجية مثل أنبوب الوميض الذي يستعمل غاز الزينون (Xenon) فإن الذرة ستمتص طاقة. وهذه الطاقة الممتصة تجعل الإلكترونات تزيد من دورانها وتوسع من مداراتها. وتحدث هذه الحالة المثارة في مدة زمنية قصيرة وتعود بعدها الذرة مباشرة إلى حالة شبه مستقرة (Metastable State) وفي خلال رجوعها تفقد الذرة طاقتها الحرارية لكنها تحتفظ بطاقة الفوتون. وبعد وقت قصير تعود الذرة بطريقة عشوائية إلى حالة الاستقرار لتنبعث منها طاقة الفوتون أو الكم على هيأة ضوء.

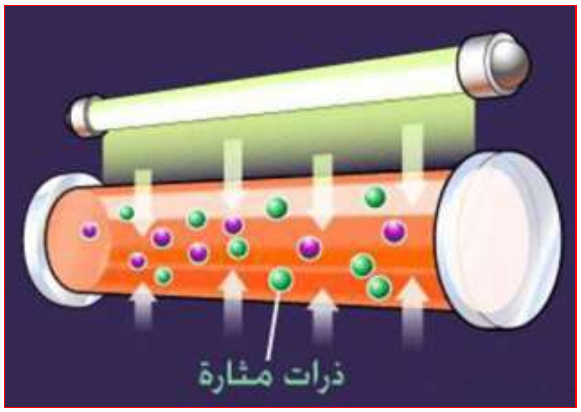
1-2-3 أنواع الليزر Laser Types

توجد ثلاثة أنواع رئيسة من الليزر، وهي: الليزر الصلب، والليزر الغازي، والليزر شبه الموصل. ونوع الليزر يعتمد على مصدر الليزر، فتنتج الأنواع الصلبة من بعض أنواع البلورات مثل القضيب الياقوتي والياقوت الأزرق (Sapphire) أو بعض البلورات المركبة اصطناعياً لحثها على توليد أشعة ليزر. ويحدث تكوين الليزر في قضيب ياقوتي (أحمر داكن) مجهز بمرايا متوازية. وإذا ضخ عدد ذرات تفوق نصف عدد ذرات الكروم في هذا القضيب في حالة شبه الاستقرار. ويبدأ التعاكس الشائع في هذه النقطة بالتأثير حينما تضمحل ذرة الكروم المثارة تلقائياً وتنبعث الفوتونات موازية لمحور القضيب. إذا انعكست الفوتونات داخل التجويف الرنان في لحظة ما سيحفز ذلك انبعاث موجات الضوء فتبدأ الموجة في التكون. وتنتج هذه الموجة حزمة ضوء مترابطة كثيفة أحادية اللون، وتصمم التجاويف الرنانة الليزرية لتعكس موجات الضوء إلى الأمام وإلى الخلف بين وسطين عاكسين يواجه كل منهما تجاويف الليزر بأبعاد مختلفة. وبهذه الطريقة تنعكس موجة الضوء مرات عدة من مرآة إلى أخرى ويزداد بذلك مسار الضوء ذي المسافة والمحدد من خلال موجة الضوء التي تذهب. وبذلك تنبعث طاقة فوتون اكثر من الذرات المثارة التي توجد في الحالة شبه المستقرة وكلما ارتدت موجات الضوء إلى الخلف وإلى الأمام بين المرايا. فإنها تجمع طاقة حتى تصل قيمة كافية لتنطلق خلال مرايا الانعكاس على هيأة حزمة الليزر. ويسمى الارتداد لموجة الضوء بانطواء حزمة الضوء (Flooding the Light Beam). ولأجل التحكم باتجاه الحزمة، تصنع التجاويف من مرايا ذات معاملات انعكاس مختلفة فالمرآة الأولى (10%) إما المرآة الثانية فتعكس حوالي (98%)، وفي هذه الطريقة، تخرج الحزمة من المرآة الثانية في نهاية التجويف الرنان لتسمح بتحديد الاتجاه، لاحظ الشكل (3-5).



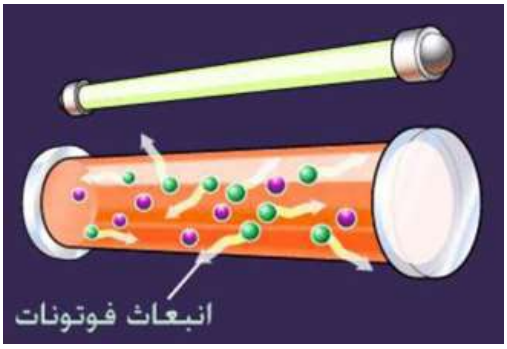
الشكل 3-5 مكونات ليزر الياقوت

ليزر الياقوت: يتكون ليزر الياقوت من مصدر ضوء وساق من الياقوت ومرآتين مثبتتين على طرفي الساق إحدى هاتين المرآتين لها مقدار انعكاس 90%. يُعد المصدر الضوئي مسؤولاً عن عملية الضخ وساق الياقوت هو مادة إنتاج الليزر، ويعمل فرق الجهد العالي على تزويد الضوء بالطاقة الكافية لتوليد ضوء ذي شدة عالية ولفترة زمنية قصيرة وهذا الضوء يعمل على إثارة الذرات في بلورة الياقوت إلى مستويات الطاقة الأعلى، وكما موضّح بالشكل (3-6).

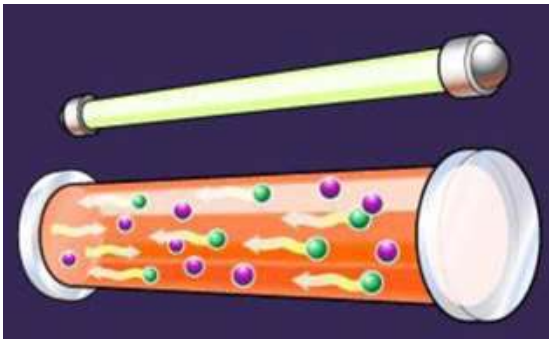


الشكل 3-6 ذرات مثارة في بلورة الياقوت

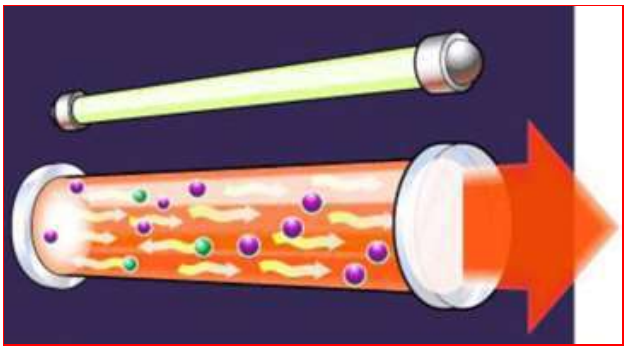
تنطلق الفوتونات بموازاة محور ساق الياقوت لتصطدم بالمرآة وتنعكس إلى داخل الياقوت عدة مرات لتستحث إلكترونات أخرى فتطلق فوتونات، كما في الشكلين (3-7) و (3-8)، الفوتونات بطول موجي واحد وبنفس الطور ومتجمعة في حزمة تمر من المرآة لتعطي ضوء الليزر، لاحظ الشكل (3-9).



الشكل 3-7 انبعاث الفوتونات

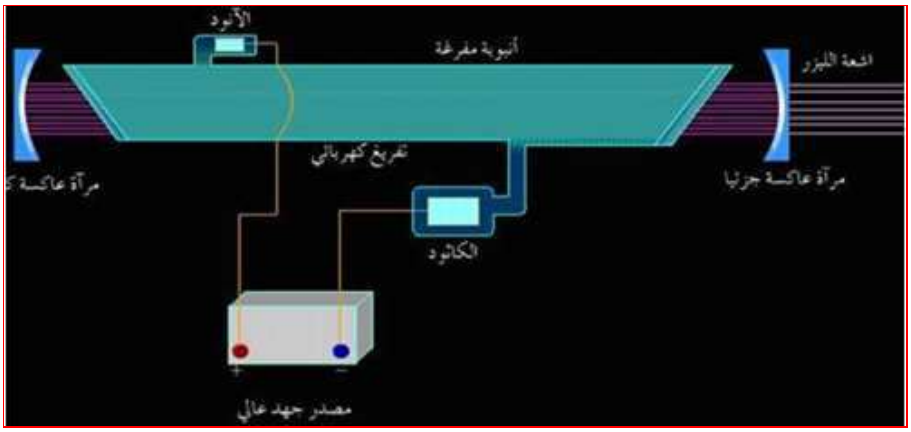


الشكل 3-8 انطلاق الفوتونات



الشكل 3-9 إنتاج الليزر

الليزر الغازي: يعمل بطريقة مختلفة عن ليزر الحالة الصلبة. وتتكون المواد الفاعلة لليزر الغازي من الغاز أو خليط من الغازات موضوعة في أنبوب زجاجي أو من الكوارتز ومزودة عند نهايتها بمرايا عالية الصقل، ومن أهم أنواع هذا الليزر: ليزر الهيليوم – نيون (Helium Neon Laser) وليزر ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، وكما في الشكل (3-10).



الشكل 3-10 جهاز اللحام الليزر الغازي

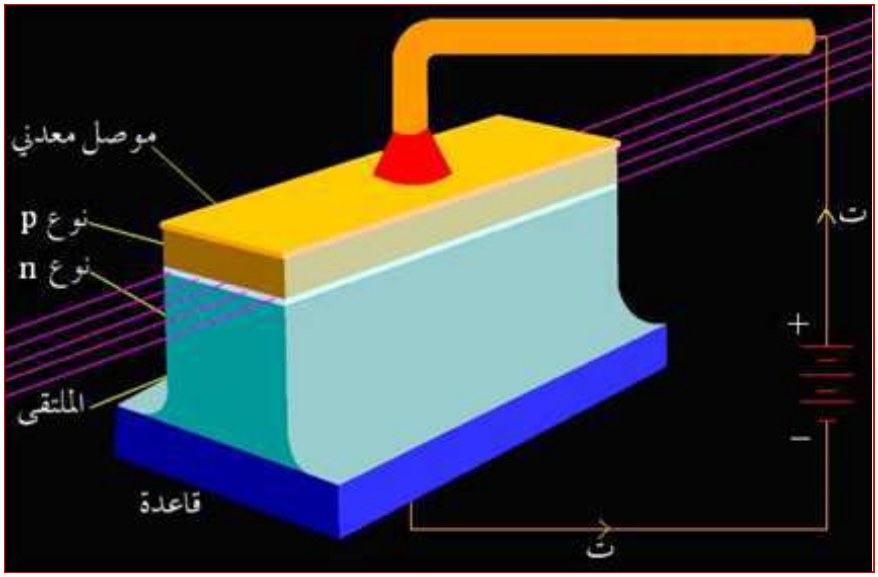
وتتم عملية الضخ باستعمال عملية تفريغ كهربائي بفرق جهد عال يسلَّط بين الكاثود والآنود وتقوم الإلكترونات الناتجة من مرور التيار بوساطة التفريغ الكهربائي بالتصادم مع ذرات الهيليوم حيث تنقلها إلى مستويات الطاقة الأعلى، ويمكن أن تنتقل ذرات الطاقة إلى ذرات النيون بتصادم ذرات الهيليوم مع ذرات النيون والتي تنتقل بدورها من مستوى الطاقة الأول إلى مستوى أعلى، وكما في الشكل (3-11).

الشكل 3-11 مستويات الطاقة

وبهذا يتم تحقيق التوزيع المعكوس لذرات النيون. وعندئذ يحدث الانبعاث المستثار إلى مستوى الطاقة (الطاقة الثالثة) لذرة النيون لتنتقل الذرة إلى مستوى (الطاقة الثانية) باعثة حزمة الليزر ذات اللون الأحمر بطول موجي 633 نانومتر. وتُـعد كفاءة ليزر He- Ne منخفضة جداً، ولا تتعدى أعلى قدرة له (50 mW). ولكن استعمالاته واسعة جداً بسبب طوله الموجي المرئي وانفراجاته الصغيرة. ويعد ليزر ثاني أوكسيد الكربون من أهم أنواع الليزر، بسبب كفاءته العالية التي تبلغ 30 %، وكبر القدرة الناتجة منه بسبب أن هذا الليزر يصدر إشعاعاً في منطقة الأشعة تحت الحمراء ومنطقة الميكروويف. وبسبب الحرارة العالية الصادرة من هذا الليزر فإنه يصهر كل شيء يعترضه.

الليزر شبه الموصل: يختلف الليزر شبه الموصل (Semiconductor or Diode–Lasers) عن ليزر الحالة الصلبة في طريقة تمثيل مستويات الطاقة، وبالتالي ميكانيكية الضخ وعملية الانبعاث الضوئي، إذ يحتوي ليزر شبه الموصل على حزم عريضة من مستويات الطاقة بدلاً من المستويات المفردة التي تحدث بينها الانتقالات التي تشارك في عملية انبعاث الليزر. وكل حزمة من هذه الحزم

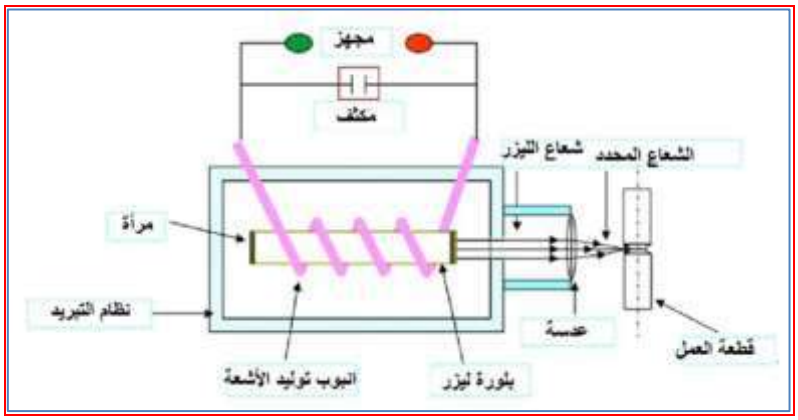
تحتوي على عدد كبير من مستويات الطاقة المتقاربة والتي لا يقترن وجودها بذرات معينة وإنما تشترك فيها المادة البلورية كلها. إن الليزر شبه الموصل عبارة عن وصلة ثنائية (P-N Junction) وأكثر أنواعه شيوعاً هو شعاع الليزر الذي يبعثه و يقع في منطقة الأشعة تحت الحمراء وهو ضوء غير مرئي، وكما موضّح بالشكل (3-12).



الشكل 3-12 الليزر شبه الموصل

3-2-2 جهاز الليزر Laser Device

يتألف جهاز الليزر للومضات الضوئية من مضخة ضوئية وعنصر نشط لإنتاج شعاع أحادي الطبيعة بكثافة عالية جداً. وتتألف المضخة الضوئية من صمام ومضي ذي قوة عالية ومملوء بعنصر الزينون أو الكربتون ويزود بالطاقة اللازمة لتشغيله من خلال مكثف كهربائي. أما العنصر النشط فهو عبارة عن بلورة من العقيق الاصطناعي أو أوكسيد الألمنيوم البلوري والمحتوي على 0.05% كروم. وتطلى سطوح البلورة بالفضة فتتكون بذلك مرايا داخلية ويحتوي أحد السطوح ثقب يسمح بمرور أشعة ليزر خلاله. ويوضّح الشكل (3-13) مبدأ اللحام بأشعة الليزر ويؤدي تشغيل الصمام الومضي إلى إثارة ذرات الكروم العقيق الاصطناعي (Ruby) وينقلها إلى مستوى أعلى من الطاقة وعند رجوع هذه الذرات إلى مستواها الطبيعي تبعث شعاعاً ضوئياً مكثفا ومكبراً وباتجاه واحد وذا طول موجي واحد بالطور نفسه فتحدث اهتزازات في داخل العقيق وانعكاسات من الأطراف العاكسة حتى يحدث رنيناً ضوئياً فينبعث شعاع ضوئي ذو شده عالية. يتصف هذا الشعاع بكونه متوازياً وذي قطر مائل.



الشكل 3-13 مبدأ اللحام بأشعة الليزر

ويمكن لبلوَرة الشعاع من خلال مجموعة من العدسات توليد الحرارة الكافية لتبخير المعدن الموجود في مساره. ويمتاز الشعاع المتوازي أيضاً بقدرته على الانتقال إلى مسافات طويلة. وإن الوصلات الأكثر ملاءمة للحام الليزر هي الوصلات التراكبية وكما يستعمل الليزر في لحام الوصلات الأخرى كاللحام التناكبي ووصلات الزاوية وبشكل حرف T.

3-2-3 آلية اللحام بحزمة الليزر Mechanism of Laser beam welding

تتأخر عملية اللحام بجهاز اللحام بالليزر بسبب طبيعة حزمة الضوء. فمعدل عمر حزمة لحام الليزر تساوي (0.002 sec) وبسبب هذا العمر القصير، نتجت عمليتان أساسيتان للحام. ففي الطريقة الأولى تحرك أو تدور الملحومة بسرعة كافية بحيث تلحم نقاط الوصل بالانطلاق الواحد للضوء. وتستعمل الطريقة الثانية نبضات عديدة من الليزر لتكوين اللحام، وحسب تقنية النبض يحتوي اللحام على كريات لحام صلبة مستديرة كل واحدة تتداخل مع سابقتها بحوالي نصف قطر الكرية كما في لحام المقاومة الخطي. وميزة طريقة نبضة الليزر هي أن عدد النبضات كبير ويبلغ حوالي (10 نبضات لكل ثانية) بحيث إن الملحومة لا تتعرض للتسخين إلا في نقطة واحدة، وتُعد هذه ميزة ميتالورجية للحام الليزر. ويتواجد السائل في حالة الانصهار فقط، الشكل (3-14) يوضّح تطبيقات اللحام بالليزر.

الشكل 3-14 تطبيقات اللحام بالليزر

واللحام بالليزر مناسب للتطبيق سواء تحت التفريغ الهوائي أو بدونه. ويمكن لحام المواد شديدة الفعالية أيضاً. وأشعة الليزر لها درجات حرارة كافية لربط المعادن أو المواد ذات درجات انصهار عالية في مساحات صغيرة بسهولة. كما أن لليزر القدرة على اختراق أنبوب الكوارتز، ولحام المعدن داخل الأنبوب دون إضرار الأنبوب نفسه. وهناك ثلاثة شروط يجب توافرها في حزمة الليزر لإنجاز الانصهار في نبضة واحدة، وهي يجب أن تكون: 1- الحزمة مناسبة لصهر سطح المعدن، 2- شدة الحزمة أقل من درجة تبخر المادة، 3- طول النبضة كافياً ليسمح بتوصيل الحرارة خلال المعدن. وهذه الطريقة ملائمة للتطبيقات التي تحتاج إلى دقة عالية لا يمكن الحصول عليها بأي طريقة أخرى وخصوصاً لعمل الثقوب في الزجاج والسيراميك والبراص، ولاحظ الشكل (3-15).

الشكل 3-15 اللحام الآلي بالليزر

يقتصر استعمال اللحام بالليزر على لحام المعادن رقيقة السمك، وأحد الميزات الكبيرة للحام الليزر هي الحرارة الشديدة الناتجة بتأثير الليزر في مساحة قليلة إذ تختزل الحاجة إلى الطاقة المبذولة والضرورية للحام بسبب هذه الخاصية، وتستعمل هذه الطريقة للحام المعادن غير المتشابهة والمختلفة الخواص الفيزيائية بالإضافة إلى ذلك يمكن لحام المعادن ذات المقاومة الكهربائية العالية نسبياً والأجزاء المختلفة الحجوم والكتل، إذ إن الليزر عبارة عن حزمة ضوء بسيطة، فهو لا يتطلب قطباً. ويمكن لحام أي جزء في موضع خاص لدى توفر خط رؤية مباشر من الحزمة إلى الملحومة. ويمكن إنجاز اللحام بدرجة عالية من الدقة وبسمك قد يصل إلى المايكرون. ولا تسلط حزمة الضوء أيضاً أي قوة على المعدن والحرارة آنية وعالية التركيز. وبالتالي فإن لحام الليزر سيقلل التشوه والانكماش إلى أُقل قدر ممكن باختزال المنطقة المتأثرة بالحرارة في اللحام. وللحام بالليزر استعمالات عديدة أخرى منها بسبب طاقته الحرارية العالية فهو ملائم للحام والقطع وبسبب دقته فإنه يستعمل في الصناعات الإلكترونية الدقيقة كما ويمكن ربط الوصلات بعضها مع بعضها الآخر، وكما في الشكل (3-16).

الشكل 3-16 تطبيقات أنواع اللحام بالليزر

4-2-3 ميزات اللحام بالليزر Advantages of Laser Welding

1. يمكن إجراء اللحام في داخل غلاف من الزجاج أو اللدائن من دون إزالة الغلاف.
2. يكون التلوث معدوماً كون اللحام يتم من دون معدن حشو، ومن دون استخدام تيارات كهربائية عالية.
3. يمكن لحام مواقع يصعب الوصول إليها بطرائق اللحام الأخرى كما ويمكن لحام وصلات تفصلها مسافات صغيرة جداً.
4. لا تحتاج الطريقة إلى جو مفرغ من الهواء، ولا يحدث تفاعل مع الهواء لقصر المدة الزمنية التي يبقى فيها المعدن سائلاً ولصغر حجمه، لذا فاللحام بالليزر لا يحتاج إلى غاز واقٍ.
5. يمكن لحام سبائك معاملة حرارياً من دون التأثير في خواصها بسبب إمكانية تركيز أشعة الليزر في قطر صغير جداً، فتكون المنطقة المتأثرة بالحرارة ضيقة جداً هي الأخرى.

5-2-3 محددات طريقة اللحام بالليزر Limitations of Laser Beam Welding

مـــن محددات طريقة اللحام بالليزر هي: السرعة المنخفضة للحام، والعمق المحدد للحام بحدود (1.5 mm) لان زيادة الطاقة تؤدي إلى تكوين فجوات غازية، كما إن بعض المعادن لا يمكن لحامها مثل المغنسيوم لأنه يتبخر وتتكون فجوات سطحية.

3-3 اللحام بالحزمة الإلكترونية Electron Beam Welding

يعد هذا النوع من اللحام أحد طرائق اللحام الانصهاري وهي طريقة حديثة ظهرت بعد الحرب العالمية الثانية، إذ يحصل على الإلكترونات ومن ثم تعجل وتوجه إلى قطعة العمل وعند اصطدامها بقطعة العمل تتحول طاقتها الحركية إلى طاقة حرارية تصهر قطعة العمل وبذلك تلحم الأجزاء بعضها مع الآخر، كما في الشكل (3-17). ويمكن التحكم في الشعاع الإلكتروني بحيث يوجه إلى منطقة صغيرة والحصول على درجة حرارة عالية في تلك المنطقة. وتزداد كمية الحرارة المتولدة كلما كبر مقدار الجهد المسرع، فمثلاً حينما يكون الجهد المسرع في حدود **15 kV** تصل سرعة الإلكترونات إلى حوالي (224000 km\s).

الشكل 3-17 اللحام بالحزمة الإلكترونية

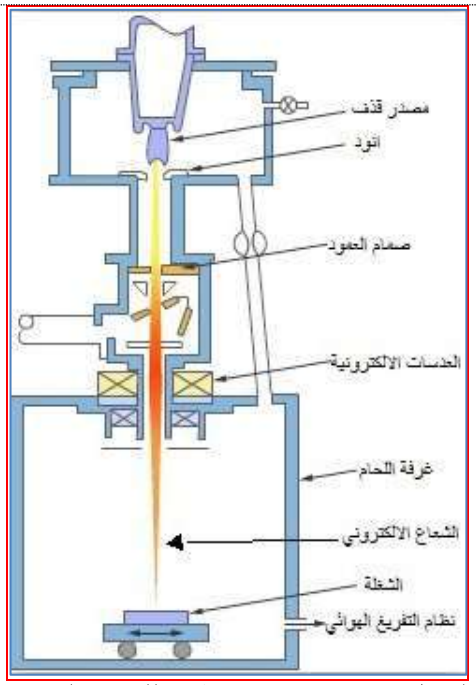
يُعد استعمال حزمة الإلكترون في الصناعة من الطرائق الحديثة نوعاً ما، علماً بأنه قد تم توليد حزمة الإلكترون منذ أكثر من 300 عام، وظهرت نظريات اختصت بطبيعة الموجة الكهرومغناطيسية للضوء وطبيعة الإلكترونات والتيار الكهربائي نتيجة الأبحاث الغزيرة. وكل هذه الدراسات ممزوجة بالتقنية الحديثة الآن، وقد أدت إلى تصميم أجهزة تنتج الحزمة الإلكترونية وتركزها بؤرياً وتضخمها. وظهرت الحاجة إلى اللحام بالحزمة الإلكترونية بعد الحرب العالمية الثانية حيث بدأ استعمال المعادن المكلفة مثل التيتانيوم والموليبدنيوم والتنكستن كمواد هندسية كما تم في الوقت نفسه تطوير أجهزة التفريغ الهوائي ذات الكفاءة العالية، وفي الوقت الحاضر يمكن لحام هذه المعادن بواسطة الحزمة الإلكترونية بالإضافة إلى الفولاذ المقاوم للصدأ والألمنيوم وكثير من المعادن المقاومة للحرارة.

3-3-1 الخطوات المتبعة في اللحام بالحزمة الإلكترونية

1. تهيئة وصلة اللحام، إذ تكون الوصلات عادة عبارة عن سطوح متناكبة مع مجال ضيق يتراوح ما بين mm (0.05 و 0.075)، ويمكن إجراء اللحام أيضاً على وصلات بشكل الحرف T ووصلات الحافة ووصلات متراكبة.
2. تنظيف الأجزاء المطلوب لحامها بالطرائق الميكانيكية والكيمياوية، ويجب إجراء التنظيف النهائي قبل اللحام بدقائق وعدم لمسها بعد التنظيف.
3. إزالة المغناطيسية، إذ إن المغناطيسية المتبقية في قطعة العمل والمثبتات تسبب حيود الأشعة الإلكترونية من موقع اللحام.
4. توضع قطعة العمل في حجرة اللحام وتضبط المسافات المطلوبة.
5. تفرغ الحجرة من الهواء، اذا كان اللحام يحتاج إلى حجرة مفرغة.
6. تسخين أولي للشغلة فالمواد المهيأة للحام والقابلة للتقوية تحتاج إلى هذا التسخين وخاصة الأجزاء السميكة. فالفولاذ العالي السبائكية وفولاذ العُدد بسمك اكبر من mm 9 يحتاجان إلى تسخين أولي لتفادي التشقق.
7. اختيار المتغيرات كالتيار والفولتية.
8. إجراء اللحام وذلك عن طريق جريان المعدن المنصهر من مقدمة الثقب إلى مؤخرته.

3-3-2 عملية اللحام بالحزمة الإلكترونية Electron Beam Welding Process

يمكن إجراء اللحام في حجرة مفرغة بدرجة عالية، أو مفرغة جزئياً، أو يتم اللحام خارج الحجرة بالهواء الجوي. ولكل طريقة فوائدها ومساوئها. فاللحام في حجرة مفرغة يساعد على إزالة الغازات من المعدن المنصهر منتجاً بذلك لحاماً عالي الجودة. وتكون الخسارة في طاقة الأشعة الإلكترونية منخفضة في الفراغ ولذلك يمكن استعمال مسدسات حزمة الإلكترون Electro Beam Guns بطاقة قليلة، وكذلك فإن اللحام بالحجرة المفرغة يحدد حجم وصلات اللحام، كما إن بخار المعدن يعيق مسار الإلكترونات ويمتص قسماً من طاقتها علاوة على الوقت اللازم لتفريغ الحجرة. أمـــا اللحام خارج الحجرة المفرغة (في الهواء الجوي) فلا يحتاج إلى ذلك، لذا يمكن لحام وصلات كبيرة، و لا يؤثر بخار المعدن سلبياً في مكونات مسدس الحزمة والأجزاء الأخرى، وتكون عملية تحميل الوصلات على منصة اللحام سريعة إلا إن اللحام في الهواء يحتاج إلى غاز واقٍ لحماية المعدن المنصهر من التلوث. ويكون اللحام الناتج عريضاً نسبياً، كما إن الهواء الجوي يعرقل مسار الإلكترونات ويبعثرها بالإضافة إلى ذلك هناك خطورة للأشعة السينية المتكونة من ارتطام الإلكترونات بقطعة العمل. ويوضّح الشكل (3-18) جهاز اللحام بالأشعة الإلكترونية في حجرة مفرغة من الهواء. ويتكون من مسدس حزمة الإلكترونات الذي يشمل على سلك التنكستن Tungsten Filament الذي يسخن إلى درجة (2000°C) ويبعث الإلكترونات، وقطب الكاثود السالب والانود الموجب يركزان الإلكترونات ويعجلانها بسبب الفرق الكبير في الجهد بينهما، والعدسات المغناطيسية التي توجه الإلكترونات إلى قطعة العمل، ويبلغ قطر الحزمة الإلكترونية عند اصطدامها ما بين (0.25- 6.4 mm)، ونظام تفريغ الهواء، وهو ضروري للحصول على جو مفرغ في منظومة تكوين وتعجيل الإلكترونات وكذلك في حجرة اللحام بالإضافة إلى ما ذكر فهناك منظومة تثبيت وصلات اللحام وتحريكها ومنظومة التحكم بالجهاز، الشكل (3-19) يبيّن جهاز اللحام بالحزمة الإلكترونية).



الشكل 3-18 يوضّح نظام اللحام بالحزمة الإلكترونية في حجرة مفرغة من الهواء

الشكل 3-19 جهاز اللحام بالحزمة الإلكترونية

3-3-3 متغيرات عملية اللحام بالحزمة الإلكترونية

1. فولتية التعجيل.
2. تيار الحزمة.
3. سرعة اللحام
4. تيار التوجيه.
5. المسافة بين مسدس حزمة الإلكترونات وقطعة العمل.

3-3-4 مزايا اللحام بالحزمة الإلكترونية

Advantages of Electronic Beam Welding

1. نوعية اللحام الناتجة جيدة وخالية من المسامية ويمكن إجراء اللحام بسرعة عالية.
2. تكون المنطقة المتأثرة بالحرارة والتشوه الناتج صغيرة جداً.
3. النفاذية العالية، والنسبة بين عمق وعرض اللحام قد تصل إلى 25 ضعفاً بتمريرة واحدة.
4. يمكن لحام معادن فعالة يصعب لحامها بالطرائق الأخرى، مثل التيتانيوم والزركونيوم، وكذلك البريليوم الذي يتبخر عند لحامه بالطرائق الأخرى بدلاً من انصهاره.
5. يمكن لحام صفائح رقيقة إلى أجزاء سميكة، وكذلك يمكن لحام أجزاء رقيقة مع بعضها الآخر تناكبياً وبسمك يصل إلى 0.025 mm.

5-3-3 محددات طريقة اللحام بالحزمة الإلكترونية

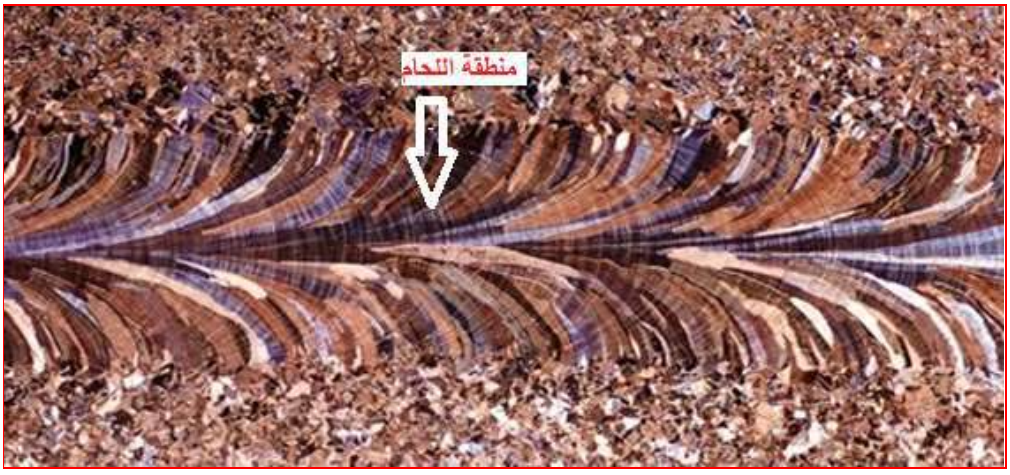
Limitations of Electronic Beam Welding Method

إن محددات طريقة اللحام بالحزمة الإلكترونية هي الكلفة الأولية العالية والحجم المحدود للشغلة عند استعمال الجهاز بحجرة مفرغة، كذلك خطورة التعرض إلى مضار الأشعة السينية ويحتاج الجهاز خبرة فنية عند الاستعمال.

6-3-3 استعمالات اللحام بالحزمة الإلكترونية Electron Beam Welding Uses

تتركز استعمالات اللحام بالحزمة الإلكترونية بالآتي:

1. لحام المعادن الفعالة والحرارية في حقول الطاقة الذرية والصواريخ.
2. لحام الأجزاء المختلفة وفي صناعات كثيرة والتي تتطلب تشوهات محدودة.
3. لحام المعادن والسبائك المتشابهة وغير المتشابهة، مثلاً الفولاذ المقاوم للصدأ مع سبيكة الإنكونيل، والانفار مع سبائك المنغنيز، والشكل (3-20) يوضّح اللحام بالحزمة الإلكترونية للنحاس.
4. طريقة ملائمة للإنتاج الكبير.



الشكل 3-20 اللحام بالحزمة الإلكترونية للنحاس

4-3 لحام اللدائن Polymers Welding

تنقسم اللدائن إلى لدائن تتلدن بالحرارة Thermoplastic ولدائن تتصلب بالحرارة Thermosetting وتلحم اللدائن كما تلحم المعادن. والطريقة الشائعة للحام اللدائن التي تتلدن بالحرارة مشابهة لتلك التي تستعمل في لحام المعادن. وتتباين مقاومة الشد لمنطقة اللحام الناتجة حسب نوع المادة اللدنة. واللدائن التي تحتوي مركبات تميل للتصاعد أو التسامي أثناء اللحام لتنتج مناطق لحام أضعف من غيرها من اللدائن، بسبب الفقاعات التي تتكون والتي تقلل المقاومة وتشوه مظهر منطقة اللحام. ليس بالإمكان لحام اللدائن غير المستقرة مثل النيتروسليلوز وينطبق هذا على اللدائن التي تتلدن بالحرارة والتي تتعرض إلى الانحلال الحراري في درجات حرارة اللحام، والشكل (3-21) يوضّح لحام اللدائن.

الشكل 3-21 لحام اللدائن

يوجد ثلاثة راتنجات فلوروكربونية شائعة الاستعمال، الأول البروبلين– الأثلين الفلوري (FEP) والثاني بوليمر الأثيلين رباعي الفلور (TFE)، والثالث: بوليمر الأثلين الكلوري ثلاثي الفلور (CFE). ويمكن لحام النوع الأول (FEP) بالطرائق الاعتيادية. أما النوعين الثاني والثالث فلا يمكن لحامهما بالحرارة فقط لانهما يزدادان ليونة بدرجة كبيرة تحت درجات حرارة التحليل ويمكن لحامهما بمساعدة الضغط. ويتم لحام العديد من أنابيب اللدائن ومنها بيوتيرات الأسيتات السيليلوزية (Cellulose Acetate Butyrate) أو (CAB)، البولي أميد، البولي أثيلين، البولي فينيل كلورايد، والستايرين.

3-4-1 أساليب لحام اللدائن Welding Plastic Methods

3-4-1-1 لحام الاحتكاك Friction Welding

تستعمل هذه الطريقة للحام المواد اللدنة. حيث تدور القطعتان المتلامستان المراد لحامها في اتجاهين متعاكسين. ونتيجة هذا الاحتكاك تتولد الحرارة. ثم يسلط ضغط حتى يتم اللحام، وبعد عملية التبريد تزال القطعة الملحومة من الجهاز. والضغط والحرارة يكفيان لصهر الأسطح المتلامسة. وتمتاز هذه الطريقة بسرعة اللحام العالية، إذ يمكن أن تتم العملية في حوالي (30-40 sec) وهي طريقة اقتصادية ومتميزة للحام اللدائن. ومن عيوب هذه الطريقة محدودية الأشكال التي يمكن لحامها بها، وفي الغالب تستعمل الأجزاء الأسطوانية الشكل في اللحام.

3-4-1-2 اللحام بالعُدة الساخنة Heated Tool Welding

يستعمل في هذا النوع من اللحام مصدر حراري مثل شريط كهربائي مسخن ولوح مسخن أو حلقة مسخنة أو قضيب مسخن أو كاوية ساخنة لرفع درجة حرارة اللدائن إلى درجة الانصهار وتلامس العُدة الساخنة. القطعة المراد لحامها تبعد عنها بمقدار (32 mm) ولا تستغرق العملية زمناً طويلاً فهي تتم في مدى (5-15 sec) ويجوز استعمال ضغط خفيف في هذه العملية، وكما موضّح في الشكل (3-22). تستعمل هذه الطريقة بنجاح للحام كلوريد الفينيلدين والبولي أثلين الخطى، واكريلات المثيل وأنواع أخرى كثيرة من اللدائن التي تلدن بالحرارة وتصنع العُدة الساخنة عادة من الفولاذ المغطى بالنيكل أو من الألمنيوم.

الشكل 3-22 آلة اللحام بالعُدة الساخنة

3-1-4-3 اللحام بالغاز الساخن Heated Gas Welding

تستعمل هذه الطريقة لمعظم اللدائن التي تتلدن بالحرارة بنفس الأسلوب، إذ تنظف القطع المراد لحامها، وتشطف وتستعمل مادة حشو لحام من مادة اللحام نفسها. وتسخن منطقة اللحام وقضيب اللحام في اللحظة نفسها باستعمال الغاز الساخن الذي يخرج من فوهة مسدس اللحام. تشبه هذه الطريقة طريقة الأوكسي- استلين للحام مع وجود عدد من الفروقات مثل الآلة المستعملة، إذ يتم تغذية مادة حشو اللحام تحت ضغط خفيف، والشكل (3-23) يوضّح آلة اللحام بالغاز الساخن، وتتراوح درجة حرارة اللحام المستعملة بين (280- 390°C)، وتستعمل هذه الطريقة للحام البولي أثيلين، البولي فينيل كلوريد، الأكريليك، الأثلين الكلوري ثلاثي الفلور.

5-3 القطع بالليزر

لأشعة الليزر أهمية كبيرة في المجالات الصناعية والطبية والبيئية. والقطع بالليزر إحدى طرائق القطع اللاتقليدية، إذ يتم تسليط حزمة من أشعة الليزر بوساطة عدسات ضوئية وتركيزها على منطقة صغيرة جداً من على سطح القالب مسببة رفع درجة الحرارة بدرجة عالية جداً ومحدثة تبخر أو انصهار منطقة القطع وبهذا يمكن قطع أي معدن كان وكذلك المواد الأخرى مثل السيراميك وغيرها، ولكن تكاليف هذه العملية تكون مرتفعة، والشكل (3- 24) يمثل عملية القطع بأشعة الليزر.

الشكل 3-23 اللحام بالغاز الساخن

الشكل 3- 24 يمثل عملية القطع بأشعة الليزر

أسئلة الفصل الثالث

س1) عرّف عملية اللحام بأشعة الليزر.
س2) عرّف عملية اللحام بالحزمة الإلكترونية.

س3) عدد أهم أنواع الليزر، وما هو جهاز الليزر؟

س4) ما هي النقاط الواجب الالتزام بها لتحقيق لحام ليزر جيد؟

س5) اذكر فوائد ومحددات طريقة اللحام بالليزر.

س6) املأ الفراغات الآتية بما يلائمها:

أ- تُعد عملية اللحام أقدم عمليات..... و..... التي عرفها التاريخ القديم.

ب- عملية اللحام بأشعة الليزر هي عملية تركيز ..... لضوء.....

ج- تتكون الذرة من.....و..... و.....

د- من أهم أنواع الليزر الصلب، هو:.....و.....

هـ- العيب الكبير في لحمات الخط الليزرية هي سرعات لحام .....

و- يُعد استعمال حزمة الإلكترون في الصناعة من الطرائق..... نسبياً.

ح- تنقسم اللدائن إلى قسمين، هما: ..... و.....

س7) اذكر الخطوات المتبعة في اللحام بالحزمة الإلكترونية، وكيف تتم عملية اللحام بها؟

س8) ما هي المتغيرات التي تسيطر على عملية اللحام بالحزمة الإلكترونية؟

س9) ما هي مزايا ومحددات طريقة اللحام بالحزمة الإلكترونية؟ اذكر استعمالات هذه الطريقة.

س10) عرّف عملية لحام اللدائن، اذكر أساليب اللحام المستعملة.

س11) ضع علامة (**صح**) أو (**خطأ**) أمام العبارات الآتية، ثم **صحح الخطأ** إن وجد:

أ- تتميز طرائق اللحام اللاتقليدية بإعطائها دقة ونعومة سطحية جيدة وظروف تشغيل اقتصادية.

ب- مكونات ليزر الياقوت عبارة عن مصدر ضوئي وساق من الياقوت.

ت- يستعمل الليزر في لحام الوصلات الأخرى كاللحام التناكبي ووصلات الزاوية حرف T.

ث- يُعد استعمال حزمة الإلكترون في الصناعة من الطرائق القديمة.

ج- يستعمل لحام الاحتكاك للحام المواد اللدنة.

الفصل الرابع

ميتالورجيا اللحام
Welding Metallurgy

الأهداف

الهدف العام

في هذا الفصل سيتمكن الطالب من معرفة المبادئ الأساس لميتالورجيا اللحام وتأثر البنية المجهرية للمعادن بعمليات اللحام وبالتالي التأثير على خواص الملحومات من خلال تغير البنية المجهرية لمنطقة اللحام والمنطقة المتأثرة باللحام، وأهم المعالجات الحرارية لتحسين خواص الملحومات، وكذلك سيتمكن الطالب من إيجاد العلاقة ما بين قابلية اللحام للمعادن وطرائق اللحام المختلفة.

الأهداف الخاصة: بعد الانتهاء من دراسة الفصل الرابع سيتمكن الطالب من فهم الآتي:

1. البنية المجهرية للمعادن.
2. مخطط الأطوار المتوازن.
3. الانجماد وتطور البنية المجهرية أثناء التبريد البطيء.
4. البنية المجهرية أثناء التبريد السريع.
5. المبادئ الأساسية لميتالورجيا اللحام.
6. البنية المجهرية وخواص الملحومات.
7. العمليات الميتالورجية، وأنواع مناطق اللحام، منطقة الانصهار، والمنطقة المتأثرة باللحام، ومنطقة المعدن الأساس.
8. البنية المجهرية لملحومات الفولاذ الكربوني والسبائكي.
9. ميتالورجيا اللحام لبعض أنواع المعادن غير الحديدية.
10. المعالجات الحرارية لتحسين خواص الملحومات.
11. تعريف مفهوم قابلية اللحام للمعادن وعلاقته مع طرائق اللحام المختلفة.

Welding Metallurgy ميتالورجيا اللحام

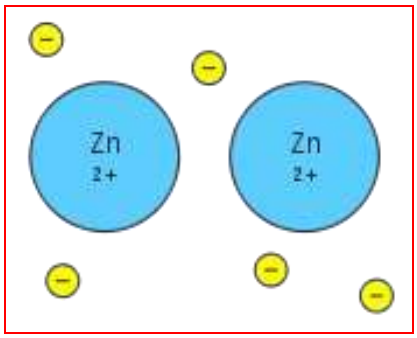
1-4 مقدمة Introduction

تهتم ميتالورجيا اللحام بدراسة تأثير اللحام على المعادن من حيث الخواص الفيزيائية والميكانيكية والتركيب الكيميائي. ومن أساسيات ميتالورجيا اللحام البنية المجهرية لوصلة اللحام والتي تؤثر في الخواص الميكانيكية، وتغيرات اللحام مثل الدورة الحرارية، والتفاعلات الكيميائية في المنطقة المنصهرة، والعناصر السبائكية، والتركيب الكيميائي لمساعدات الصهر، وقابلية اللحام Weldability للمعادن والتي لها علاقة مباشرة بطريقة وتقنية عملية اللحام. وكل هذه العوامل تؤثر بشكلٍ أساس في البنية المجهرية للملحومات Weldments، وبالأخص معدن اللحام Weld Metal والتي تُعرف بالمنطقة المنصهرة Fusion Zone (FZ) والمنطقة المنصهرة جزئياً أو ما تسمى في بعض المصادر العلمية بحدود المنطقة المنصهرة Partially-Melted Zone (PMZ)، والمنطقة المتأثرة بالحرارة Heat Affected Zone (HAZ)، وغالباً ما تحدث تفاعلات معدنية في عمليات اللحام تحت ظروف عدم التوازن بسبب معدلات التسخين والتبريد السريعين مع العلم أن سرعة التبريد للملحومة هو أقل مما هو عليه في التسخين ويعتمد على عوامل عديدة سيتم شرحها في خلال هذا الفصل.

وقد سبق أن تعلم الطالب في المراحل الدراسية السابقة ميتالورجيا المعادن بصورة عامة من خلال دراسته لأنواع البنية المجهرية الشائعة للمعادن، وكذلك الأطوار المتكونة من الأنظمة السبائكية، وكيفية تحسين الخواص الميكانيكية والخواص الأخرى من خلال إنتاج السبائك والطرائق الأخرى لتقوية المعادن والسبائك مثل التشكيل على البارد والأصلاد بالترسيب، فضلاً عن المعالجات الحرارية المتنوعة. وفي هذا الفصل سيتم مراجعة هذه الموضوعات وتقديمها وربطها مع موضوع ميتالورجيا اللحام ليتمكن الطالب من فهم عملية اللحام وتأثيرها على الخواص المعدنية المتنوعة وكيفية اختيار الطريقة والتقنية المثلى لعملية اللحام المطلوبة من خلال معرفته لنوع المعدن وخصائصه وشكل الربط المعدني ليحصل على الملحومة المطلوبة بالخواص المرغوبة، لتلبي ظروف الخدمة مستقبلاً وزيادة عمرها التشغيلي، من خلال تحملها للجهود المسلطة عليها وتحملها لعوامل التآكل. وكذلك من خلال فهم ميتالورجيا اللحامم بالامكان تحديد العيوب المحتملة المصاحبة لكل من: نوع المعدن أو السبيكة، وطرائق اللحام المختلفة وتقنياتها المتنوعة، وطريقة ربط الأجزاء (نوع المفصل)، واتجاه اللحام.

2-4 البنية المجهرية للمعادن Microstructure of Metals

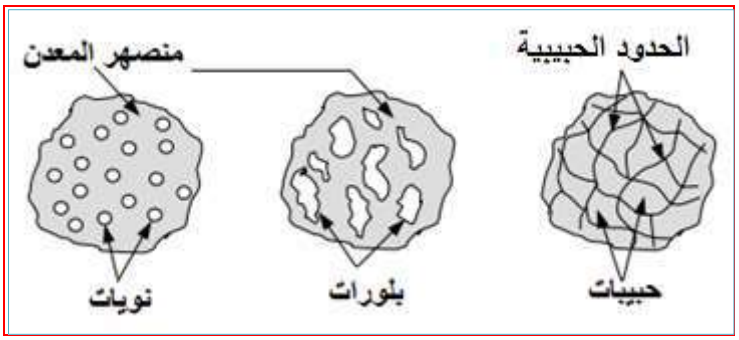
ترتبط ذرات جميع المواد المعروفة بروابط معينة وهي الآصرة الأيونية والتساهمية و**الرابطة المعدنية** وجميعها روابط قوية وتُعد الروابط الأولية للمواد. وهنالك أيضاً روابط ثانوية أخرى أقل قوة من الروابط الأولية وهي الرابطة الهيدروجينية وقوى فان دير فالس Van der Waals Bond، وغيرها. تتكون الرابطة المعدنية (موضوع البحث في هذا الفصل) بين ذرتين معدنيتين أو أكثر، وهي رابطة إلكترونية يكّونها زوج إلكتروني مشترك غير ثابت، ويتكون آنياً بين ذرتين معدنيتين ولكن سرعان ما يبتعد ليكّون كلٍ منهما زوجاً إلكترونياً مشتركاً مع إلكترون آخر من ذرة مجاورة وتتكون الرابطة بمشاركة جميع الإلكترونات الموجودة في المدار الخارجي، والتي تخرج من مواقعها وتكّون ما يسمى بالسحابة الإلكترونية Electronic Cloud وتكون الإلكترونات مشتركة ما بين جميع الذرات المرتبطة والتي تصبح أيونات موجبة الشحنة، والشكل (4-1) يوضّح ترابط ذرتين من معدن الخارصين Zinc. وتتميز الرابطة المعدنية بقوتها التي تجعل المعادن ذات جساءة ومقاومة عاليتين ودرجات انصهار مرتفعة، فضلاً عن الموصلية الجيدة للكهرباء والحرارة.



شكل 4-1 الترابط المعدني لذرتي الخارصين

عند تسخين المادة الصلبة (المعادن) تزداد الحركة الاهتزازية للجسيمات فتزداد سرعتها المتوسطة، وينعكس ذلك في ارتفاع درجة حرارة المادة الصلبة والتي تؤثر في حجم المادة، وإذا استمر التسخين إلى حين وصول المادة الصلبة لنقطة معينة تسمى درجة حرارة الانصهار Melting Temperature، فينصهر المعدن ويتحول طوره من الحالة الصلبة إلى طور الحالة السائلة. والعكس صحيح أيضا، أي بتبريد منصهر المعدن ستقل الحركة الاهتزازية للجسيمات وتبدأ الذرات بأخذ مواقع لها ذات طاقة أقل بضمن البنية المعدنية. وهذا ما يفسر آلية انجماد المعادن. وبصورةٍ عامة، انجماد المعادن النقية يتضمن، الآتي: 1- **التنوية**: (تكوين النويات) المستقرة في منصهر المعدن، 2- **النمو**: إذ تنمو بعدها هذه النويات لتكون الحبيبات في منصهر المعدن، ويستمر نمو الحبيبات لحين انجماد منصهر المعدن.

إن ما يحدد حجم وشكل الحبيبات المتكّونة بعد الانجماد هو عدد النويات المتكّونة في منصهر المعدن ومعدل التبريد ونوع المعدن. لاحظ الشكل (4-2) الذي يوضّح آلية انجماد المعادن النقية.



شكل 4-2 آلية انجماد المعدن النقي

وتتميز المعادن والسبائك المعدنية في الحالة الصلبة مهما كانت طريقة استخلاصها أو تصنيعها بأن لها بناءً بلورياً واضح المعالم. وبما أن ذرات الأجسام البلورية عامة (وذرات المعادن على وجه الخصوص) توجد في مستويات وأوضاع فراغية مضبوطة تماماً، لذا فهذه الذرات تكّون فيما بينها ما يعرف بالشبكة البلورية الفراغية (الشبكة البلورية). وتعرف الشبكة البلورية على أنها مجموعة خطوط خيالية فراغية بترتيبات ثلاثية الأبعاد متكررة ومتماثلة وتتراص ذرات المعدن على عقد تلك الشبكة. ويطلق على أصغر ترتيب للشبكة البلورية **بوحدة الخلية Unit Cell** والتي تمثل نموذج التبلور. وهنالك 14 نوع محتمل التشكيل للشبكات البلورية، ولكن أغلب المواد المعدنية شائعة الاستعمال تنتظم بثلاثة أشكال هندسية أساسية وهي كالآتي:

1- الشبكة المكعبة متمركزة الجسم Body Center Cubic (BCC)

وهي أكثر أنواع الشبكات البلورية انتشاراً في المواد المعدنية، ومن أمثلة هـــذه المعادن: الليثيوم Li، الحديد Fe، الفناديوم V، الكروم Cr، الموليبدنيوم Mo، التنكستنW، وغيرها من المعادن. والشبكة عبارة عن مكعب متساوي الأضلاع، وتختلف متغيرات الشبكة (طول ضلع المكعب) بحسب نوع المعدن، وتحتاج البلورة الواحدة إلى **9 ذرات** لتشكيلها، ذرة واحدة في كل ركن من أركان المكعب وذرة واحدة في وسط المكعب، و تحتوي وحدة الخلية على **ذرتين** فقط، كما مبين في الشكل (3-4).

ويتم حساب عدد الذرات المطلوبة المساهمة بوحدة خلية واحدة (N_T) من المعادلة الآتية:

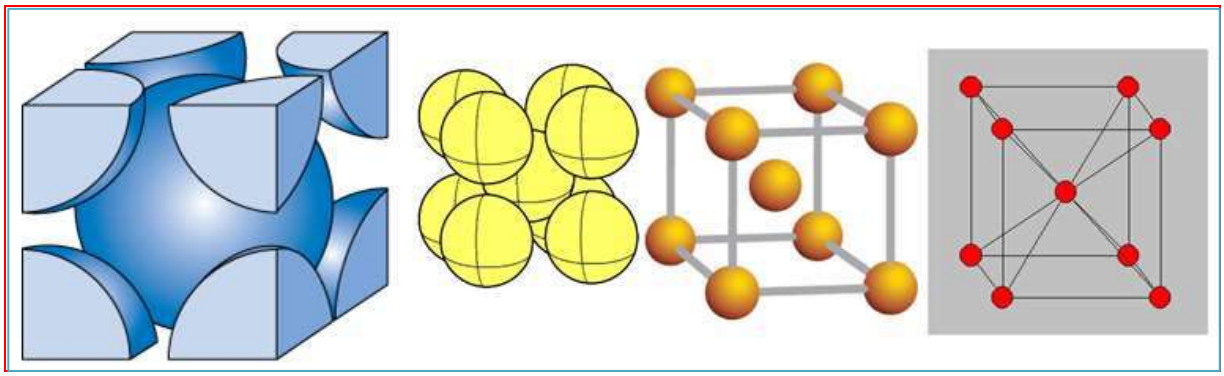
عدد الذرات عند زاوية المكعب Nc

عدد الذرات عند زاوية المكعب Ni

عدد الذرات عند زاوية المكعب Nf

$$N_T = \frac{Nc}{8} + Ni + \frac{Nf}{2}$$

يساوي معامل الرص الذري Atomic Packing Factor (APF) لهذا النوع من الشبكات **(0.68)** والذي يمثل الكثافة الذرية للشبكة البلورية، وسيتعلم الطالب في المراحل الدراسية القادمة كيفية حساب هذا المعامل الذي يمكن من خلاله حساب كثافة المعدن وكذلك يعطي مؤشراً على مطيلية المعدن. تتصف معادن هذه الشبكة بالجساءة والمقاومة العاليتين والمطيلية الواطئة نوعاً ما.



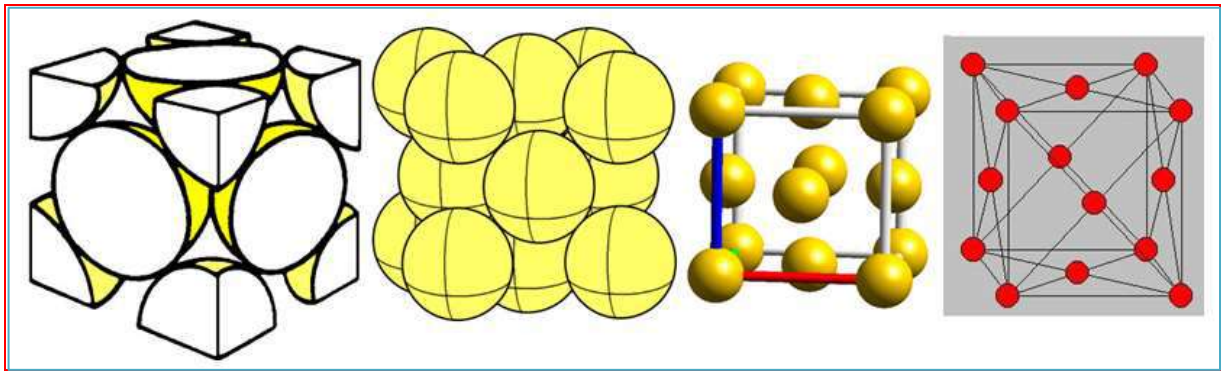
الشكل 3-4 الشبكة البلورية المكعبة متمركزة الجسم

2- الشبكة المكعبة متمركزة الوجه Face Center Cubic (FCC)

هذه الشبكة عبارة عن مكعب متساوي الأضلاع، وتحتاج البلورة الواحدة إلى **14** ذرة لتشكيلها، ذرة واحدة في كل ركن من أركان المكعب وذرة واحدة في وسط كل وجه من الأوجه الستة من المكعب، في حين أن وحدة الخلية تحتوي على **4** ذرات فقط، كما هو مبين في الشكل (4-4). إذ يتم حساب عدد الذرات المطلوبة المساهمة بوحدة خلية واحدة بالمعادلة الآتية:

$$N_T = \frac{Nc}{8} + \frac{Nf}{2} + Ni \qquad (4\text{-}2)$$

و يساوي معامل الرص الذري لهذا النوع من الشبكات (0.74)، وتتصف معادن هذه الشبكة بالجساءة والمقاومة العاليتين نسبياً والمطيلية الجيدة، المعادن التي تنتظم بهذا النوع من الشبكات هي الألمُنيوم Al، والنحاس Cu، والنيكل Ni، والرصاص Pb، والفضة Ag، والذهب Au، والبلاتين Pt، وغيرها.



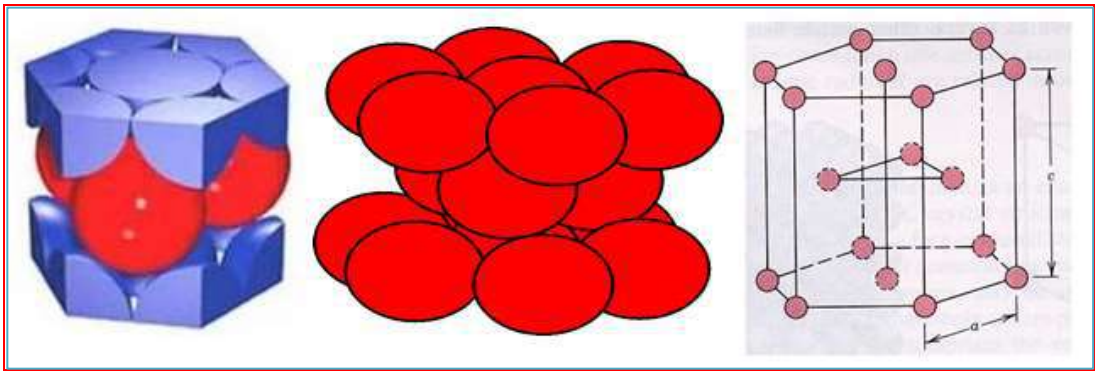
الشكل 4-4 الشبكة البلورية المكعبة متمركزة الأوجه

3- الشبكة السداسية المتراصة المغلقة Hexagonal Close Packed (HCP)

خلية الشبكة السداسية المتراصة عبارة عن مستويين سداسيي الشكل علوي وسفلي، وتقع ذرة في كل ركن في الشكل السداسي وذرة في وسطه، بالإضافة إلى وجود 3 ذرات بين المستويين العلوي والسفلي، لذا يكون مجموع الذرات التي تشكل هذه الشبكة هي **17** ذرة، في حين أن وحدة الخلية تحتوي على **6** ذرات فقط، كما هو موضّح في الشكل (4-5)، ويتم حساب عدد الذرات المطلوبة المساهمة بوحدة خلية واحدة بالمعادلة الآتية:

$$N_T = \frac{Nc}{6} + \frac{Nf}{2} + Ni \qquad (4\text{-}3)$$

إن معامل الرص الذري لهذا النوع من الشبكات مشابه للنوع السابق ويساوي (0.74)، وتتصف معادن هذه الشبكة بانها مواد قصفة Brittle Materials. المعادن التي تنتظم بهذا النوع من الشبكات هي المغنسيوم Mg، الخارصين Zn، كاديميوم Cd، بيريليوم Be، الكوبلت Co، وغيرها.



شكل 4-5 الشبكة السداسية المتراصة المغلقة

3-4 مخططات الأطوار المتوازنة Equilibrium Phase Diagrams

تتوزع ذرات المادة من جديد عند تغير طورها وتحولها من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة، والتوزيع إما أن يكون عشوائياً وتسمى هذه الحالة عندئذٍ بالتجمد غير المتبلور Amorphous كما في المطاط وغيره، أو أن يكون توزيع الذرات هندسياً منتظماً بأبعاد ثابتة وهي الحالة البلورية Crystalline كما في المعادن التي مرَ شرحها في الفقرة السابقة. وتقع كل ذرة في مكان محدد لها وتتحرك بحركة اهتزازية، الأمر الذي يفسر الكثير من الظواهر الفيزيائية للمعدن كالانتشار Diffusion وانتقال الذرات وانصهار المعدن.

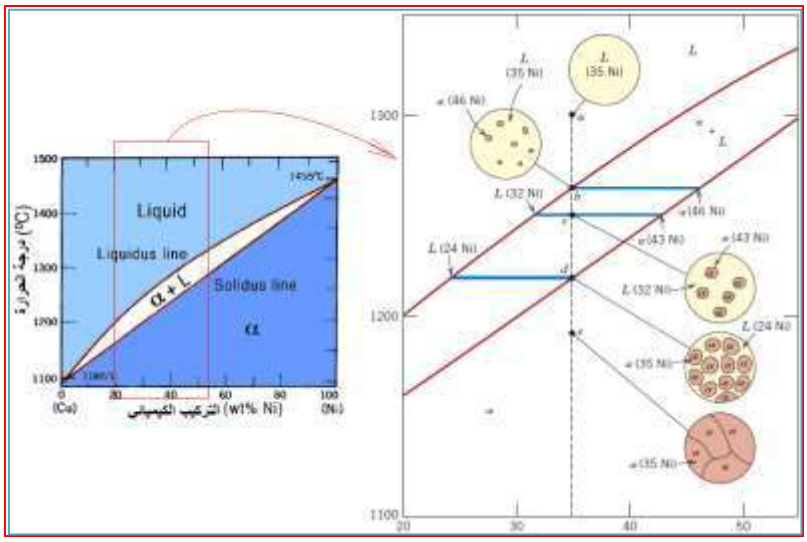
إن لشكل الحبيبات تأثيراً كبيراً على خواص المعدن الميكانيكية والفيزيائية، ويمكن للمعادن الانتقال من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة، أي التبلور أو بالعكس (الانصهار تبعاً لتغير درجات الحرارة)، وتدعى هذه الظاهرة بالتحول الطوري Phase Transformation، فضلاً عن ذلك فإن تغير درجات الحرارة في الحالة الصلبة يمكن أن يحدث تحولات في بنية المعدن وفي شبكته البلورية وتركيبه الكيمياوي ويؤدي ذلك إلى تغير في خواصه الميكانيكية والفيزيائية، وتدعى هذه الظاهرة بالتحولات التآصلية Allotropic Transformation، وإن مجمل التحولات التآصلية قابلة للانعكاس. فمثلاً الفولاذ في درجات الحرارة المرتفعة يكون من طور الأوستنايت $(\boldsymbol{\gamma - Fe})$ وعند انخفاض درجة الحرارة عن درجة تغير الطور (بحسب نسبة الكربون) يتغير طوره إلى طور الفيرايت $(\boldsymbol{\alpha - Fe})$ والعكس يحدث عند تسخينه. وتتم في درجات حرارة ثابتة (درجة حرارة واحدة) للمعادن النقية، وبضمن مدى من درجات حرارة للسبائك المعدنية. ولهذه الظاهرة أهمية كبيرة في الحياة العملية ومنها عمليات اللحام، فضلاً عن التحكم بالخواص المعدنية، نادراً ما تستعمل المعادن النقيةً والشائع أن تستعمل كسبائك معدنية تتألف من معدنين أو أكثر، فتكتسب بذلك خواصاً جديدة أفضل من خواص كل معدن من المعادن التي تتكون منها، فضلاً عن تخفيض تكاليف الإنتاج بخلط المعادن الثمينة بالأرخص ثمناً.

إن أكثر طرائق خلط المعادن وتشكيل السبائك المعدنية هي صهرها ومزجها في الحالة السائلة، ثم تبريدها لتجمد. ويلاحظ أن لدرجات الحرارة ونسبة العناصر المكونة للسبيكة دوراً مهماً بمنح هذه السبائك خواصها. ومن هنا اقتضت الضرورة لرسم مخططات خاصة تسمى مخططات الأطوار المتوازنة.إذ تساعد هذه المخططات في 1- معرفة التأثيرات الحرارية على السبائك 2- وتحديد ظهور الأطوار الجديدة، 3- كما يمكن من خلالها معرفة نسب الأطوار وتحديد تركيزها في كل نقطة، 4- كذلك معرفة التحولات والتفاعلات التي تحصل عند كل درجة حرارة معينة،5- فضلاً عن إمكانية تقدير نسب العناصر الداخلة في تركيب السبيكة بالدراسة المجهرية من دون الحاجة إلى تحليلها كيميائياً.

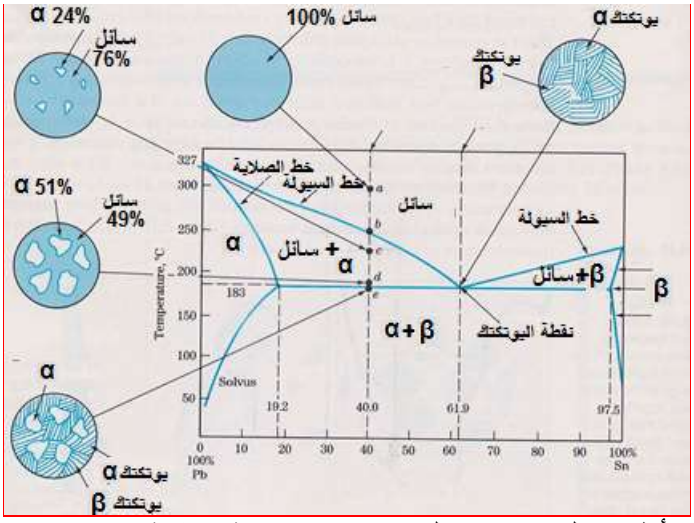
تتناول الدراسات السبائك المعدنية المكونة من معدنين وأحياناً من ثلاثة معادن. فعند خلط معدنين فإنهما غالباً ما يكونان محلولاً متجانساً (قابلان للذوبان معاً ويمتزجان جيداً) في حالة الانصهار، غير أنه قد تصادف عدة احتمالات بعد تجمدهما، بدءاً أن يبقى محلولاً متجانساً كما في حالتهما السائلة أي يمكن للمعدنين أن يذوب أحدهما بالآخر ذوباناً كاملاً في الحالة الصلبة وبكل نسب الخلط، وأن يتشكل منهما محلولاً جامداً Solid Solution، وتبين دراسة البنية المجهرية أنها حبيبات متجانسة كالمعدن النقي. ويمكن للمحاليل الجامدة أن تكون استباليه أو بينية (تداخلية). ويوضّح الشكل (4-6) النظام السبائكي بين النحاس Cu والنيكل Ni وهو خير مثال عن تكون المحلول الجامد من النوع الاستبدالي.

وكذلك يمكن أن يكون ذوبان المعدنين معاً في الحالة الجامدة محدوداً ويتشكل **المحلول الجامد جزئياً**، بالإضافة إلى التحول الايوتكتيكي Eutectic Transformation. ونقطة الايوتكتك Eutectic Point ميزة خاصة، فهي النقطة الوحيدة التي تقع على خط الانصهار وعلى خط الانجماد في الوقت نفسه، إذ يتحول الطور السائل في هذه النقطة مباشرة إلى طورين صلبين من دون أن يسبق هذا التحول انفصال حبيبات أي عنصر من عنصري المعدنين. والشكل (4-7) يوضّح النظام السبائكي للرصاص Pb والقصدير Sn.

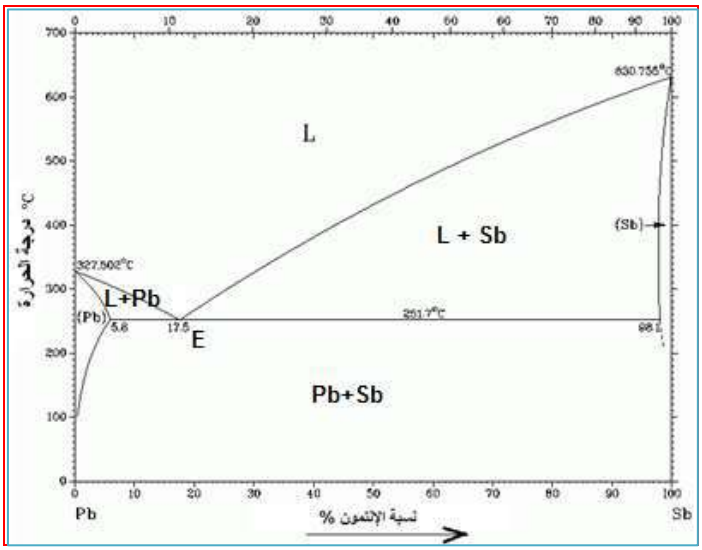
والحالة الثالثة هي عدم قابلية ذوبانهما وعدم تشكل أي مركب كيمياوي منهما ويكون الناتج **مزيجاً ميكانيكياً صرفاً** ومثال ذلك (الرصاص Pb والإنتمون Sb)، وكما هو موضّح في الشكل (4-8). ويمكن كذلك لمعدنين اثنين أن يتحدا معاً لتشكيل مركب معدني، والتي يكون أحد عناصرها معدني والآخر غير معدني مثل السمنتايت Fe_3C. أو أن يتحدا معاً لتكوين مركب شبه معدني مثل Mg_2Pb ويتكون غالباً من معدنين، وتسمى المركبات المعدنية والشبه معدنية بالأطوار الوسطية لكون مركبها الكيميائي ما بين العنصرين النقيين. وتتكون هذه الأنواع من السبائك نتيجة محدودية الإذابة بين عناصر النظام السبائكي أي حينما تتجاوز إذابة عنصر التسبيك بالعنصر الأساس حد الإشباع، لاحظ الشكل (4-9).



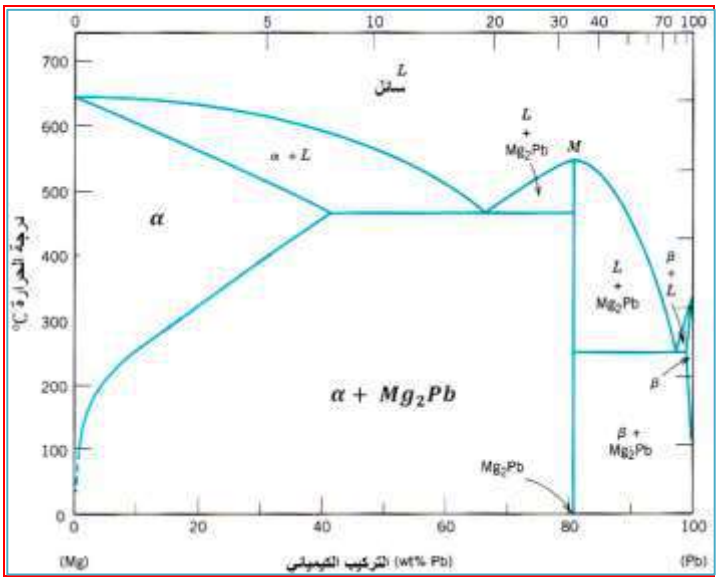
شكل 4-6 مخطط الأطوار المتوازن للنظام السبائكي النحاس-النيكل (محلول جامد لكل عناصر السبك)



شكل 4-7 مخطط الأطوار الرصاص- القصدير (محدودية الإذابة وتكوين محاليل جامدة α وβ)



شكل 4-8 مخطط الأطوار المتوازن للنظام السبائكي الرصاص- الإنتمون



شكل 4-9 مخطط الأطوار المتوازن لنظام السبائكي مغنسيوم – الرصاص

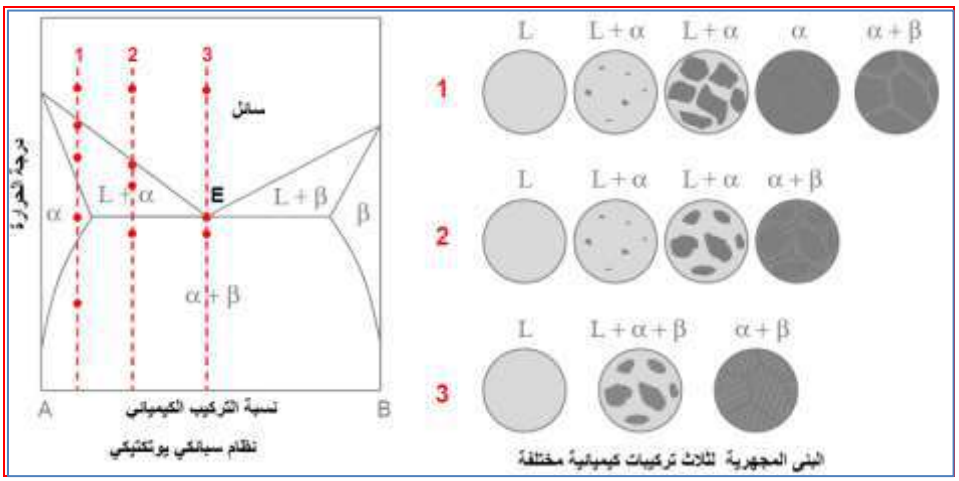
ويمكن في أحيانٍ أخرى للمركبات شبه المعدنية أو المعدنية المتشكلة أن تذيب أحد عناصر الخليط أو تذوب هي فيه ويتشكل محلولاً جامداً. وكذلك في بعض سبائك الأطوار الوسطية تختلط مع محلول جامد لتكوين بنية من طورين مثل (الخليط الميكانيكي) البيرلايت عبارة عن خليط من الفيرايت $(\boldsymbol{\alpha}-\boldsymbol{Fe})$ كمحلول جامد والسيمنتايت (Fe_3C) كطور وسطي.

مخططات الأطوار المتوازنة أدرجت للاطلاع فقط من دون مطالبة الطالب بحفظها

4-4 الانجماد وتطور البنية المجهرية أثناء التبريد البطيء

Solidification & Microstructure Evolution during Slow Cooling

دراسة وفهم مخططات الأطوار للسبائك المعدنية من الأمور المهمة في تخصص اللحام وتشكيل المعادن بسبب العلاقة الوطيدة بين البنية المجهرية والخواص الميكانيكية. وتطور البنية المجهرية لسبيكة معينة له علاقة بخصائص مخطط أطوار تلك السبيكة. وفضلاً عنه فإن مخطط الأطوار يعطي معلومات قيّمة عن الانصهار، الانجماد، التبلور، وغيرها. وتتكون العديد من البنى المجهرية وتتطور نتيجة **التحولات الطورية** (التغيرات التي تحدث حينما تتغير درجات الحرارة غالباً عند التبريد). وهذا قد ينتج عنه التحول من طور إلى آخر، أو التغير بالمظهر، أو اختفاء طور معين، والتي تكون بحالة توازن أو عدم توازن. وتتكون الأطوار المتوازنة فقط عند التبريد البطيء والبطيء جداً. والشكل (4-10) يوضّح تطور البنية المجهرية لنظام سبائكي يوتكتيكي نتيجة التبريد المتوازن البطيء، ويلاحظ للتركيب الكيميائي الأول عند التبريد من درجة الحرارة العالية (منطقة السائل)، فتبدأ تتكون نويات طور α في السائل حال هبوط (انخفاض) درجة الحرارة عن خط السيولة، ومن ثم تبدأ هذه النويات بالنمو وفي هذه المرحلة سيتواجد السائل والصلب من حبيبات α، وعند استمرار هبوط درجة الحرارة وعبورها خط التحول الطوري ستصبح البنية بالكامل عبارة عن حبيبات α، وعند هبوط درجة الحرارة ما بعد خط التحول الطوري التالي تصبح البنية المجهرية عبارة عن حبيبات α وحبيبات β. أما التركيب الكيميائي الثاني، فعند هبوط درجة الحرارة من منطقة السائل وعبورها خط السيولة إذ ستتكون نويات من طور α متواجدة مع طور السائل، وتبدأ تنمو هذه النويات لتكون حبيبات من طور α، وباستمرار هبوط درجة الحرارة وعبوره درجة حرارة تفاعل اليوتكتك ستتكون حبيبات من طوري α و β، فهو في هذه الحالة عبارة عن خليط ميكانيكي يوتكتيكي بين الطورين المذكورين. وفـــي التركيب الكيميائي الأخير (تركيب اليوتكتك)، عند هبوط درجة الحرارة من منطقة السائل لحين وصولها إلى درجة نقطة الايوتكتك ستتواجد ثلاثة أطوار وهي طور السائل وطوري α و β، وبهبوط درجة الحرارة عن نقطة الايوتكتك ستستقر البنية المجهرية على الخليط الميكانيكي اليوتكتيكي من طوري α و β فقط.



شكل 4-10 تطور البنى المجهرية لنظام خليط ميكانيكي يوتكتيكي

والمثال الذي تم ذكره أعلاه يمثل التغيرات الطورية بحالة التوازن أي عند التبريد البطيء. أما في حالة معدلات التبريد السريعة فإنه لن تتكون أطوار مستقرة كالتي تم تناولها في هذا المثال، بل ستتكون أحيانا أطوار غير مستقرة كالتي تتكون في أغلب عمليات اللحام الاعتيادية.

5-4 البنية المجهرية أثناء التبريد السريع

Microstructure during Fast Cooling

طور المارتنسايت وقد سمي بهذا الاسم نسبة إلى عالم المعادن الألماني أدولف مارتينس، وغالباً ما يشير إلى البنية الحبيبية لسبائك الفولاذ والتي هي في غاية الصلادة. ويشمل المواد المعدنية الصلبة التي تتكون على شكل شرائح أو لوحة إبرية الشكل، لاحظ الشكل (4-11). ويتكون المارتنسيت عن طريق التبريد السريع جداً (التبريد المفاجئ) من الأوستنايت($\boldsymbol{\gamma - Fe}$)، إذ لا يسمح التبريد السريع من درجات الحرارة العالية التي يتواجد فيها طور الأوستنايت (الذي هو عبارة عن محلول جامد من الحديد والكربون بحالة التوازن) لذرات الكربون بأن تنتشر خارج هذا المحلول لأن مقدار إذابة الحديد للكربون تنخفض عند انخفاض درجة الحرارة. علماً أن في حالة التبريد البطيء (المتوازن) من طور الأوستنايت يتكون طوري الفيرايت ($\boldsymbol{\alpha - Fe}$) الذي تكون فيه إذابة الحديد للكربون منخفضة جداً (أقل بكثير من طور الأوستنايت) والسمنتايت Fe_3C. وتبقى ذرات الكربون حبيسة داخل التركيب البلوري عند التبريد السريع وليس لديها الوقت الكافي لتنتشر خارجه لتكون حالة إذابة فوق الإشباع Super-Saturated مما يشوه شكل البلورة وتتحول إلى بلورة بقاعدة رباعية الزوايا BCT بدلاً من البلورة المكعبة، وكما هو معروف فإن المواد المعدنية تزداد صلادتها بشكل كبير عند تشوه حبيباتها.

ولا يظهر طور المارتنسايت في مخطط الأطوار المتوازن للحديد والكربون (الذي سيتم توضيحه في فقرة لاحقة من هذا الفصل) لأنه طور غير متوازن (غير مستقر)، لذا سيتفكك هذا الطور عند تسخينه بسرعة وعند التبريد المتوازن ستتكون الأطوار المتوازنة المعروفة للفولاذ. وفي هذا الصدد من المهم الإشارة إلى أن طور المارتنسايت لا يتكون بنسب الكربون القليلة جداً حتى وإن كان التبريد سريعاً جداً، بل يتكون حينما تكون نسب الكربون أعلى من (0.35%) وكما هو معروف.

شكل 4-11 البنية المجهرية لطور المارتنسايت من سبيكة الفولاذ

6-4 المبادئ الأساسية لميتالورجيا اللحام

The basic principles of welding metallurgy

يمر المعدن خلال عملية اللحام بدورة حرارية إذ يسخن المعدن بسرعة ويبرد بسرعة أيضاً ولكن بمعدل تبريد أقل نوعاً ما. وحينما تناقش هذه الدورة الحرارية يجب التفريق بين طرائق اللحام المختلفة أي بين اللحام الانصهاري ولحام الحالة الجامدة. إذ يتم في اللحام الانصهاري التسخين موضعياً لدرجات حرارة أعلى من نقطة الانصهار وبذلك تتكون بركة اللحام، فـــي حين ترتفــع درجات حرارة المناطق غير المنصهرة المجاورة لبركة اللحام لتصل إلـــى درجـــات حرارة عالية (أقل من درجة انصهار المعدن)، نسبة لقربها من بركة اللحام أو حدود منطقة الانصهار. وخلال مرحلة التبريد عند توقف تزويد الحرارة أو ابتعاد عملية اللحام عند تلك المنطقة ستنجمد المنطقة المنصهرة مجدداً مكونةً منطقة اللحام. أما في حالة اللحام بالحالة الجامدة فإن الدورة الحرارية ونتائجها ستكون أقل تعقيداً بسبب عدم وجود حالة الانصهار. ولكن في كلا الحالتين فإن الدورة الحرارية تؤثر بشكل كبير على البنية المجهرية وعلى خواص الملحومات. وبالأخص الارتفاع العالي لدرجات الحرارة ومعدل التبريد في الدورة الحرارية إذ سيكونان المؤثران الكبيران على خواص الملحومات.

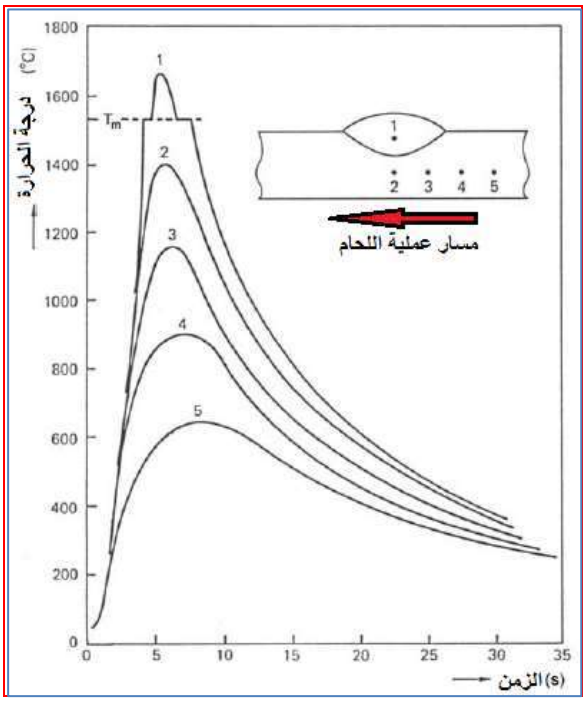
يوضّح الشكل (4-12) العلاقة بين درجات الحرارة والزمن لمناطق محددة من قطعة العمل مؤشراً عليه اتجاه سير عملية اللحام، ويلاحظ من الشكل أن توزيع درجات الحرارة للمناطق الملحومة يبدأ بالانخفاض بعلاقة غير خطية (ليس بمعدل ثابت) مع استمرار عملية اللحام. ولغرض الحصول على خواص معينة وجودة عالية للقطع الملحومة فمن الضروري السيطرة على عاملين مهمين: هما كثافة الطاقــة الحرارية المزودة لمنطقة اللحام Heat Input Density ومعــدل التبريــد Cooling Rate. إن المقصود بكثافة الطاقة الحرارية هو كمية الحرارة المزودة نسبة إلى المساحة المعرضة لحرارة التجهيز، وعليه فإن اللحام بطريقة الحزمة الإلكترونية هي الأعلى مقداراً في كثافة الطاقة الحرارية لكون المساحة المعرضة للحرارة هي أقل ما يمكن ولهذا يمكن بهذه الطريقة أن تنجز عملية لحام بمساحة ضيقة وعميقة جداً في آنٍ واحد.

أما الطرائق الأخرى ومنها اللحام بالبلازما، واللحام بالليزر، وطرائق اللحام بالقوس الكهربائي، واللحام الغازي، فتقل فيها كثافة الطاقة الحرارية. أما السيطرة على العامل الثاني وهو معدل التبريد فيتم بالآتي:

(1) تسخين قطعة العمل قبل البدء بعملية اللحام مما يؤدي إلى انخفاض في معدل التبريد.

(2) زيادة سرعة عملية اللحام إذ ستزيد من سرعة التبريد.

(3) اختيار طريقة لحام ذات حرارة داخلة محدودة مما يساعد في الحد من سرعة التبريد.



شكل 4-12 العلاقة بين درجة الحرارة والزمن لمناطق اللحام

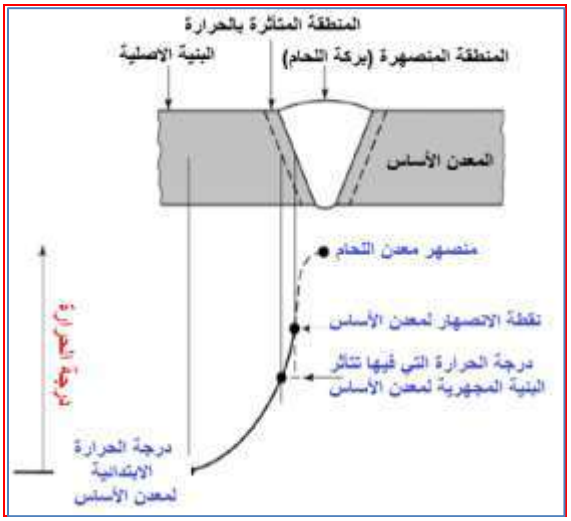
4-6-1 مناطق اللحام الانصهاري Regions of a Fusion Weld

تؤثر الحرارة العالية على قطعة العمل أثناء عملية اللحام الانصهاري مسببةً دورات حرارية شديدة على المادة تختلف من منطقةٍ إلى أخرى، وكما موضّح في الشكل (4-13)، مما يؤدي إلى ظهور ثلاثة مناطق متميزة في الملحومة، وهذه المناطق هي:

1-منطقة الانصهار والمعروفة أيضاً باسم معدن اللحام Fusion (Welding) Zone (FZ)

2-المنطقة المتأثرة بالحرارة Heat Affected Zone (HAZ)

3-المعدن الأساس وهي المنطقة غير المتأثرة بعملية اللحام Base Metal (BM)



شكل 4-13 علاقة درجات الحرارة مع مناطق اللحام

أولاً: منطقة الانصهار Fusion Zone (FZ)

على الرغم من التشابه الكبير بين عمليتي السباكة واللحام، إذ يرى المتخصصون إن عملية اللحام بانها عملية سباكة موضعية وتحدث فيها عملية الانصهار والانجماد للمواد المعدنية، فضلاً عن التشابه باحتمالية ظهور العيوب نفسها في كلا العمليتين، أي أن معظم العيوب المحتملة المصاحبة لعملية السباكة قد تصاحب عملية اللحام. وعلى الرغم من هذا فإن عملية اللحام الانصهاري هي الأكثر تعقيداً من عملية السباكة بسبب التأثيرات الفيزيائية بين المصدر الحراري والمعدن الأساس. لذا فإن هنالك اختلافات كبيرة بين العمليتين من ناحية التنوية ونمو وتطور البنية المجهرية الجديدة المتكونة على سطح المعدن الأساس في عملية اللحام التي تختلف بشكل كبير عن الحبيبات المتكونة على جدار قالب السباكة من خلال الاختلاف في معدل سرعة التبريد واتجاهها وغيرها من الأسباب.

تعتمد البنية المجهرية للمنطقة التي انصهرت بالكامل وتجمدت مرةً أخرى بصورة رئيسة على الآتي: (1) التركيب الكيميائي، (2) تقدم التسخين الموضعي للمادة مع تحرك المصدر الحراري غالباً، (3) إضافة أسلاك اللحام ومساعدات الصهر والحجاب الغازي أو من دونهما، (4) ظروف الانجماد.

تكون البنية المجهرية لبركة اللحام عادةً على شكل حبيبات طولية Columnar Structure عمودية على خط اللحام باتجاه المعدن الأساس، وكما هو موضّح بالشكل (4-14). ونظراً لكون نويات الحبيبات تتكون على سطح معدن الأساس (حدود بركة اللحام) فأنها تنمو باتجاه معاكس لانحدار الحرارة وبشكل طولي نحو خط اللحام أو سطحه وبحسب أوضاع اللحام وعمقه، لاحظ الشكل (4-15). إن الحجم الحبيبي للحبيبات الطولية يكون كبيراً نوعاً ما مما يقلل من الخواص الميكانيكية المرغوبة. ويزداد الحجم الحبيبي للحبيبات الطولية في حالة لحام الصفائح المعدنية ذات الأسماك الكبيرة لزيادة الحرارة المطلوبة لإجراء اللحام، ولتقليل الضرر في هذه الحالة يتم إجراء اللحام بأقل عدد تمريرات Multi-Pass Welding. والشكل (4-16) يوضّح لحام صفيحة ذات سمك كبير بأكثر من تمريرة للحصول على ملحومة جيدة خالية من العيوب وذات مظهر جيد، وكأن هذا التكرار يؤمن معالجة حرارية لخط اللحام السابق من خلال تسخينه وتبريده بسرعة وبذلك تختفي الحبيبات الطولية وتتكون بدلها حبيبات صغيرة الحجم في جزء الطبقة السابقة والملاصقة للطبقة اللاحقة وبذلك يتم الحصول على خواص أفضل.

وتبعاً لأسلوب اللحام من ناحية استعمال أقطاب اللحام، هنالك ثلاثة أنواع من مناطق اللحام وهي:

1- منطقة ذاتية (أقطاب غير مستهلكة وبدون إضافة معدن حشو)

Autogenous Fusion Zone

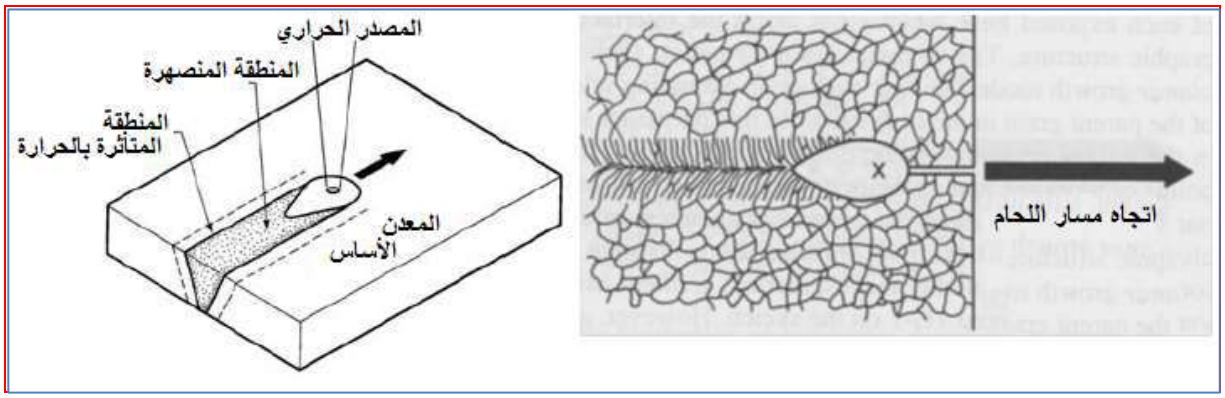
2- منطقة متجانسة (أقطاب اللحام أو معدن الحشو متوافق مع معدن الأساس)

Homogeneous Fusion one

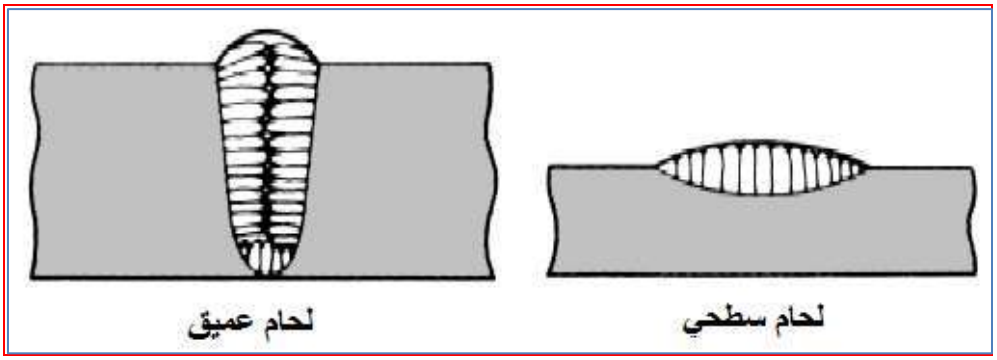
3- منطقة غير متجانسة (أقطاب اللحام أو معدن الحشو مختلفة عن معدن الأساس)

Heterogeneous Fusion Zone

النوع الأول، مثل: اللحام بطريقة الحزمة الإلكترونية أو بطريقة TIG، والنوع الثاني، مثل: اللحام باستعمال أقطاب رقم (E8018-B2) للحام سبيكة (فولاذ- Mo-Cr)، والنوع الثالث، مثل: استعمال أقطاب رقم (ER4043) مع سبيكة الألمُنيوم AA6061.



شكل 4-14 البنية المجهرية لمنطقة اللحام، ومسار تقدم اللحام



شكل 4-15 الحبيبات الطولية في المنطقة المنصهرة

شكل 4-16 أسلوب تكرار خط اللحام

ثانياً: المنطقة المتأثرة بالحرارة Heat Affected Zone (HAZ)

تبدأ حدود المنطقة المتأثرة بالحرارة HAZ من حدود بركة اللحام لغاية المنطقة التي لا تتأثر البنية المجهرية فيها بدرجات الحرارة، أي أن هذه المنطقة تتعرض إلى درجات حرارة مرتفعة تؤدي إلى تغيرات جوهرية في البنية المجهرية وبالتالي حدوث تغيرات في خواص المعدن لتلك المنطقة، وعلى الرغم من عدم تغير التركيب الكيميائي للمعدن الأساس. وتختلف درجة حرارة ومعدل تبريد المنطقة المتأثرة بالحرارة بناءً على المسافة من خط الانصهار لمعدن اللحام والمنطقة المتأثرة بالحرارة، أي مقدار المسافة للمنطقة المنصهرة.

وتُعد المنطقة المتأثرة بالحرارة من ضمن المعدن الأساس وتختلف تماماً عن المنطقة المنصهرة، وتعتمد خواص هذه المنطقة (HAZ) على النقاط المبينة بالآتي:

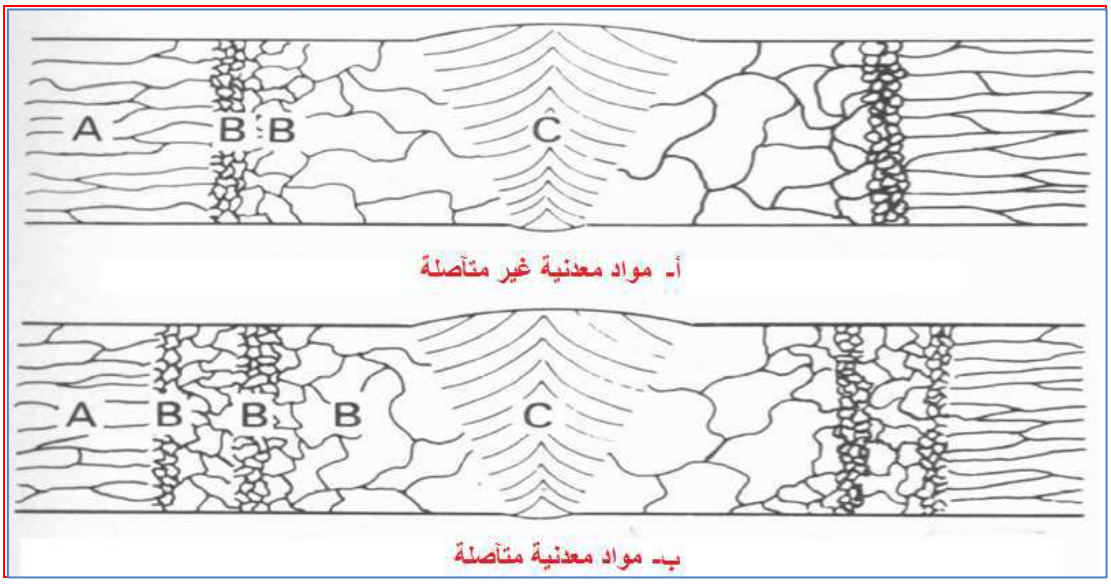
- **معدل تزويد الطاقة الحرارية الداخلة ومعدل التبريد**
- **مقدار ارتفاع درجة الحرارة في تلك المنطقة**
- **الحجم الحبيبي الأصلي واتجاهه، ومقدار التشكيل على البارد المسبق لعملية اللحام**
- **الخواص الميكانيكية الابتدائية من مقاومة وصلادة وغيرها، وطريقة تحسين تلك الخواص مثل تقوية المعدن بالمعالجة الحرارية.**

علماً أن الحرارة الداخلة لمنطقة اللحام تعمل على إعادة تبلور الحبيبات الطولية الناتجة من التشكيل على البارد للمعدن الأساس ونموها وإزالة الإجهادات الداخلية لهذه الحبيبات. ويؤثر معدل التبريد في الخواص الميكانيكية للمنطقة المتأثرة بالحرارة، إذ يقل معدل التبريد بزيادة كمية الحرارة الداخلة ودرجة حرارة معدن الأساس بينما يزداد مقداره بزيادة سمك معدن الأساس.

وهناك نوعان من السبائك المعدنية من حيث التغير في نوع البلورة عند ارتفاع درجات الحرارة بالتسخين، الأولى التي لا يحدث فيها **تغييراً تآصلياً** أي لا تتغير فيها نوعية الشبكة البلورية خلال التسخين مثل النحاس، والثانية ذات التغيير التآصلي خلال التسخين مثل الفولاذ، يوضّح الشكل (4-17) مقارنة بين هذين النوعين لمناطق اللحام المختلفة. إذ تمثل المنطقة (A)المعدن الأساس الذي لم يتأثر بالحرارة، والمنطقة (B) المنطقة المتأثرة بالحرارة HAZ، في حين أن المنطقة (C) تمثل بركة اللحام. على الرغم من أن الشكل (4-17-أ) يمثل مواد معدنية غير متآصلة ولكن تأثير حرارة اللحام واضح على البنية المجهرية للمعدن، إذ إن الحبيبات الطولية الناتجة من التشكيل على البارد المسبق في المعدن الأساس قد تم إعادة تبلورها Recrystallization وخضعت لمرحلة الاستعادة Recovery والنمو Growth بسبب ارتفاع درجة الحرارة في المنطقة المتأثرة بالحرارة HAZ. ويلاحظ وجود نوعين من الحبيبات في المنطقة المتأثرة بالحرارة، فالبنية المجهرية للمنطقة المجاورة مباشرة لمعدن الأساس تكون متساوية المحاور (غير طولية) وصغيرة الحجم الحبيبي لعدم وصول درجات حرارة مرتفعة لذلك الحيز، ويبدأ الحجم الحبيبي في الحيز الثاني بالزيادة كلما اقترب من المنطقة المنصهرة التي تكون حبيباتها طولية كبيرة كما تم توضيحه في الفقرة السابقة. ومن هذا المنظور، فإن مقدار الصلادة في تلك المنطقة (HAZ) ستكون متغيرة بحسب الحجم الحبيبي فضلاً عن مقدار معدل التبريد.

الشكل (4-17-ب) يمثل المواد المعدنية المتآصلة Allotropic Metals لمناطق اللحام المختلفة، وخير مثال عليها هو الفولاذ الذي يكون من نوع الفيرايت ذي البنية البلورية المكعبة ومتمركزة الجسم BCC عند درجات الحرارة الواطئة وتتغير هذه البنية إلى الأوستنايت ذي الشبكة البلورية المكعبة ومتمركزة الأوجه FCC عند التسخين وارتفاع درجة حرارته.

وفي كل مرة يتغير المعدن من طور إلى آخر تتكون حبيبات جديدة متساوية المحاور صغيرة الحجم الحبيبي تبدأ من الحدود البلورية للحبيبات السابقة. وكما تم توضيحه في الحالة السابقة فإن الحبيبات الطولية الناتجة من التشكيل على البارد المسبق لعملية اللحام لمعدن الأساس وبسبب ارتفاع درجات الحرارة ستخضع إلى الاستعادة وإعادة التبلور والنمو لتكون نوعين من الحبيبات بحسب حجمها، الصغيرة وهي القريبة من المعدن الأساس، والأخرى التي نمت وزاد حجمها لارتفاع درجات الحرارة نسبياً عن سابقتها. وستعقب هذه الحبيبات الكبيرة نسبياً وباتجاه منطقة بركة اللحام حبيبات متبلورة جديدة صغيرة الحجم تأثرت بارتفاع درجات الحرارة وخضعت للتغير الطوري (أي أن درجة الحرارة وصلت في تلك المنطقة أعلى من درجة حرارة التغير الطوري)، وباتجاه بركة اللحام فإن الحبيبات التي تغير طورها ستنمو لتكّون حبيبات ذات حجم حبيبي أكبر لارتفاع درجات الحرارة بالقرب من المنطقة المنصهرة.



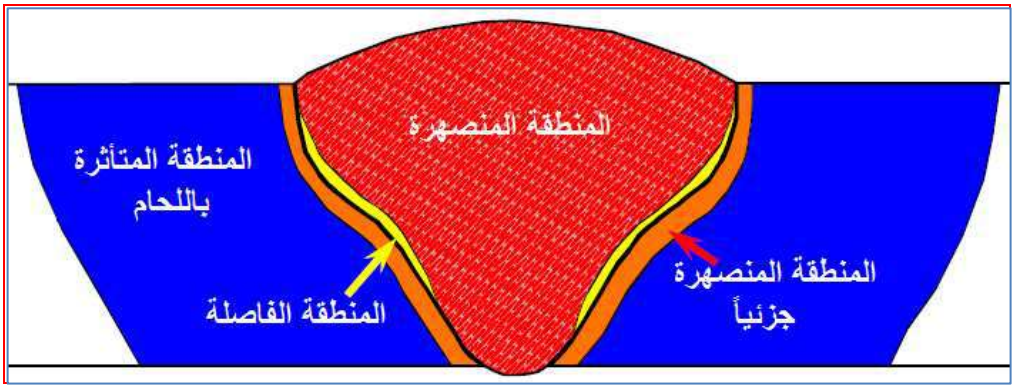
شكل 4-17 مقارنة بين البنية البلورية لمواد معدنية متآصلة وغير متآصلة لمناطق اللحام

ثالثاً: المعدن الأساس Base Metal (BM)

المنطقة الأخيرة من مناطق اللحام هي منطقة المعدن الأساس BM التي لا تتأثر بحرارة اللحام، ومع هذا فلا يمكن لأحد أن يتصور انعدام وجود أية مشكلة في المعدن الأساس بسبب الدورات الحرارية المصاحبة لعملية اللحام. إذ عادةً ما تصاحب عملية الانجماد إجهادات في الملحومة ناتجة عن التغيرات الحرارية والتمدد والتقلص الحراري المتغيرين عند التسخين والتبريد، وذلك يؤدي إلى تشوه القطعة الملحومة فضلاً عن الإجهادات الداخلية. وعليه توجد بعض المعالجات الحرارية وغيرها من المعالجات لغرض التقليل من هذه العيوب التي يعاني منها المعدن الأساس.

من الجدير بالذكر فيما يخص موضوع مناطق اللحام، فإن الأبحاث الحالية والدراسات المتقدمة بهذا الخصوص قد جزأت مناطق اللحام إلى مناطق عديدة غير التي تم ذكرها في هذه الفقرة بسبب التغيرات الكبيرة في البنية المجهرية والخواص، وكما هو موضّح بالشكل (4-18)، ومنها الآتي:

- المنطقة الفاصلة Unmixed Zone وهي منطقة ضيقة ومحصورة بين المنطقة المنصهرة والمنطقة المنصهرة جزئياً.
- المنطقة المنصهرة جزئياً Partially Melted Zone وهي المنطقة المحصورة بين المنطقة السابقة والمنطقة الفعلية المتأثرة باللحام.



الشكل 4-18التوزيع المتقدم لمناطق اللحام

7-4 البنية المجهرية لملحومات الفولاذ الكربوني والسبائكي

Microstructure of Carbon and Alloy Steel Weldments

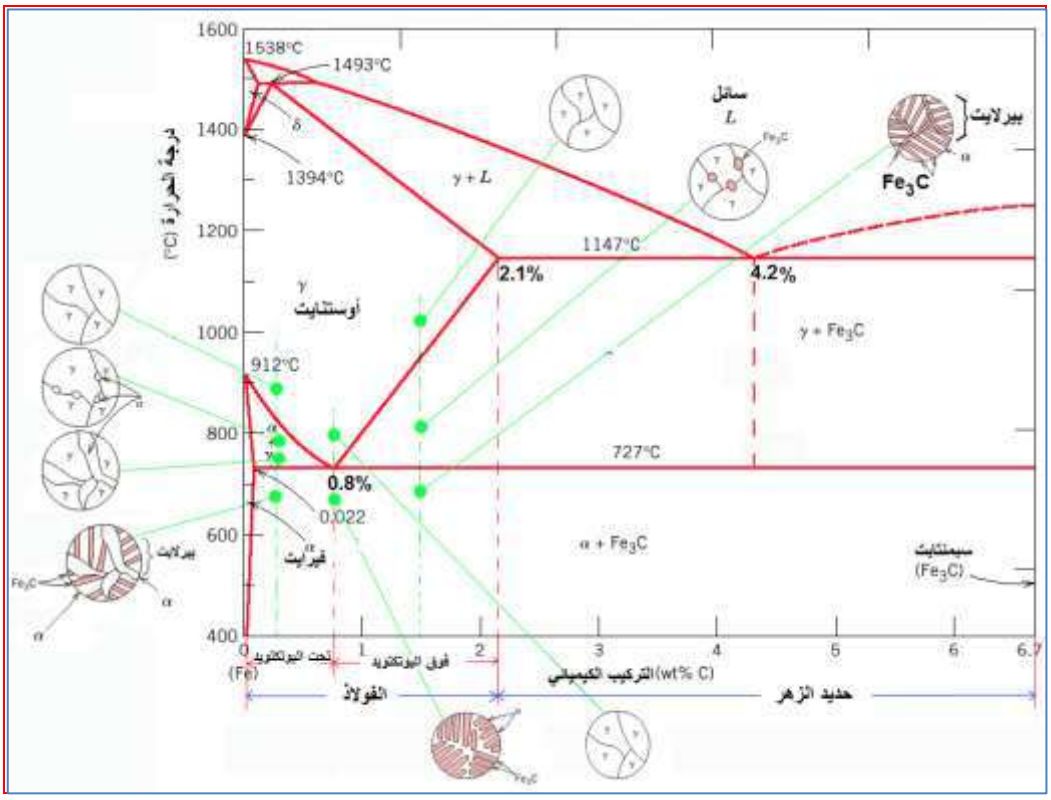
من الأمور المهمة التي يجب مراعاتها عند لحام الفولاذ الكربوني والسبائكي هي معدل سرعة التبريد ومقدار نسبة الكربون الموجودة في السبيكة. إذ يُعد عنصر الكربون العامل الجوهري في تصليد الفولاذ عند تسخينه ومن ثم إخماده Quenching (معدل سرعة التبريد عالٍ). تؤدي زيادة نسبة الكربون إلى الحصول على صلادة أعلى. ومن الضروري السيطرة على معدل سرعة التبريد لأنها ستحول القطعة الفولاذية إلى قطعة صلدة جداً وبالتالي ستفقد متانتها وتحولها إلى مادة قصفة وخصوصاً عند نسب الكربون العالية، لذا فإن ملحومات الفولاذ الكربوني ذات نسبة كاربون تزيد على (0.35%) أو ذات سمك يزيد على (50 mm) وتحتاج إلى إعادة تسخين وتقليل معدل التبريد أي معالجة حرارية تسمى بالتسخين المسبق Preheating بالإضافة إلى التسخين اللاحق Post-heating لغرض تحسين خواصها الميكانيكية وإعادة جزء من متانتها. ويوصي خبراء اللحام والمتخصصين عادةً بعمل تلك المعالجة الحرارية حتى في نسب الكربون الواطئة إذا كان سمك القطع الملحومة أكبر من (25 mm)، لتكون من ضمن المعايير الصحيحة (بالأمان).

وقد يؤدى تصليد المنطقة المتأثرة بالحرارة HAZ إلى حدوث شقوق نتيجة لانخفاض المطيلية، وعلى ذلك فمن المفضل تقليل الصلادة إلى الحد المناسب للوصول إلى جودة عالية لوصلة اللحام. ويتحكم عاملان أساسيان في صلادة المنطقة المتأثرة بالحرارة وهما العناصر السبائكية في الفولاذ ومعدل التبريد ولكنها أكثر تأثراً بنسبة الكربون. ومع ذلك ففي حالة الفولاذ لا يمكن إهمال تأثير العناصر الأخرى بخلاف الكربون، ويمكن تحديد المكافئ الكربوني بحساب تأثير العناصر الأخرى مقارنة بالكربون وجمعها معاً. وبجانب مكافئ الكربون، تتأثر أعلى صلادة في المنطقة المتأثرة بالحرارة بسمك القطعة الملحومة، والطاقة الحرارية الداخلة، ودرجة حرارة التسخين المسبق للحام. ويتضح من هذا أن أعلى صلادة تقل بزيادة درجة حرارة التسخين المسبق وزيادة كمية الطاقة الحرارية الداخلة.

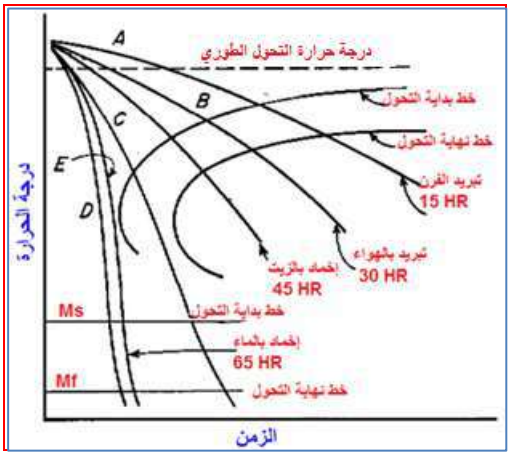
ومن المفيد في هذا المجال أن يتذكر الطالب مخطط الحديد- كاربيد الحديد ($Fe-Fe_3C$) والأطوار المذكورة فيه، والذي تناوله كتاب العلوم الصناعية المرحلة الأولى، والموضّح في الشكل (4-19).

عند مراجعة المخطط يلاحظ عدم وجود طور المارتنسايت بسبب أن هذا الطور يتكون عند التبريد السريع (حالة عدم التوازن) وكما تم ذكره، ومخططات الأطوار للمعادن ترسم على أساس حالة التوازن. وفي هذا المجال سيتم تناول مثال عن معدل سرعة التبريد وأثره في تكوين المارتنسايت، فإذا تم أخذ أربع عينات من الفولاذ بنسبة معينة من الكربون ولتكن (0.6% C)، وسخنت بفرن مسيطر عليه إلى درجة حرارة أعلى من خط التحول الطوري لغرض تحول كل العينات إلى طور الأوستنايت. ومن ثم بُردت هذه العينات بمعدلات تبريد متباينة، بُردت العينة الأولى بمعدل واطئ جداً إلى درجة حرارة الغرفة وذلك من خلال إبقائها في الفرن بعد توقف تزويد الحرارة (إطفاء الفرن)، والثانية تم إخراجها من الفرن وبردت في الهواء أي بمعدل تبريد متوسط، في حين تم تبريد الثالثة من خلال إخمادها في وسط زيتي أي بمعدل تبريد عالٍ، أما الأخيرة فإذا خمدت بماء بارد أي بمعدل تبريد عالٍ جداً.

عند فحص الصلادة للعينات سيلاحظ إن مقدار الصلادة لها متفاوت وقيمه 15 HRC، 30 HRC، 45 HRC، 65 HRC على التوالي، أي أن أعلى صلادة بالعينات هي عند إخمادها بالماء البارد (معدل تبريد سريع جداً). الشكل (4-20) يوضّح مخططاً لمعدلات التبريد المتباينة المذكورة آنفاً مع حدود تكون المارتنسايت (بداية التحول وانتهائه).



شكل 4-19 مخطط الأطوار المتوازن حديد – كاربيد الحديد

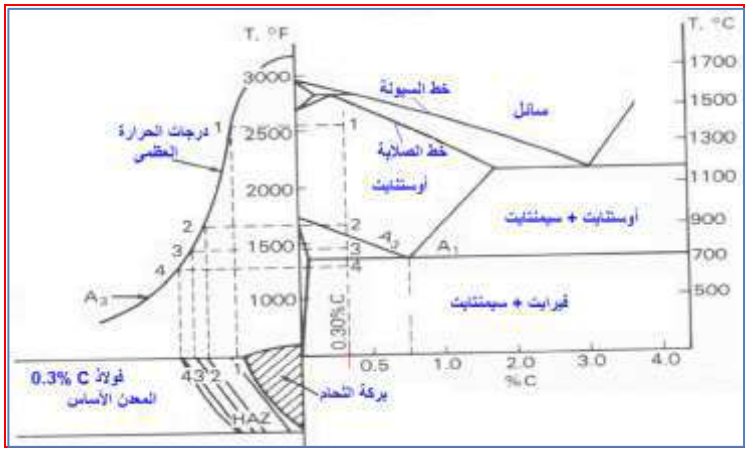


شكل 4-20 مخطط منحنيات معدلات التبريد لمعرفة تكون المارتنسايت

من هنا يتضح أن معدلات التبريد السريعة تؤدي إلى تكون المارتنسايت إذا كانت نسب الكربون مرتفعة في الفولاذ أو في الفولاذ السبائكي. ولكون معظم عمليات اللحام يصاحبها تسخين وتبريد بسرعة عالية، لذا من المتوقع أن تكون للقطع الفولاذية الملحومة أطواراً متعددة ومنها طور المارتنسايت وبحسب نسب الكربون أو عناصر السبك (إذا زادت نسبة الكربون عن 0.35% أو ازداد المكافئ الكربوني عن 0.45%) ولغرض التمحيص في هذا الموضوع، يتم دراسة مناطق اللحام ودرجات حرارتها ومقارنتها مع مخطط أطوار الحديد – كاربيد الحديد، والشكل (4-21) يوضّح تلك المقارنة لسبيكة من الفولاذ C 0.3%، وكما مبين فيما يأتي:

- المخطط يوضح مناطق مختلفة من المنطقة المتأثرة بالحرارة HAZ وما المتوقع من نوع البنية المجهرية بالمقارنة مع مخطط الأطوار.

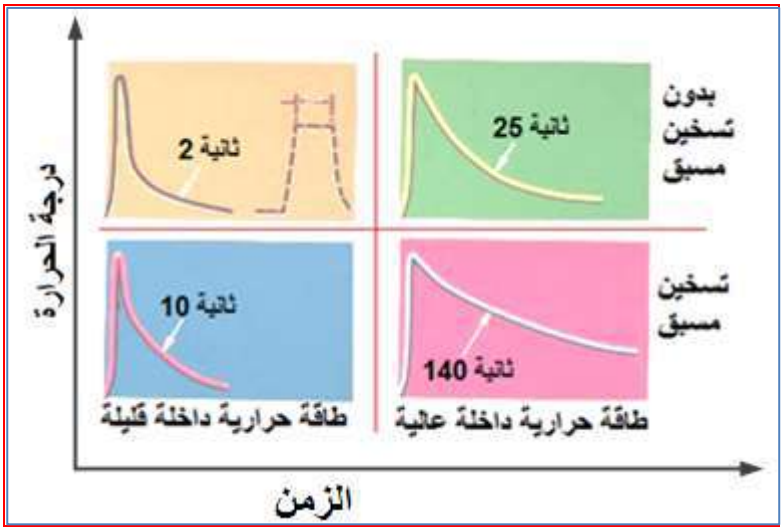
- في الجزء القريب من معدن الأساس (نقطة 4) ستكون البنية عبارة عن طور الفيرايت والسيمنتايت.
- الجزء الذي يليه (نقطة 3) ستكون البنية عبارة عن طوري الأوستنايت والفيرايت.
- بنية النقطة 2 عبارة عن طور الأوستنايت.
- وبالاقتراب أكثر من بركة اللحام وعلى حدودها تظهر أطوار عديدة هي الأوستنايت وحديد- دلتا ومنصهر المعدن. وعند بركة اللحام ستكون جميع المنطقة في الحالة السائلة.



الشكل 4-21 مقارنة مناطق اللحام ودرجات حرارتها مع مخطط الأطوار حديد – كاربيد الحديد

هذه هي البنى المجهرية للمناطق المختلفة في وقت اللحام أي بارتفاع درجات الحرارة، ولكن ما هو المتوقع لنوع البنية المجهرية لتلك المناطق عند تبريدها؟

إن معدل التبريد يعتمد على عدة عوامل، وأهم عاملين هما التسخين المسبق قبل عملية اللحام ومقدار الطاقة الحرارية الداخلة في أثناء اللحام. فمعدل التبريد يكون عالياً في حالة عدم التسخين المسبق لقطعة العمل وطاقة حرارية داخلة قليلة، بينما يكون معدل التبريد واطئ حينما يكون هنالك تسخين مسبق وطاقة حرارية داخلة عالية، وكما هو موضّح في الشكل (4-22)، علماً أن معدل التبريد محسوب على فرق درجات الحرارة (800-500°C)، وأن التسخين المسبق هو بحدود (150°C).



الشكل 4-22 معدلات التبريد نسبة إلى الطاقة الحرارية الداخلة وحالة التسخين المسبق

ومما تقدم فيما يخص موضوع سرعة التبريد وتأثير نسبة الكربون على تكّون المارتنسايت يمكن أن يستنتج بشكل عام عن قابلية اللحام لسبائك الفولاذ بالآتي:

- **سهولة إجراء اللحام الانصهاري على سبائك الفولاذ واطئة الكربون أقل من أو يساوي 0.3%.**
- **إمكانية إجراء اللحام الانصهاري على سبائك الفولاذ متوسط الكربون (0.3-0.6)% إذا تم تسخين القطعة تسخيناً مسبقاً لغرض التخلص من العيوب التي تصاحب هذا النوع من المعدن ومنها هشاشة الهيدروجين.**
- **صعوبة إجراء اللحام الانصهاري علـــى سبائك الفولاذ عالي الكربون أكثر مـــن 0.6% وسبائك حديد الزهر بدون أخذ الاحتياطات اللازمة مثل السيطرة على الطاقة الحرارية الداخلة وتقليلها إلى الحد المطلوب فضلاً عن تسخين القطعة تسخيناً مسبقاً لمنع ظهور العيوب والتشوهات التي تصاحب لحام المواد المعدنية.**

لو تم فحص قطعتين فولاذيتين من النوع نفسه، إحداهما مع تسخين مسبق والأخرى بدونه، سيلاحظ إن القطعة التي بدون تسخين مسبق لديها منطقة متأثرة بالحرارة ضيقة وتكون ذات معدل تبريد عالٍ مكونةً بنية مارتنسايت صلدة جداً بالقرب من خط الانصهار. في حين القطعة مع التسخين المسبق لها منطقة متأثرة بالحرارة عريضة مع معدل تبريد واطئ مكونةً بنية بيرلايت.

من المعالجات المهمة للقطع الفولاذية عالية الكربون والملحومة باللحام الانصهاري للتخلص من البنية القصفة التي تمتلكها بنية المارتنسايت هي معالجة بالمراجعة التي تتضمن تسخين القطعة بدرجة حرارة أوطأ من الدرجة الحرجة وهي درجة حرارة التحول الطوري، وعادةً تكون درجات المراجعة للفولاذ الملحومة هي بحدود (600-650°C) وإبقاء القطعة فـي الفرن لمدة مناسبة (ساعة واحدة لكل 2.5 cm سمك) ومن ثم تبريدها بمعدل واطئ، للتخلص من جميع الإجهادات الداخلية وإعادة نسبة من متانتها، فضلاً عن التخلص من العزل المجهري الذي قد يحدث أثناء اللحام، والشكل (4-23) يوضّح بُنية المارتنسايت وبُنية المراجعة.

شكل 4-23 بنية المارتنسايت وبنية المارتنسايت المراجع

ومن العيوب التي تصاحب ملحومات سبائك الفولاذ في الحدود بين منطقة الانصهار والمنطقة المتأثرة بالحرارة هو هشاشة الهيدروجين Hydrogen Cracking أو ما يسمى أحياناً بالشقوق على البارد Cold Cracking، لاحظ الشكل (4-24).

من العوامل التي تساعد على حدوث هذه المشكلة أثناء اللحام الآتي:

1. **زيادة نسبة الكربون**
2. **زيادة سمك قطعة اللحام**

3. الطاقة الحرارية الداخلة العالية

4. وجود الهيدروجين في منطقة اللحام، إن مصدر الهيدروجين هو الأصباغ، والزيوت، والطبقة الأوكسيدية السميكة فضلاً عن الرطوبة في أسلاك اللحام، ولذا يجب استعمال أقطاب لحام مناسبة بمساعد صهر من نوع منخفض الهيدروجين بالإضافة إلى تجفيف أسلاك اللحام بدرجات حرارة (300-350°C) لمدة تتراوح من ساعة إلى ثلاث ساعات.

يمكن منع حدوث هذا العيب إما بالتسخين المسبق بهدوء لتقليل سرعة التبريد وهذا يؤدي إلى عدم تكون البنية الصلدة (المارتنسايت) وكذلك طرد الهيدروجين من منطقة اللحام، فضلاً عن منع مصادر الهيدروجين من الوصول لمنطقة اللحام.

ومن فوائد التسخين المسبق في عملية لحام سبائك الفولاذ ما يأتي:

1- تقليل التفاوت في درجات الحرارة بين منطقة الانصهار والمعدن الأساس.

2- تقليل معدل التبريد، مما يؤدي إلى تقليل احتمالية تكوّن بنية المارتنسايت.

3- تقليل التشوهات بأنواعها المختلفة.

4- تقليل خطورة هشاشة اللحام.

5- يسمح بخروج الهيدروجين من منطقة اللحام.

شكل 4-24 شقوق هيدروجينية لسبيكة فولاذية ملحومة

وبصورة عامة، فإن إجراء عمليات اللحام للفولاذ السبائكي لا تختلف من ناحية الجوهر عن الفولاذ الكربوني إلا بحالات معدودة. يمكن أن يتم تلخيص مجموعة من القواعد والإرشادات للحام الفولاذ السبائكي، كما وينطبق بعض من هذه الإرشادات على لحام الفولاذ الكربوني.

وأهم تلك الإرشادات هي:

1- استعمال الأقطاب المناسبة من حيث أقطارها وأنواعها الموصى بها والمتوافقة مع نوع سبيكة الفولاذ، واختيار مساعد الصهر الملائم أو الحجاب الغازي المطلوب، لحماية الملحومات من التصدع الهيدروجيني.

2- السيطرة على الطاقة الحرارية الداخلة من خلال ضبط التيار وفرق الجهد لمكائن لحام القوس الكهربائي، وكذلك السيطرة على سرعة اللحام، والسيطرة على درجة الحرارة من خلال التسخين المسبق.
3- استعمال التقنيات والأساليب الصحيحة بعملية اللحام بحسب أوضاع اللحام، وفي حالة استعمال أسلوب اللحام بأكثر من تمريرة يجب إزالة الخبث والقشرة الأوكسيدية والملوثات الأخرى قبل البدء بالمرحلة التالية.
4- ضرورة إجراء المعالجات الحرارية بعد عملية اللحام للتخلص من الإجهادات الداخلية، فضلاً عن استرجاع جزء من متانة القطعة الملحومة.

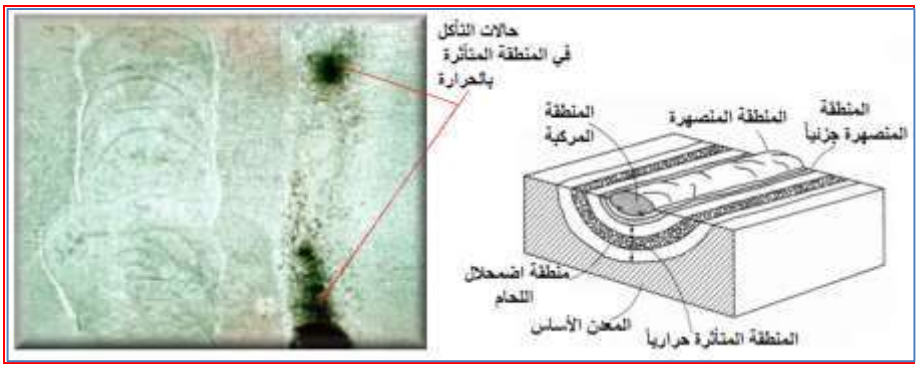
ملاحظة

إحدى أهم المشاكل التي تواجه لحام الفولاذ المقاوم للتآكل Stainless Steel هي ظاهرة اضمحلال اللحام Weld Decay فما هي هذه الظاهرة، وما هي مسبباتها وكيفية علاجها؟

كما هو معروف فإن الفولاذ المقاوم للتآكل هو أحد الأنواع المهمة للفولاذ السبائكي وله استعمالات كثيرة جداً، وهو على عدة أنواع بحسب العناصر السبائكية المضافة للفولاذ ونسبها، ومن أهم هذه العناصر هو الكروم Cr الذي يجعل الفولاذ مقاوماً جيداً للتآكل والنيكل Ni وغيرها فضلاً عن الكربون.

عند إجراء عملية اللحام وارتفاع درجات الحرارة، يتحد الكروم والكاربون مكوناً كاربيد الكروم الذي يترسب على الحدود الحبيبية للسبيكة في المنطقة المتأثرة بالحرارة وخصوصاً في المناطق التي تكون فيها درجات الحرارة بحدود (550-850°C)، وبالتالي ستساعد هذه الحالة على نشوء خلية تآكلية بسبب فرق التركيز بين هذه المنطقة والمنطقة المجاورة مما يحدث تآكلاً عنيفاً في الحدود الحبيبية، وكما موضّح في الشكل (4-25). وسيحدث كذلك نقصان واضح في نسبة الكروم في تلك المنطقة مما يجعل قطعة العمل عرضةً للتآكل في أثناء الخدمة فضلاً عن التآكل في الحدود الحبيبية، ويمكن معالجة هذه الظاهرة بالآتي:

(1) استعمال أنواع من السبائك مقاوم التآكل واطئ الكربون مثل نوع (340L) في الملحومات.
(2) استعمال عناصر معدنية سبائكية لها ألفة تفاعل مع الكربون أعلى من الكروم مما يمنع انخفاض الكروم عن نسب 11%.
(3) استعمال المعالجة الحرارية لغرض إعادة توزيع الكروم على عموم المنطقة المتأثرة بالحرارة.



شكل 4-25 ظاهرة اضمحلال اللحام لسبائك الفولاذ المقاوم للتآكل

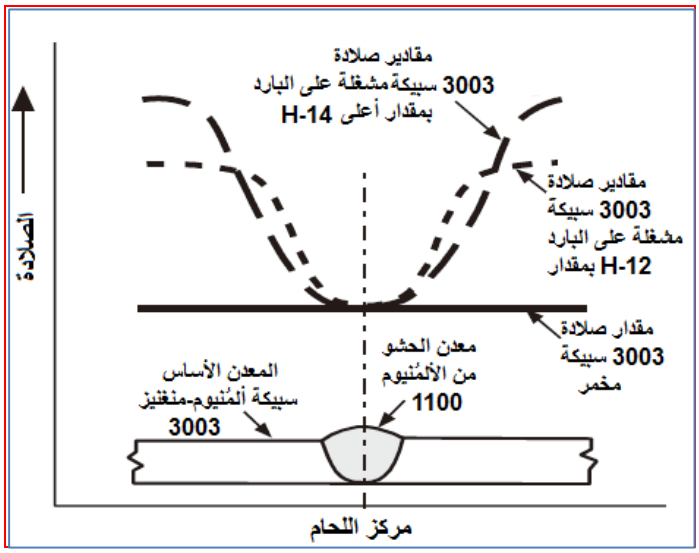
8-4 ميتالورجيا اللحام للمعادن غير الحديدية

Welding Metallurgy of Non-Ferrous Weldment

المعادن غير الحديدية Non-Ferrous هي المواد المعدنية غير القائمة على معدن الحديد، ومن أهم هذه المعادن: الألمُنيوم وسبائكه، النحاس وسبائكه، المغنسيوم وسبائكه، النيكل وسبائكه، التيتانيوم وسبائكه. تستعمل هذه المعادن اليوم في كثير من التطبيقات كمواد هندسية. ويكفي للدلالة على ذلك إلقاء نظرة سريعة على أهم المنشآت المعدنية في العصر الحديث ابتداءً من المفاعلات النووية، الصواريخ، الطائرات، سفن الفضاء، الأقمار الصناعية، الجسور، وسائل النقل المختلفة، الأجهزة المنزلية والكهربائية.....إلى أصغر الأجهزة الإلكترونية. فمعظم مكونات هذه المنشآت معدنية تم تجميعها مع بعضها الآخر بوساطة طرائق اللحام المختلفة. ومع ذلك، فإن قابلية المواد المعدنية غير الحديدية للحام تختلف تماماً عن قابلية اللحام للفولاذ وسبائكه، وذلك بسبب اختلاف الخواص الفيزيائية والمعدنية والميكانيكية، وبالتالي فإن عملية لحام المواد المعدنية غير الحديدية ينبغي أن تدرس بدقة مع الأخذ بعين الاعتبار خصائصها المختلفة للحصول على ملحومات خالية من العيوب Sound Weldments.

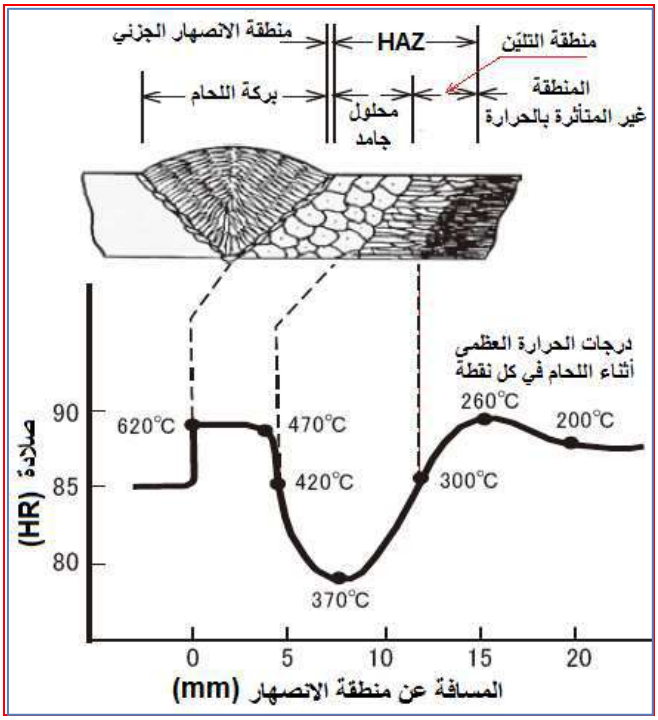
أولاً: الألمُنيوم يُعد الألمُنيوم وسبائكه من أهم المواد المعدنية في الوقت الحاضر وله تطبيقات كثيرة جداً لا حصر لها، كما أن له قابلية لحام Weldability جيدة مع معظم طرائق اللحام المعروفة. ومع هذا فإن الألمُنيوم وسبائكه بحاجة إلى عناية خاصة عند اللحام بسبب موصليته العالية للحرارة فضلاً عن التكون السريع جداً لطبقة أوكسيد الألمُنيوم Al_2O_3 الملتصقة بقوة على سطح المعدن وهي بدرجة انصهار عالية جداً (2050°C) مقارنة بدرجة انصهار المعدن نفسه (660°C) مسببة بذلك صعوبات عند إجراء عملية اللحام. فعلى سبيل المثال، يوصى عند لحام الألمُنيوم بطريقة القوس الكهربائي بأن يستعمل **أسلوب اللحام بالحجاب الغازي (TIG) أي لحام بأقطاب التنكستن والغاز الخامل. يضاف للموصلية الحرارية العالية للألمُنيوم موصليته الكهربائية العالية أيضاً، التي تسبب صعوبة في لحام الألمُنيوم بطريقة لحام النقطة Spot Welding** إلا عند استعمال مكائن لحام بالتيار المستمر DC Welding Machines وبقدرات عالية جداً مقارنةً بلحام الفولاذ وسبائكه.

وعلى الرغم من أن درجات الانصهار الواطئة نوعاً ما للألمُنيوم وسبائكه مقارنة بالحديد (1539°C)، إلا أنه يمتلك حرارة نوعية وحرارة كامنة عاليتين فضلاً عن الموصلية الجيدة للحرارة، لذا يحتاج إلى طاقة حرارية داخلة كبيرة وفي زمن قصير لإنجاز عملية اللحام بصورة جيدة. وتتعرض ملحوماته إلى زيادة في التشوه مقارنة بالفولاذ وسبائكه، وذلك بسبب معامل تمدده الحراري الكبير نوعاً ما. وتتعرض المنطقة المتأثرة للحرارة HAZ إلى التليين (انخفاض في المقاومة الميكانيكية) لمحلومات الألمُنيوم وسبائكه وخاصةً سبائكه المصلدة حرارياً بالترسيب أو بالتشكيل على البارد قبل اللحام، لكونها تأثرت بالحرارة وأدى ذلك إلى فقدان المقاومة المكتسبة الذي تم قبل اللحام في أثناء المعالجة الحرارية أو التشكيل على البارد، وبالتالي فشل الملحومات في هذه المنطقة (HAZ) أثناء الخدمة. الشكل (4-26) يبيّن مخططاً لآلية حدوث التليين في منطقة اللحام لسبيكة الألمُنيوم- منغنيز التي تصلد بالتشكيل على البارد والتي كثيراً ما تستعمل في علب حفظ الأغذية والمشروبات، يحدث التليين في بقعة اللحام وفي المنطقة المتأثرة بالحرارة عند درجة (250°C) تقريباً، وبالتالي تنخفض الصلادة والمقاومة إلى مستوى السبيكة حينما تكون في حالة التخمير Annealing، كما أن مقدار التليين في تلك المنطقة يزداد بازدياد مقدار التشكيل على البارد قبل اللحام.



الشكل 4-26 مقدار انخفاض الصلادة لملحومة من سبيكة الألمُنيوم - متغير

وفي حالة سبائك الألمُنيوم المصلدة بالمعالجة الحرارية، فإن توزيع مقدار الصلادة على الملحومة يأخذ شكلاً معقداً بعض الشيء، إذ تتكون حبيبات محلول جامد Solid Solution خشنة في المنطقة القريبة من بركة اللحام والمتأثرة بالحرارة ما بين درجة (450-550°C) وتنحل الأطوار المترسبة التي تكونت بالمعالجة الحرارية بالترسيب وتذوب في الطور الرئيس للسبيكة مكونةً محلولاً جامداً صلادته أعلى من صلادة بركة اللحام والمنطقة المتأثرة بالحرارة بدرجات (150-250°C)،وذلك بسبب فقدان المعالجة الحرارية، وكما هو موضّح في الشكل (4-27) الذي يمثل توزيع مقادير الصلادة بحسب البنية المجهرية لكل منطقة في ملحومة سبيكة ألمُنيوم معالجة حرارياً قبل اللحام من نوع (Al-Mg-Si).



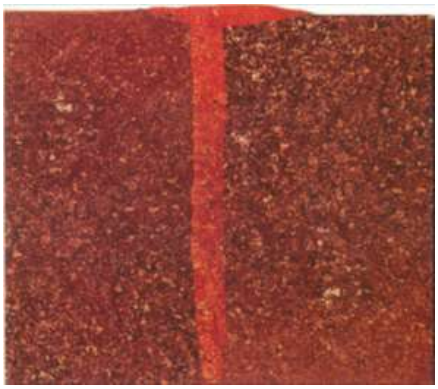
شكل 4-27 مقادير الصلادة بحسب البنية المجهرية لملحومة سبيكة ألمُنيوم-مغنيسيوم-سليكون

ثانياً: النحاس يُعد النحاس وسبائكه من أقدم المواد المعدنية التي عرفها واستعملها الأنسان القديم لامتلاكه خواصاً متميزة. ومـــن أهم خواصه موصليته الجيدة للكهرباء وموصليته الجيدة للحرارة (ثمانية مرات أكثر من الفولاذ)، لذلك فإن حرارة اللحام الداخلة لمنطقة اللحام سرعان ما تهرب وتتبدد من منطقة اللحام إلى المعدن الأساس، وبالتالي من الصعوبة لحام أجزاء عميقة وإلا ستحدث حالة اللحام الانصهاري غير التام Insufficient Fusion، وعليه يُعد التسخين المسبق للمقاطع السميكة المطلوب لحامها من الخطوات المهمة قبل اللحام وخصوصاً مع بعض سبائك النحاس، فضلاً عن تقليله كمية الطاقة الحرارية الداخلة وبالتالي سيعطي ملحومات جيدة.

وعادةً تصلد سبائك النحاس وتقوى بطريقتين كما في سبائك الألمُنيوم وهما التشكيل على البارد والترسيب للأطوار الثانوية بالمعالجة الحرارية. ففي السبائك المصلدة بالتشكيل على البارد والملحومة تتأثر المنطقة المتأثرة بالحرارة HAZ كثيراً وتَلين وتضعف مما يتوقع أن يكون الفشل فيها نتيجة الشقوق على الحار Hot Cracks، ولذا سيكون من الضروري إجراء عملية التسخين المسبق لتقليل نسبة التليُّن في المنطقة المتأثرة بالحرارة. في حين يوصى أن تجري المعالجة الحرارية بعد اللحام وليس قبل اللحام للسبائك المصلدة بالترسيب. ولما يمتلكه النحاس وسبائكه من طبيعة جريان عالية، يستعمل اللحام بالوضع الأفقي أينما كان ممكناً. ويستعمل هذا الوضع أيضاً عند اللحام الزاوي واللحام بحرف T.

وتعاني سبائك النحاس وبالأخص سبائك نحاس – نيكل وسبائك نحاس- قصدير والمعروفة بسبائك البرونز من الشقوق على الحار ويمكن التخلص من هذا العيب بالتصميم الصحيح لمفصل اللحام، فضلاً عن التسخين المسبق. وكذلك تُعد مشكلة المسامية في ملحومات سبائك النحاس ظاهرة سلبية أخرى عند إضافة عناصر سبك ذات درجات انصهار واطئة، وذلك بسبب تبخر هذه العناصر عند استعمال طاقة حرارية داخلة عالية، وعلاج هذه المشكلة هو استعمال سرعة لحام عالية لغرض تقليل الطاقة الحرارية الداخلة واستعمال معدن حشو أو أسلاك لحام تحتوي على نسبة قليلة من عناصر واطئة الانصهار.
ويجب إزالة جميع الشوائب والمواد التي قد تكون موجودة على سطح قطعة العمل قبل اللحام على الأقل بمسافة لا تقل عن (13 mm) عن منطقة اللحام مثل الزيوت، الأصباغ، الأتربة، وغيرها، لأنها تسبب هشاشة بالملحومات. ويمكن استعمال الوسائل المعروفة بإزالة هذه الشوائب على السطح مثل الفرشاة السلكية أو التنظيف بالمحاليل الحامضية المناسبة، وفي حالة سبائك نحاس- نيكل يفضل إزالة الشوائب بالتجليخ.

وبصورة عامة فإن قابلية اللحام لسبائك النحاس متفاوتة بين الجيدة والضعيفة، فعلى سبيل المثال سبائك البراص التي تحوي على نسبة من الخارصين أقل من 20% تكون قابلية لحامها جيدة ولكن هذه القابلية تقل كلما زادت هذه النسبة، أما سبائك البرونز فإنها ذات قابلية لحام ضعيفة بسبب مدى الانصهار الواسع لسبائك هذا النوع، ومع هذا يمكن لحام هذه السبائك باستعمال الأساليب الصحيحة والمناسبة بحسب نوع السبيكة، لاحظ الشكل (4-28) الذي يمثل البنية المجهرية للحام سبيكتين مختلفتين من النحاس. أما الشكل (4-29) فيبيّن أرياش تبريد لمحرك كهربائي مصنعة من سبائك النحاس التي تمتلك خواصاً مرغوبةً فيها مثل اللامغناطيسية وعدم تولد الشرارة عند الاحتكاك. والأسطوانة المركزية مصنعة من سبيكة البرونز وكل من الجزء المخروطي والحلقة الخارجية والأرياش مصنعة من سبيكة نحاس – الألمُنيوم Cu-Al، والمجموعة تم ربطها باللحام باستخدام طريقة TIG.



الشكل 4-28 البنية المجهرية لسبيكتين مختلفتين من سبائك النحاس

شكل 4-29 مروحة محرك كهربائي مربوطة بلحام الـ TIG

9-4 المعالجات الحرارية للملحومات Heat Treatments for Weldments

تستعمل المعالجة الحرارية بعد اللحام Post Weld Heat Treatment لتحسين خواص الملحومات. وبصورة عامة، فإن الهدف من إجراء هذه المعالجة للملحومات هو زيادة مقاومة فشل الهشاشة والشقوق على الحار أو الساخن بسبب الهيدروجين وإزالة الإجهادات المتبقية بعد اللحام، إذ يمكن إزالة الإجهادات بوسائل ميكانيكية بدلاً من التسخين، وهنالك نتائج أخرى مرغوبة من المعالجة الحرارية لتعزيز المقاومة وتقليل نسبة الصلادة.

وتحدث الهشاشة والشقوق الهيدروجينية للفولاذ واطئ الكربون بدرجات حرارة قريبة من درجة حرارة الغرفة بعد اللحام، لذا لا يسمح بتبريد الملحومة لدرجة حرارة الغرفة بل يتطلب تسخينها مباشرة بعد اللحام وإبقائها بدرجة حرارة مرتفعة لوقت مناسب. لتوضيح مقدار درجة التسخين والوقت المناسب بحسب سمك القطعة، مثلاً لتلك السبائك تسخن درجة حرارتها إلى حدود 250°C ولمدة ساعة لكل واحد إنج (25 mm). أما المعالجة الحرارية بعد اللحام لغرض إزالة الإجهادات فيكون مقدار درجة حرارتها بحدود 675°C ولنفس الوقت المذكور آنفاً، إذ لطالما تحدث الإجهادات الداخلية أثناء عمليات اللحام المختلفة بسبب الدورات الحرارية العنيفة التي تصاحب عمليات اللحام، وهذه الإجهادات تعمل في حالة عدم إزالتها على نقصان مقاومة التآكل وزيادة التشوهات في الملحومات. ويمكن إزالة الإجهادات بطرائق ميكانيكية كأن تتم عن طريق تسليط حركات اهتزازية على الملحومة وغيرها من الطرائق.

وتتعرض الملحومات من سبائك الألمُنيوم إلى جهود داخلية وتشوهات كبيرة بسبب معامل التمدد الحراري الكبير، ولكن المعالجة الحرارية بعد اللحام تكون صعبة نوعاً ما بالمقارنة مع سبائك الفولاذ بسبب درجة الانصهار الواطئة والتوصيل الحراري العالي لذا يتطلب السيطرة الدقيقة على مقدار التسخين، والسيطرة الدقيقة على تسليط الإجهادات في حالة الوسائل الميكانيكية لإزالة الإجهادات لسهولة الانبعاج، وتضمن المعالجة الحرارية لسبائك النحاس إزالة الإجهادات أو التخمير أو التصليد بالترسيب، وكذلك تحتاج ملحومات السبائك المصلدة بالمعالجة الحرارية أو الملحومات التي يتوقع لها أن تعمل بظروف تآكلية قاسية إلى المعالجة الحرارية بعد اللحام، ويبيّن الجدول (4-1) درجات الحرارة المطلوبة في المعالجة الحرارية لإزالة الإجهادات بحسب نوع السبيكة. يجب أن يكون زمن التسخين كافياً لكامل الملحومة حتى تصل إلى درجة الحرارة المطلوبة لإزالة الجهود الداخلية بعد عملية اللحام، وإذا لم يتم إجراء المعالجة الحرارية بعد اللحام لسبائك النحاس المصلدة بالترسيب مثل سبائك نحاس- بريليوم فستكون الصلادة في منطقة اللحام متفاوتة بسبب حدوث التصليد بالتعتيق Aging الناتج عن حرارة اللحام.

جدول 4-1 درجات الحرارة النموذجية لإزالة الجهود بعد اللحام

المعدن	درجة الحرارة (°C)	المعدن	درجة الحرارة (°C)
نحاس نقي	260	براص	260
برونز الألمُنيوم Cu-Al	340	برونز السليكون Cu-Si	650

10-4 قابلية اللحام Weldability

مصطلح قابلية اللحام هو مصطلح نوعي، يشير إلى سهولة عملية اللحام لمادة معدنية معينة. ويستعمل بالأخص لتوصيف إمكانية استعمال طريقة لحام معينة لإتمام عملية اللحام لمعدن معين لإنتاج ملحومة لها غرض مخصص. ويمكن تعريف قابلية اللحام بشكل آخر على أنها ***القابلية لإمكانية إجراء اللحام بسهولة لقطعة معدنية معينة لإنتاج ملحومة لها خواص وخصائص معينة تلبي متطلبات الخدمة***.

من هذا التعريف يتبين للمتخصصين في اللحام أن قابلية اللحام تكون متفاوتة بين معدنٍ وآخر وكذلك تكون متفاوتة للمعدن نفسه في حالة استعمال طرائق لحام مختلفة، فقد تكون قابلية اللحام على سبيل المثال جيدة جداً للألمُنيوم أو سبائكه إذا استخدمت طريقة اللحام بأقطاب التنكستن والحجاب الغازي وفي الوقت نفسه تكون قابلية اللحام لهذه المعادن نفسها رديئة إذا استخدم لحام النقطة Spot Welding. وهنالك أمثلة كثيرة على هذا الموضوع، سيتمكن الطالب من معرفتها في أثناء دراسته وخبرته العملية في المستقبل إن شاء الله تعالى. وكذلك قابلية اللحام لها علاقة بكيفية أوضاع اللحام بسبب اختلاف طبيعة الجريان للمعادن، فمثلاً تكون قابلية اللحام جيدة مع الوضع الأفقي فقط للمعادن ذوات اللزوجة القليلة والجريان العالي، وفي هذا المجال لا بد للطالب أن يتذكر أوضاع اللحام المبيّنة في الشكل (4-30).

ولقابلية اللحام ثلاثة جوانب هي:

- **القابلية الميتالورجية Metallurgical Capacity**

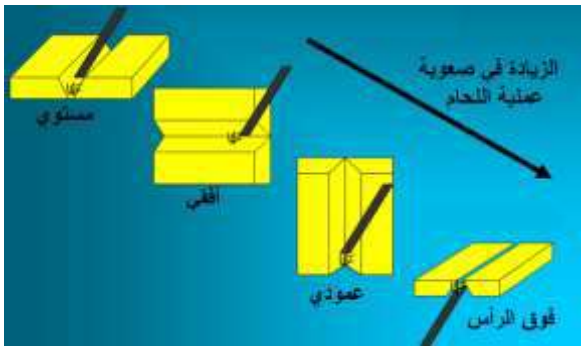
إذ سيتحد المعدن الأساس مع معدن اللحام من دون تكَون أطوار أو مكونات ضارة للملحومة.

- **السلامة الميكانيكية Mechanical Soundness**

ويجب أن تكون الملحومة خالية من العيوب مثل الفجوات، والمسامية الغازية، والانكماش، والخبث، والشقوق والتصدعات.

- **إمكانية الخدمة Serviceability**

إنتاج ملحومات لها القدرة على أداء ظروف الخدمة على سبيل المثال درجات الحرارة القصوى، الظروف التآكلية، الكلال، الضغوط العالية، وغيرها.



الشكل 4-30 أوضاع اللحام

أسئلة الفصل الرابع

س1) **املأ الفراغات الآتية بما يلائمها:**

1. إن ما يحدد حجم وشكل الحبيبات المتكونة بعد انجماد المواد المعدنية هو..... و.....
2. ترتبط ذرات جميع المواد المعروفة بروابط معينة، وهي: ..... و..... و..... وجميعها تُعد الروابط الأولية للمواد.
3. تتصف المعادن ذات الشبكة البلورية المكعبة متمركزة الجسم BCC بـ ..... و..... العاليتين و.....الواطئة نوعاً ما.
4. البيرلايت من مكونات الفولاذ وهي عبارة عن خليط من طور.....كمحلول جامد و.....كطور وسطي.
5. تتكون الأطوار المتوازنة فقط عند.....
6. تزداد صلادة المواد المعدنية بشكل كبير عند.....
7. لا يتكون طور المارتنسايت إلا إذا كانت نسبة الكاربون أعلى من.....
8. في الدورة الحرارية يُعد.....و.....المؤثران الكبيران على خواص الملحومات.
9. تبدأ حدود المنطقة المتأثرة بالحرارة HAZ من.....لغاية .....
10. يؤثر معدل التبريد على الخواص الميكانيكية للمنطقة المتأثرة بالحرارة، إذ يقل بزيادة .....و.....بينما يزداد مقداره بـ .....
11. تعرف المنطقة الفاصلة على إنها منطقة ضيقة محصورة ما بين .....والمنطقة.....
12. عنصر.....هو النقطة الجوهرية في تصليد الفولاذ عند تسخينه ومن ثم إخماده، حيث أن زيادة نسبته تؤدي إلى الحصول على .....أعلى.
13. تؤدي معدلات التبريد السريعة إلى تكون طور ..... إذا كانت نسب الكاربون مرتفعة في الفولاذ أو الفولاذ السبائكي.
14. من الصعوبة إجراء اللحام.....على سبائك الفولاذ عالي الكربون وسبائك حديد الزهر من دون أخذ الاحتياطات اللازمة.
15. تصلد سبائك النحاس وتقوى بطريقتين، هما: .....و.....

س2) **عرّف الآتي:**

ميتالورجيا المعادن، السحابة الإلكترونية Electronic Cloud، نقطة اليوتكتك Eutectic Point، الشبكة البلورية، التحول الطوري Phase Transformation، المعالجات الحرارية للملحومات، كثافة الطاقة الحرارية الداخلة، المعادن غير الحديدية Non-Ferrous، قابلية اللحام Weldability.

س3) وضّح آلية انجماد المعادن، معززاً إجابتك بالرسم.

س4) ما هو معامل الرص؟ وما الفائدة من حسابه ومعرفة قيمته؟

س5) كيف تحدث ظاهرة التحولات التآصلية؟ أعط مثالاً واضحاً لهذه الظاهرة، وما أهمية حدوثها في المعادن؟

س6) ما هي مخططات الأطوار؟ وما الضرورة من رسم تلك المخططات؟

س7) وضّح مع الرسم مثالاً لحالات تطور البُنى المجهرية لنظام سبائكي يوتكتيكي بحالة التوازن عند التبريد البطيء.

س8) كيف تتم السيطرة على معدل سرعة التبريد عند اللحام؟

س9) ما هي أهم أوجه التشابه والاختلاف بين عمليتي السباكة واللحام؟

س10) على ماذا تعتمد البنية المجهرية للمنطقة المنصهرة بالكامل (FZ) والمنجمدة مرة أخرى؟

س11) عدد أهم أنواع اللحام اعتماداً على أسلوب اللحام من حيث استعمال أقطاب اللحام، أعطِ مثالاً للحام كل نوع منها.

س12) ما هي العوامل المؤثرة على خواص المنطقة المتأثرة بالحرارة؟

س13) ما هي أنواع السبائك المعدنية من حيث التغيير في نوع البلورة عند ارتفاع درجات الحرارة بالتسخين؟ أعطِ مثالاً وقارن بين مناطق اللحام المختلفة لكلٍ منها، موضحاً إجابتك بالرسم.

س14) ما هي الهشاشة الهيدروجينية Hydrogen Cracking؟ وما هي العوامل التي تساعد على حدوثها أثناء اللحام؟ وكيف يتم منع حدوثه؟

س15) عدد أهم الإرشادات والقواعد للحام الفولاذ السبائكي والفولاذ الكربوني.

س16) وضّح ظاهرة اضمحلال اللحام Weld Decay، وما هي مسبباتها؟ وكيفية علاجها.

س17) وضّح آلية حدوث التليين في منطقة اللحام لسبيكة الألُمنيوم- منغنيز مصلدة بالتشكيل على البارد، عزز إجابتك بالرسم.

س18) **علل ما يأتي:**

1. نادراً ما تستعمل المعادن النقية في العمليات التصنيعية والشائع هو استعمال سبائك معدنية تتألف من معدنين أو أكثر.
2. تكَون الأطوار الوسطية.
3. عدم ظهور طور المارتنسايت في مخطط الأطوار المتوازن.
4. يمكن إنجاز عملية اللحام بطريقة الحزمة الإلكترونية بمسافة ضيقة وعميقة جداً في آنٍ واحد.
5. تكون البنية المجهرية في منطقة بركة اللحام على شكل حبيبات طولية عمودية على خط اللحام باتجاه المعدن الأساس.
6. تحتاج بعض ملحومات الفولاذ الكربوني أو السبائكي إلى معالجة حرارية (إزالة الإجهادات).
7. من الضروري إجراء عملية التسخين المسبق لعملية اللحام لسبائك الفولاذ.
8. العناية الخاصة عند لحام الألمنيوم وسبائكه.
9. فشل المنطقة المتأثرة بالحرارة HAZ أثناء الخدمة لملحومات الألمنيوم وسبائكه وخاصة السبائك المصلدة حرارياً بالترسيب والشغل على البارد قبل اللحام.
10. ضرورة التسخين المسبق قبل اللحام للمقاطع السميكة المطلوب لحامها من سبائك النحاس.

الفصل الخامس

جودة اللحام
Weld Quality

الأهداف

الهدف العام

في هذا الفصل سيتمكن الطالب من معرفة المبادئ الأساس لاختبارات اللحام الاتلافية واللاإتلافية لكشف عيوب وصلات اللحام والتعرف إلى أنواع عيوب اللحام وطرائق تجنبها ومعالجتها .

الأهداف الخاصة: بعد الانتهاء من دراسة مفردات الفصل الخامس سيتمكن الطالب من فهم الآتي:

1. أنواع عيوب اللحام.
2. أسباب حدوث وطرائق معالجة الشقوق في وصلات اللحام.
3. أسباب حدوث وطرائق معالجة الفجوات في وصلات اللحام.
4. أسباب حدوث وطرائق معالجة العوالق الصلبة في وصلات اللحام.
5. أسباب حدوث وطرائق معالجة ضعف الانصهار والتغلغل في وصلات اللحام.
6. أختبارات اللحام.

جودة اللحام Weld Quality

1-5 مقدمة Introduction

شهد العالم في الآونة الأخيرة تطوراً تكنولوجياً ملحوظاً في مختلف القطاعات الصناعية ومنها الصناعات النفطية وصناعة السيارات والطائرات والسفن وبناء الجسور المعدنية وغيرها. وتزامناً مع هذا التطور زادت الحاجة للحصول على وصلات لحام ذات جودة عالية يمكن الوثوق بها. فقد يؤدي انهيار جزء من خط اللحام في مثل هذه الصناعات إلى خسائر كبيرة في الأرواح والأموال، لذلك فمن الضروري فحص واختبار خطوط اللحام ولاسيما الخطوط الحرجة والهامة للتأكد من جودتها وموثوقيتها تلافياً لنمو شق في خط اللحام قد يتسبب في كارثة في المنشآت الصناعية. فقد كان انهيار منصة الكسندر كيللاند (Alexander Kielland Platform) البحرية النرويجية لضخ النفط عام 1980م وغرقها بشكل كامل والذي أدى إلى خسارة فادحة بأرواح العاملين في المنصة بسبب نمو شق إجهادي في خط لحام هو خير دليل على خطورة الإهمال في فحص واختبار خطوط اللحام، وهنالك أمثلة عديدة على كوارث حدثت في منشآت صناعية بسبب خطوط لحام معيبة لا يتسع المجال لذكرها.

بعد أن تعرف الطالب في الفصول الأربعة من هذا الكتاب على طرائق وميتولورجيا اللحام سيتم في هذا الفصل دراسة أنواع عيوب اللحام وطرق تجنبها ومعالجتها وطرق اختبار وصلات اللحام باستعمال الاختبارات الإتلافية واللاإتلافية (NDT) بهدف الحصول على لحام ذي جودة عالية .

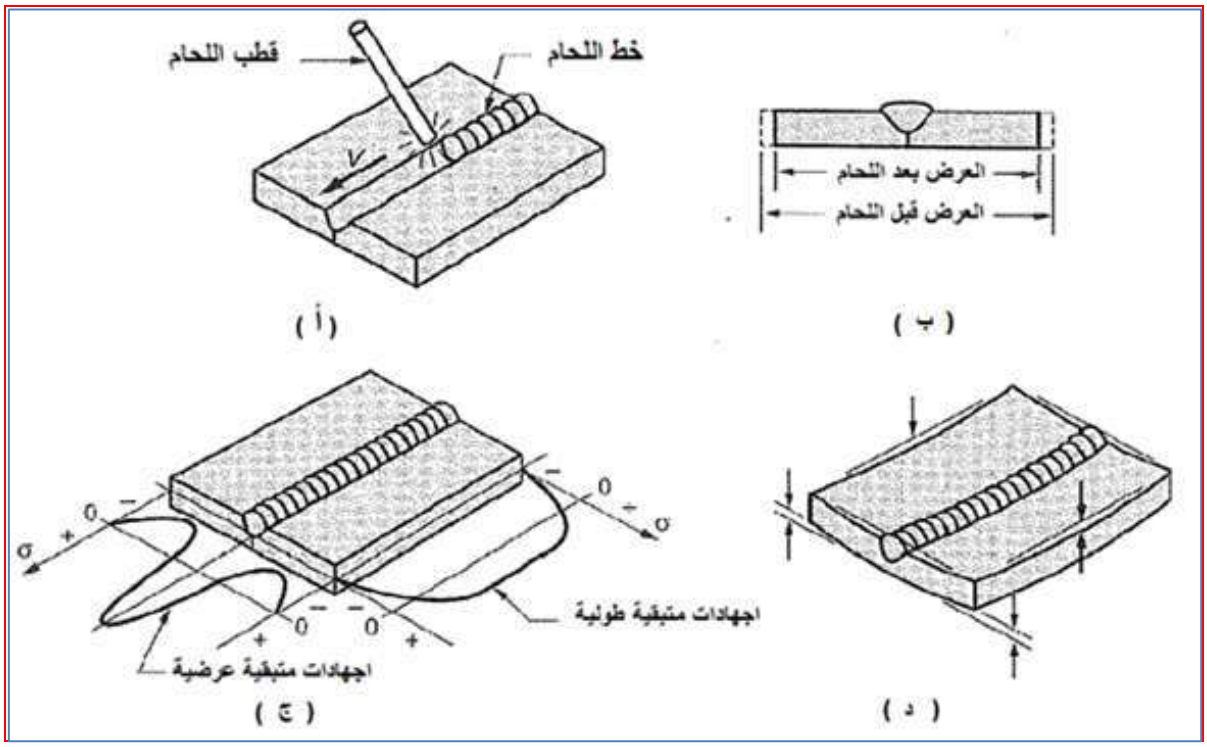
يعتمد ضمان الاعتمادية والموثوقية في خطوط اللحام على المراقبة الدقيقة لعملية تنفيذ اللحام بدءاً من التصاميم الأولية لوصلة اللحام إلى أن يتم قبول اللحام واعتماده من مفتش اللحام وذلك حسب تعليمات ومواصفات وأنظمة معتمدة من المنظمات الدولية المتخصصة في عملية اللحام وجودته ومن هذه المنظمات المعهد الدولي للحام (The International Institute of Welding IIW)، والجمعية الأمريكية للهندسة الميكانيكية (American Society of Mechanical Engineers ASME)، والجمعية الأمريكية للحام (American Welding Society AWS) وغيرها. وتقع مسؤولية ضمان جودة اللحام وخلوه من العيوب على المصممين وإدارة المشروع والمواد واللحامين والمشرفين والمفتشين وكل حسب دوره وينبغي على الفاحصين أن تكون لهم دراية كافية باستعمال الأجهزة الحديثة لفحص جودة اللحام بشكل علمي ودقيق ويمتلكون من الخبرة التي تمكنهم من أداء مهمتهم بشكل متقن.

2-5 الإجهادات المتبقية والتشوهات Residual Stresses and Distortions

إن الغرض من عملية اللحام هو ربط قطعتين أو أكثر للحصول على قطعة واحدة وبجودة عالية. وتؤثر عوامل عديدة على جودة اللحام منها التسخين والتبريد السريعين للقطعة الملحومة أثناء عملية اللحام وبالأخص لحام القوس الكهربائي، إذ يؤدي التسخين والتبريد السريعين في مناطق اللحام إلى تمدد وتقلص حراري في الملحومة (Weldment) مما يسبب تكون إجهادات متبقية (Residual Stress) وتشوهات تقلل من جودة القطعة الملحومة، وكما مبين في الشكل (5-1).

إذ يوضح الشكل (5-1/أ) عملية اللحام بالقوس الكهربائي لقطعتين مربوطين بشكل تقابلي وعملية اللحام تبدأ من جهة وتنتقل إلى الجهة المقابلة وبسرعة معينة، وأثناء هذه العملية تتشكل بركة اللحام من معدن المادة المراد لحامها ومعدن الإضافة، فتحدث عملية الانجماد السريع خلف القوس الكهربائي.

والشكل (5-1/ب) يوضّح التقلص العرضي للقطعة الملحومة بعد عملية اللحام بالقوس الكهربائي. يتمدد خط اللحام نتيجة الحرارة العالية التي تولد إجهادات طولية، بينما تكون المناطق المحيطة بخط اللحام باردة وتتقلص وتتولد بها إجهادات عرضية، وكما مبيّن في الشكل (5-1/ج)، وبذلك تتعرض الملحومة إلى تمدد طولي وتقلص عرضي يؤدي إلى تشوهها وانبعاجها، وكما مبيّن في الشكل (5-1/د).



الشكل 5-1 الإجهادات المتبقية والتشوهات بعد عملية اللحام بالقوس الكهربائي

ويمكن تلافي حدوث التشوهات والإجهادات المتبقية من خلال الطرائق الآتية:

- التثبيت الجيد للقطعة المراد لحامها ومنع حركتها في أثناء عملية اللحام.
- الاختيار الأمثل للعوامل المؤثرة على عملية اللحام، مثل كمية الحرارة الداخلة، وسرعة اللحام، وكمية مادة الإضافة، وعدد التمريرات، وغيرها.
- تسخين القطعة الملحومة قبل عملية اللحام والمحافظة على هذه الدرجة ما بين التمريرات مما يؤدي إلى تقليل مستوى الإجهادات الحرارية التي تسبب التشوهات في القطعة الملحومة.
- إجراء المعاملات الحرارية الخاصة بإزالة الإجهادات المتبقية بعد إكمال عملية اللحام.
- إعداد التصاميم المناسبة للقطع المراد لحامها بشكل يؤدي إلى تقليص التشوهات والإجهادات المتبقية.

3-5 عيوب اللحام Weld Defects

يمكن تعريف عيوب اللحام بانها الانقطاعات أو الفجوات التي تحصل في بناء خط اللحام والتي قد تسبب رفض القطعة الملحومة وعدم مطابقتها للمعايير والمواصفات المعتمدة في جودة اللحام وتحصل هذه العيوب بسبب وجود فجوة غازية، أو وجود مادة غريبة كالخبث في داخل خط اللحام، وأحيانا تحدث هذه العيوب لعدم اكتمال انصهار المعدن.

ومن الجدير بالذكر، لا تُعد جميع الانقطاعات أو الفجوات في بناء خط اللحام عيباً من عيوب اللحام، فهناك انقطاعات أو فجوات تصنف كعيب ومنها ما يصنف كعيب يمكن قبوله. فالعيب يُعرّف على أنه انقطاع أو مجموعة انقطاعات والتي بطبيعتها أو بسبب تجمع تأثيرها قد تسبب رفض قبول اللحام، وعليه فهناك انقطاعات حسب هذا التعريف لا تسبب رفض قبول اللحام لأنها تقع ضمن الحدود المسموح بها حسب المعايير والمواصفات المعتمدة في جودة اللحام.

يُعرّف خط اللحام المعيب على أنه أي خط لحام يحتوي على عيب أو أكثر وعدم مطابقته للمعايير والمواصفات المعتمدة في جودة اللحام. فأحيانا يتم رفض قبول خط لحام في إحدى القطاعات كالقطاع النفطي بسبب انقطاع في بناء خط لحام ومصنف كعيب حسب قوانين هذا القطاع، ولكن الانقطاع نفسه يتم قبوله في قطاع آخر لأنه يقع ضمن الحدود المسموح بها وغير مصنف كعيب حسب قوانين ذلك القطاع، إذ أن المعايير والمواصفات المعتمدة في جودة اللحام وتصنيف خط اللحام كعيب تختلف من قطاع إلى آخر.

وتقسم عيوب اللحام إلى ستة أصناف وذلك حسب تصنيف المعهد الدولي للحام
The International Institute of Welding (**IIW**)
وهي كالاتي:

الصنف الاول: الشقوق (Cracks) مثل الشقوق الطولية والعرضية والمتشعبة.

الصنف الثاني: الفجوات (Cavities) مثل الفجوات الغازية والمسامات السطحية والداخلية والانكماش.

الصنف الثالث: الشوائب الصلبة (Solid Inclusions) وتشمل احتجاز مساعدات الصهر والخبث ونواتج تعرية أقطاب التنكستن وأكاسيد المعادن وغيرها.

الصنف الرابع: نقص الانصهار والتغلغل (Incomplete Fusion and Penetration)

الصنف الخامس: الشكل غير التام (Imperfect Shape) مثل القطع السفلي والتراكب ونقص الملء وغيرها.

الصنف السادس: العيوب المتفرقة (Miscellaneous Defects) مثل الترشش الزائد والسطح الخشن وغيرها.

سيتم توضيح الأصناف الستة لعيوب اللحام وطرائق تجنبها بشكل تفصيلي فيما يأتي:

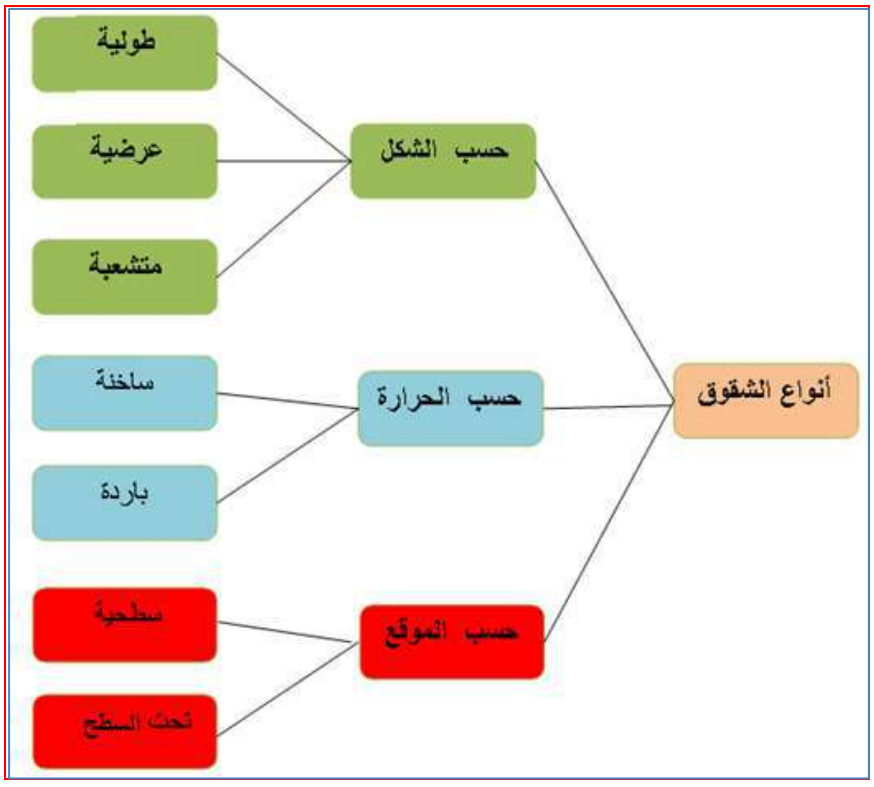
أولاً: الشقوق (Cracks)

الشقوق تمثل إحدى عيوب وصلات اللحام التي تقوم بتقليل مقاومة وقوة خط اللحام وتتسبب في حدوث انهيار مفاجئ في القطع الملحومة لذلك يجب إصلاح الشقوق دائماً ولا يتم قبول اللحام في حالة وجودها. وتزداد خطورة الشقوق مع التحميل التصادمي مثل الطائرات لحظة هبوطها والسيارات وكذلك حينما يكون اللحام مصمماً للخدمة في ظروف باردة، ويوضّح الشكل (5-2) تصنيف الشقوق التي قد تحصل في وصلات اللحام، بينما يوضّح الشكل (5-3) تصنيف الشقوق حسب الشكل.

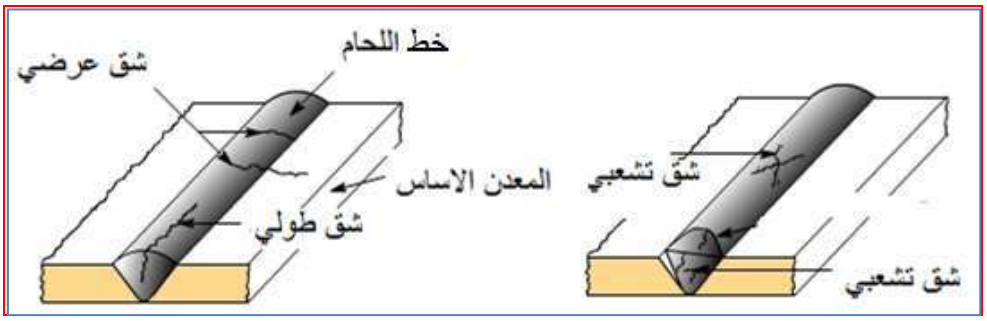
وتتكون الشقوق بسبب تعرض اللحام لتباين كبير في درجات الحرارة وكما في الحالات الآتية:

- التبريد السريع لوصلة اللحام.
- عدم التسخين المسبق لمنطقة اللحام.
- عدم تتابع عمليات لحام الوصلة وترك خط اللحام يبرد قبل اكتمال اللحام.
- استعمال القطب (الإلكترود) الخاطئ بسبب نوع المعدن مثل انخفاض مطيلية معدن القطب أو أن يكون مصنوع من سبيكة لا تمتلك التركيب الكيمياوي نفسه.

وعند وصول درجة حرارة القطعة الملحومة أثناء عملية اللحام إلى درجات مرتفعة تحدث الشقوق الساخنة لحظة تجمد بركة اللحام المنصهرة أي عند انتقال المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة. أما الشقوق الباردة فتحدث بعد انتهاء عملية التبريد، أي: بعد وصول وصلة اللحام إلى درجة حرارة الغرفة نتيجة انتشار الهيدروجين في الملحومة.



الشكل 5-2 أنواع الشقوق

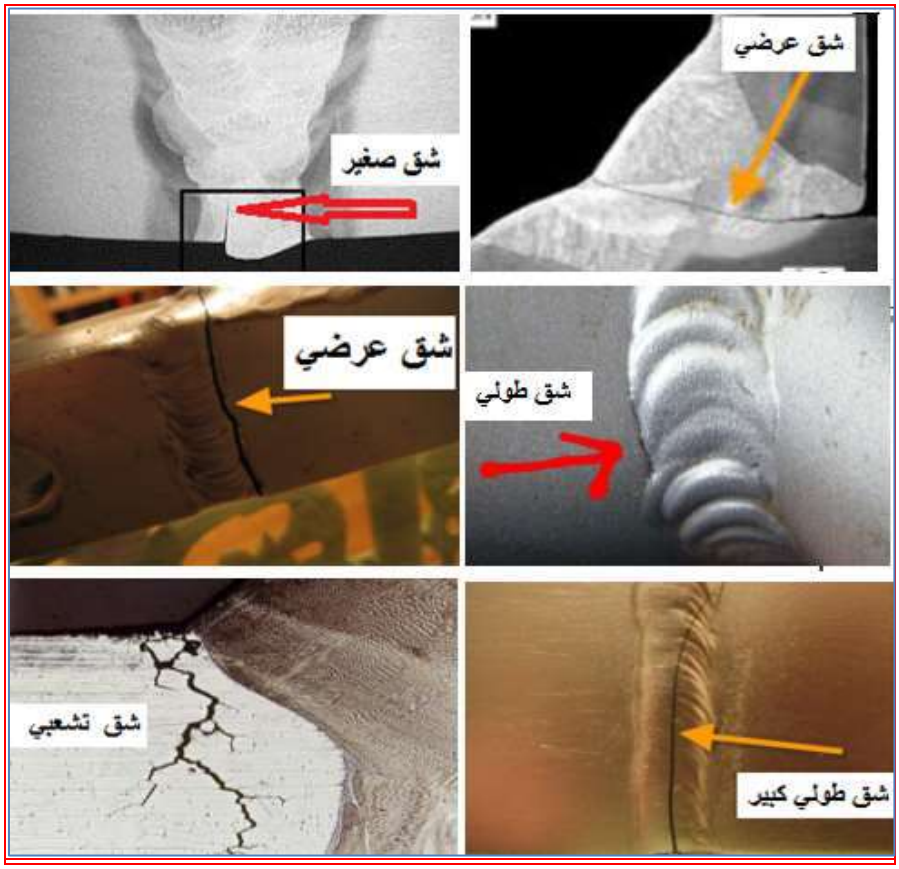


الشكل 5-3 الشقوق حسب الشكل

والشكل (5-4) يوضّح أحجام الشقوق المختلفة فمنها الشقوق الكبيرة التي يمكن رؤيتها بالعين المجردة وبعضها تكون متوسطة الحجم والبعض الآخر لا ترى إلا باستخدام المجهر الضوئي.

ويمكن تجنب حدوث تكون الشقوق باتباع الخطوات الآتية:

- استعمال التسخين المسبق وتتابع إجراء خطوط اللحام للتقليل من معدل التبريد.
- تجنب التبريد السريع لخط اللحام وتركه يبرد تدريجياً.
- اختيار القطب (الإلكترود) المناسب.
- استعمال سلك لحام ذا مطيلية مناسبة.

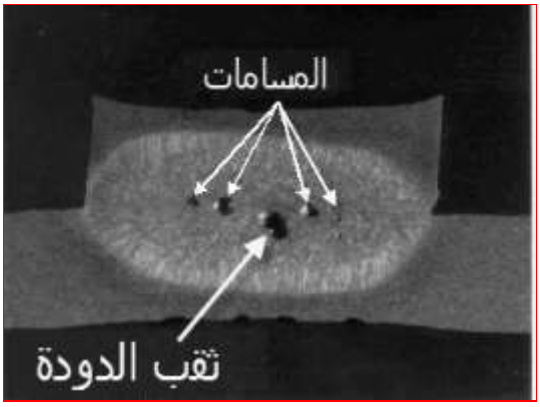


الشكل 5-4 شقوق مختلفة في وصلات اللحام

ثانياً: الفجوات Cavities الفجوات شكل من أشكال عيوب اللحام وتشمل المسامات (Porosity) وفراغات التقلص نتيجة انجماد المعدن المنصهر (Shrinkage Voids) وقد تتولد الفجوات بسبب وجود شوائب في منطقة اللحام والتي تتبخر بسبب حرارة اللحام مكونة فقاعات غازية قد تنحصر داخل خط اللحام وقد تتولد المسامات وأنواع الغازات بسبب ما يأتي:

- بخار الماء والذي يأتي من وجود بخار ماء في القطب (الإلكترود) أو الهواء الجوي أو منطقة اللحام أو مع غاز الحماية.
- الهواء الجوي بسبب الرياح أو التيارات الهوائية.
- أبخرة الشحوم أو الزيوت أو الدهان الموجود في منطقة اللحام.

يمكن أن تأخذ المسامات الشكل الأسطواني ويطلق عليها اسم الثقب الدودي (Worm holes)، وكما مبيّن في الشكل (5-5).

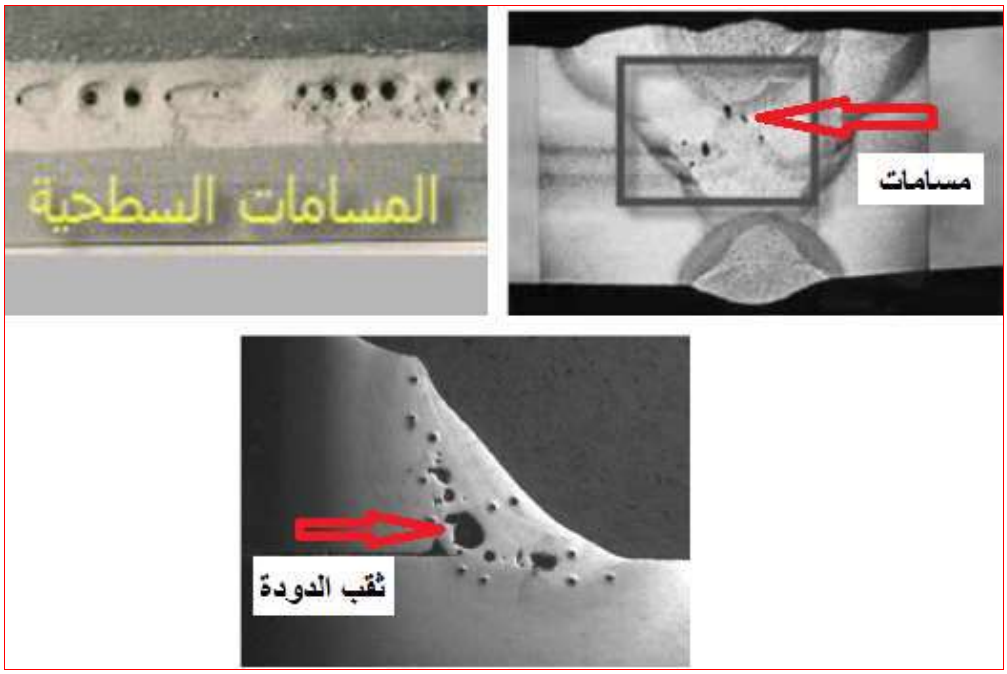


الشكل 5-5 الثقب الدودي

الشكل (5-6) يمثل صوراً لأنواع الفجوات في وصلات اللحام.

ولتجنب الفجوات داخل وصلات اللحام يمكن اتباع الخطوات الآتية:

- تنظيف منطقة اللحام والمنطقة المتأثرة باللحام والمحافظة على نظافة الملحومة.
- تجفيف الأقطاب ولاسيما منخفضة الهيدروجين بدرجات حرارة (300-350°C) ولمدة ساعة إلى ثلاث ساعات.
- رفع شدة التيار وبما يتلاءم وقطر القطب.
- فحص نظام التبريد في منظومات اللحام المزودة بها كما في طريقة MIG/MAG أو TIG للتأكد من عدم وجود تسريب.



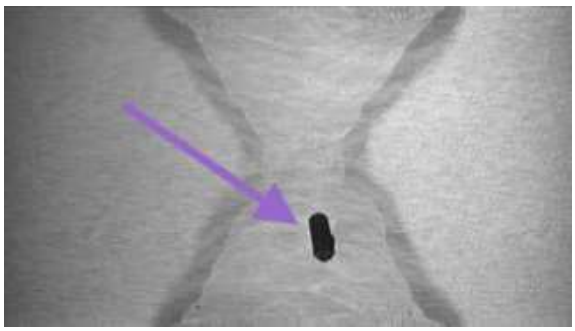
الشكل 5-6 صور أنواع الفجوات في وصلات اللحام

ثالثا: الشوائب الصلبة Solid Inclusions الشوائب الصلبة هي عيب في خط اللحام بسبب احتباس مواد صلبة غريبة (لا معدنية) داخل البنية الداخلية لمنطقة اللحام. وأشهر أنواع الشوائب الصلبة هو الخبث الذي يحتبس على شكل شوائب في بركة اللحام أثناء تجمد المعدن.

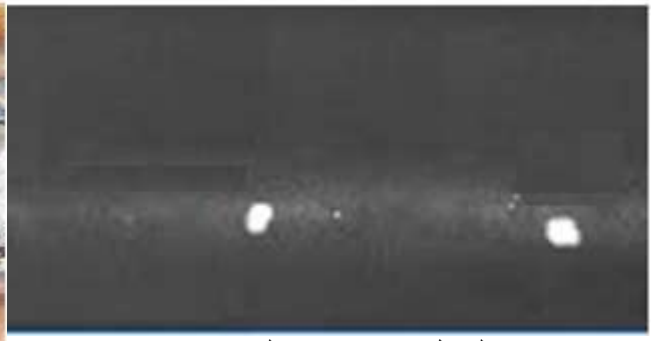
وتتكون الشوائب الصلبة عند إجراء العمليات المختلفة للقوس الكهربائي التي تستعمل مساعد الصهر (Flux) أو أقطاب التنكستن، فمثلا تتكون طبقة الخبث فوق خط اللحام في لحام القوس الكهربائي اليدوي (SMAW)، وقد تدخل نواتج تعرية أقطاب التنكستن وتستقر في بركة اللحام وتكون نوعاً من الشوائب الصلبة (معدن التنكستن) أثناء عملية اللحام بطريقة لحام القوس الكهربائي بأقطاب التنكستن (TIG). أحياناً تتكون الشوائب نتيجة ترسب طبقة من الأكاسيد داخل خط اللحام مثل تكون طبقة سطحية من أكاسيد الألمنيوم (Al_2O_3) داخل خط اللحام، وكما موضّح في الأشكال (5-7) و (5-8) و (5-9).

ولتفادي تكون الشوائب الصلبة داخل خط اللحام فيجب اتباع الخطوات الآتية:

- إزالة طبقة الخبث المتجمدة بعد لحام كل طبقة.
- ضبط زوايا اللحام الصحيحة



الشكل 5-7 طبقة الخبث



الشكل 5-8 معدن التنكستن
(نقاط بيضاء تكشف بواسطة x-ray)

الشكل 5-9 طبقة الأكاسيد

رابعاً: النقص في الانصهار أو التغلغل Incomplete Fusion or Penetration

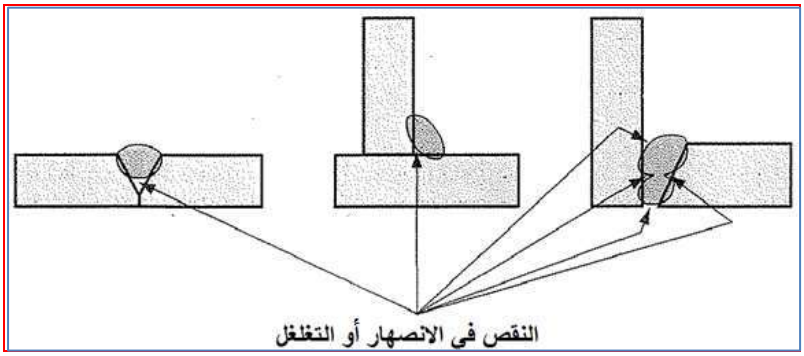
النقص في الانصهار أو التغلغل هو احد عيوب اللحام التي تمثل عدم اكتمال انصهار سلك اللحام مع المعدن الأساس أو عدم تغلغل الحرارة الكافية لصهر جذر المعدن الأساس مما يؤدي إلى وجود فراغ بين خط اللحام والمعدن الأساس وعدم اندماجهما.

ويمكن توضيح أهم أسباب النقص في الانصهار أو التغلغل بالآتي:

- قلة الحرارة الواصلة لمنطقة اللحام والتي أما أن تكون بسبب شدة التيار المنخفضة أو أن تكون سرعة اللحام زائدة عن الحد المطلوب وأحيانا يعزى سبب قلة الحرارة الواصلة لمنطقة اللحام إلى الاختيار غير الصحيح لقطر القطب.
- فتحة الجذر في الوصلة التقابلية غير مناسبة إما كبيرة أو صغيرة.
- عدم نظافة سطح المعدن قبل اللحام.

ولتجنب حدوث النقص في الانصهار أو التغلغل فيجب اتباع الخطوات الآتية:

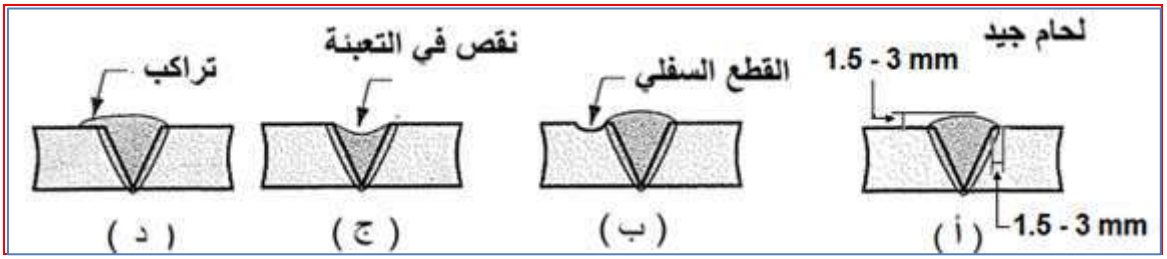
- ضبط سرعة اللحام لتكون مناسبة وضمن الحدود المسموح بها.
- استعمال مقاس القطب المناسب.
- اختيار قيمة تيار ملائمة لقطر القطب للحصول على تغلغل مناسب وضمن الحدود المسموح بها.
- المحافظة على طول قوس مناسب.
- إزالة طبقة الصدأ الثقيلة التي على سطح المعدن بالكامل وإزالة الشحوم أو الزيوت أو الدهون.
- يوضّح الشكل (5-10) بعض المواقع التي يحصل عندها نقص في الانصهار والتغلغل.



الشكل 5-10 المواقع التي يحصل عندها نقص في الانصهار والتغلغل.

خامساً: الشكل غير التام Imperfect Shape

الشكل غير التام لخط اللحام هو عيب من عيوب وصلات اللحام إذ يجب أن يكون شكل خط اللحام متكامل ويأخذ شكله المناسب للحفاظ على مقاومة عالية لوصلة اللحام، وكما مبيّن في الشكل (5-11/أ)، وهناك عدد من العيوب المصنفة ضمن عيوب الشكل غير التام ومنها القطع السفلي (Undercut) الذي يُعد من أخطر هذه الأنواع على مقاومة اللحام شكل (5-11/ب)، ويوجد عدد من العيوب المصنفة الأخرى مثل النقص في التعبئة (Underfill) كما موضّح في الشكل (5-11/ج)، والتراكب في خط اللحام (Overlap) وكما موضح في الشكل (5-11/د).



شكل (5-11) بعض من أنواع عيوب الشكل غير التام

يُعد القطع السفلي من العيوب الخطيرة لسلوكه كمركزات للإجهادات في وصلة اللحام لاسيما عند استعمال الملحومة في الظروف الباردة أو حينما تكون معرضة للتحميل التصادمي أو التحميل الدوري (إجهادات الكَلاَل Fatigue Stress).

ولتجنب حدوث النقص في القطع السفلي لابد من اتباع الخطوات الآتية:

- استعمال حركة تموجية أو هلالية منتظمة مع التوقف عند طرفي خط اللحام.
- استعمال المقاس الصحيح للقطب وذلك حسب سمك المعدن وعدد التمريرات المطلوبة.
- استعمال التيار المناسب لمقاس القطب.
- ضبط زاوية عمل القطب الصحيحة.

سادساً: العيوب المتفرقة Miscellaneous Defects

العيوب المتفرقة هي عيوب اللحام التي تشمل: صعقة القوس (Arc Strikes)، وعيب الترشش المفرط (Excessive Spatter). وتحدث صعقة القوس حينما يلامس اللّحام المعدن الأساس بالقطب عن طريق الخطأ وذلك في المنطقة المجاورة لخط اللحام وكما موضّح في الشكل (5-12). ويتم في بعض التطبيقات وضع غلاف حماية حول الجزء المراد لحامه وذلك لمنع حدوث عيب صعقة القوس.

ويحدث عيب الترشش المفرط بسبب نفخ القوس مما يسبب تناثر قطرات معدن الإضافة حول خط اللحام. إن أسباب النفخ هي الاختيار الخاطئ للقطب أو التيار أو أسلوب اللّحام، وكما موضّح في الشكل (5-13).

وللتقليل من حدوث الترشش المفرط يمكن اتباع الخطوات الآتية:

- استعمال التيار المتردد AC وذلك للتقليل من نفخ القوس.
- الحفاظ على طول قوس مناسب.
- استعمال نوع وقطر قطب مناسبين وبما يتلاءم وشدة التيار وموضع اللحام.

الشكل 5-12 عيب صعقة القوس

الشكل 5-13 عيب الترشش المفرط

4-5 اختبارات اللحام Welding Tests

اختبارات اللحام هي علم يهتم بطرائق فحص واختبار وصلات اللحام للحصول على الجودة المطلوبة على وفق مواصفات قياسية تستعمل للحكم على جودة اللحام منها (ASME, AWS, API). والاختبار يضم مجموعة من الإجراءات تبدأ بمرحلة التصميم وتنتهي بالقبول النهائي لوصلة اللحام، ولا يهتم علم اختبارات اللحام بالحصول على لحام مثالي خالٍ من العيوب تماماً ولكن يركز على تنفيذ خط لحام مناسب للتطبيق الذي يستعمل فيه وضمن مواصفات قياسية لذلك التطبيق.

تنقسم اختبارات اللحام لضمان جودة اللحام للخدمة المتوقعة منه إلى ثلاثة أنواع، وهي:

- الفحص البصري Visual Inspection
- الاختبارات الإتلافية Destructive Tests
- الاختبارات اللاإتلافية Non Destructive Tests

1-4-5 الفحص البصري Visual Inspection

الفحص البصري هو أحد طرائق الاختبارات اللاإتلافية ويتم فيه فحص جودة اللحام باستعمال البصر وبمساعدة أدوات القياس والمحددات، ويُعد الفحص البصري من أكثر الاختبارات اللاإتلافية شيوعا واستعمالاً، ويستعمل لفحص العيوب البسيطة والسطحية، ويساعد على اكتشاف أخطاء اللحام مبكراً ويمتاز بسهولة تطبيقه وسرعة إجرائه ورخص تكلفته.

العُدد المساعدة للفحص البصري:

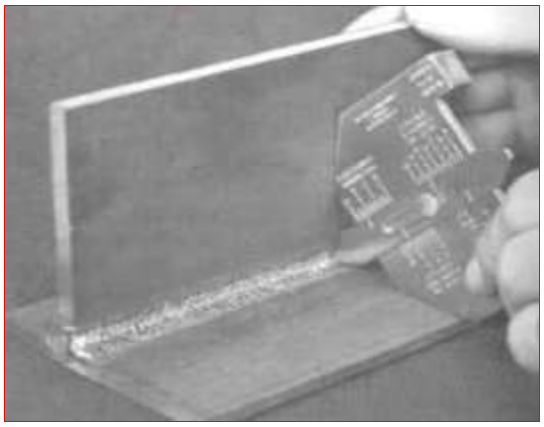
1. عدسة مكبرة: لاستعمالها عند الحاجة لتكبير منطقة الفحص.
2. كشاف: لاستعماله لإنارة الأماكن المظلمة مثل داخل المواسير أو الفحص الليلي.
3. مرآة: لاستعمالها في فحص المناطق الضيقة والتي يصعب الوصول إليها.
4. حقيبة الأدوات: تستعمل لوضع أدوات الفحص بداخلها لحفظها من الضياع والتلف.
5. عدة قياس جسر الحدبة Bridge Cam Weld Gauge: يستعمل لقياس عمق القطع السفلي.
6. عدة قياس أبعاد منطقة اللحام Weld Size Gauge : يستعمل لقياس عمق اللحام الزاوي وارتفاع اللحام.
7. عدة قياس أبعاد منطقة اللحام الرقمي Digital Welding Gauge: يستعمل لقياس أبعاد منطقة اللحام.
8. عدة قياس أبعاد اللحام الزاوي Piece Fillet Weld Set: يستخدم لفحص عمق اللحام الزاوي.

الشكل (5-14) يوضّح بعض الأدوات المساعدة التي يفضل أن يحملها الفاحص، والشكل (5-15) يوضّح عدة قياس أبعاد منطقة اللحام.

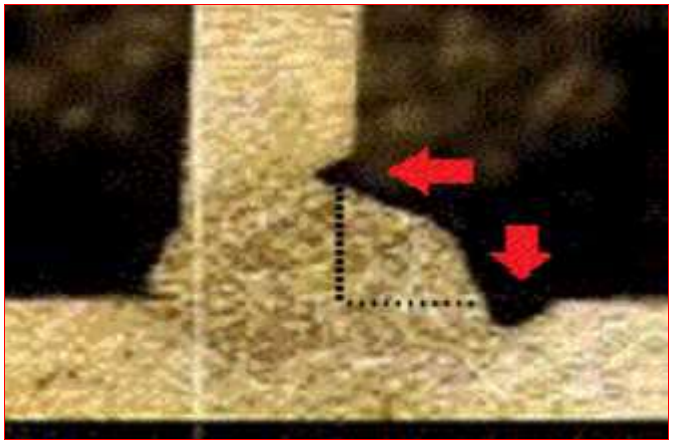
يستعمل الفحص البصري للتأكد من خلو منطقة اللحام من العيوب السطحية الظاهرة أو قياس العيوب للتأكد أنها ضمن الحدود المسموح بها للخدمة المتوقعة لها وكما موضّح في الشكل (5-15).

الشكل (5-16) يوضّح القطع السفلي في منطقة اللحام.

الشكل 5-14 العُدد اليدوية المساعدة للفحص البصري



الشكل 5-15 الفحص بعُدة قياس أبعاد منطقة اللحام



الشكل 5-16 القطع السفلي

5-4-2 الاختبارات الإتلافية

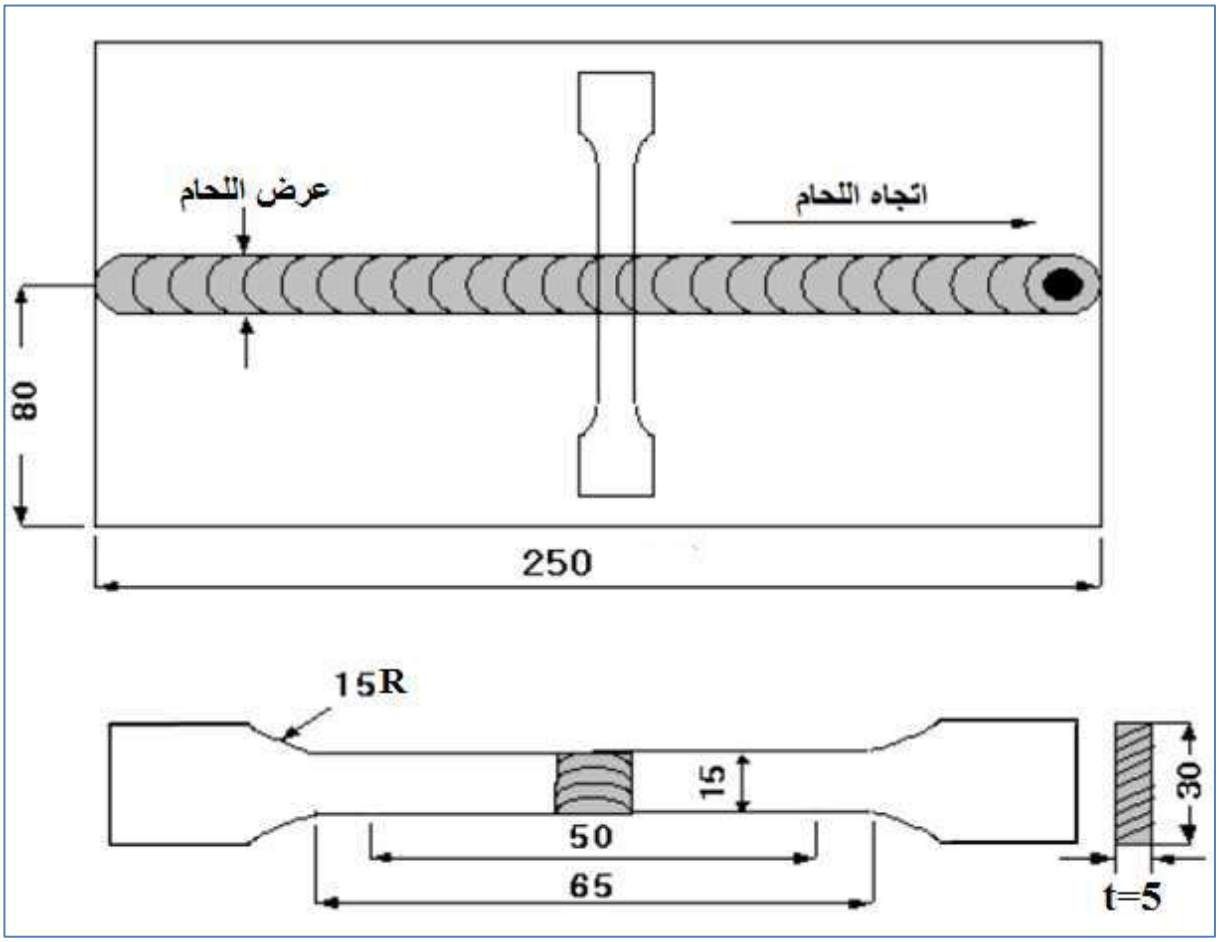
هي طرائق اختبار يتم فيها فحص جودة اللحام من خلال إتلاف عينة اللحام، وقد تتطلب عينات منتخبة من ملحومة يتم اختيارها لتمثل باقي وصلات اللحام. فعند لحام الوصلات الاختبارية لابد أن تكون ظروف التحضير للحام وتركيب المعدن الأساس ومواد اللحام وطرائق اللحام والمعالجة الحرارية مشابهة تماماً للإجراءات المقترح استخدامها في تنفيذ عمليات اللحام، وتتم هذه الاختبارات على وفق معايير خاصة من حيث حجم ومقاسات العينة وكذلك طريقة تجهيزها قبل إجراء الاختبار عليها، ويوجد عدد من الاختبارات الاتلافية التي تختلف حسب القوانين والأنظمة التي تغطيها وهي كالآتي:

- اختبار الشد Tensile Test
- اختبار الانحناء Bending Test
- اختبار الصلادة Hardness Test
- اختبار الكسر المفاجئ Nick Break Test

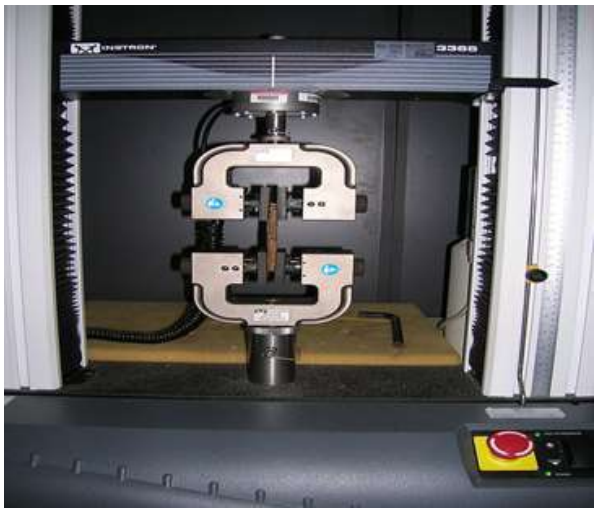
وسيتم التركيز في هذا الفصل على نوعين من الاختبارات المشهورة فقط، وهما (اختبار الشد، واختبار الانحناء).

أولاً: اختبار الشد Tensile Test

يتكون اختبار الشد من تعريض عينة الاختبار للفشل بتسليط حمل شدي معلوم عليه. ويتم تحضير عينات الشد على وفق مواصفات قياسية وتؤخذ عينات الاختبار القياسية في الاتجاه المستعرض أو الطولي لخط اللحام، ويتم تحضير عينات الشد على وفق مواصفات قياسية وبحسب الجمعية الأمريكية (ASME)، الشكل (5-17) يوضّح نموذج من عينة فحص الشد لوصلة ملحومة وأبعادها التي تعتمد بالدرجة الأساس على سمك العينة (t)، وتؤخذ عادة عينات الشد في الاتجاه المستعرض للعينة. ولمعرفة مقاومة المعدن الأساس تحضر عينات قياسية منه ليتم تعريضها إلى اختبار شد وبالتالي يمكن مقارنة مقاومة عينات الاختبار القياسية لوصلات اللحام مع عينات المعدن الأساس. فإذا كانت مقاومة المعدن الأساس اعلى من مقاومة وصلات اللحام يحدث الفشل لعينات الاختبار القياسية في منطقة اللحام وهذه الحالة غير مرغوب فيها وإذا حدث الفشل خارج اللحام والمنطقة المتأثرة بالحرارة لكون معدن اللحام أعلى مقاومة شد من معدن الأساس فان هذا يدل على نجاح عملية اللحام، ويتم تثبيت عينات الاختبار القياسية في فكي جهاز فحص الشد ويتم تسليط حمل الشد على العينة تدريجياً فتبدأ العينة بالاستطالة وتتخصر لغاية الوصول إلى مرحلة الانهيار والفشل ويقوم جهاز فحص الشد بتثبيت قراءات الحمل والاستطالة كافة من بداية الاختبار ولغاية فشل العينة. والشكل (5-18) يوضّح نموذج لجهاز فحص الشد.



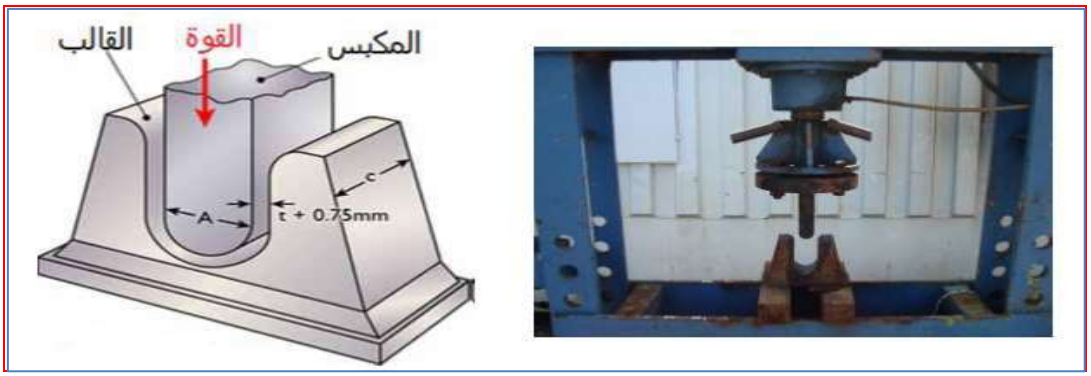
الشكل 5-17 تحضير عينات الشد وفق مواصفات قياسية (الأبعاد بالملمتر mm)



الشكل 5-18 جهاز فحص الشد

ثانياً: اختبار الانحناء Guide Bending Test

اختبار الانحناء الموجه هو اختبار يفحص جودة اللحام التقابلي بأشكاله المختلفة (U-X-V-I) من حيث اللدونة وكذلك الكشف عن النقص في التغلغل وسلامة الوصلة الملحومة، ويتم انتخاب عينة الاختبار على وفق الشكل (5-19) بزاوية 180 درجة، ويفضل استعمال قالب الحني الموجه القابل للضبط وكما موضّح في الشكل (5-20)، إذ يجب تغيير القوالب الثابتة كلما تغير سمك عينة الاختبار.

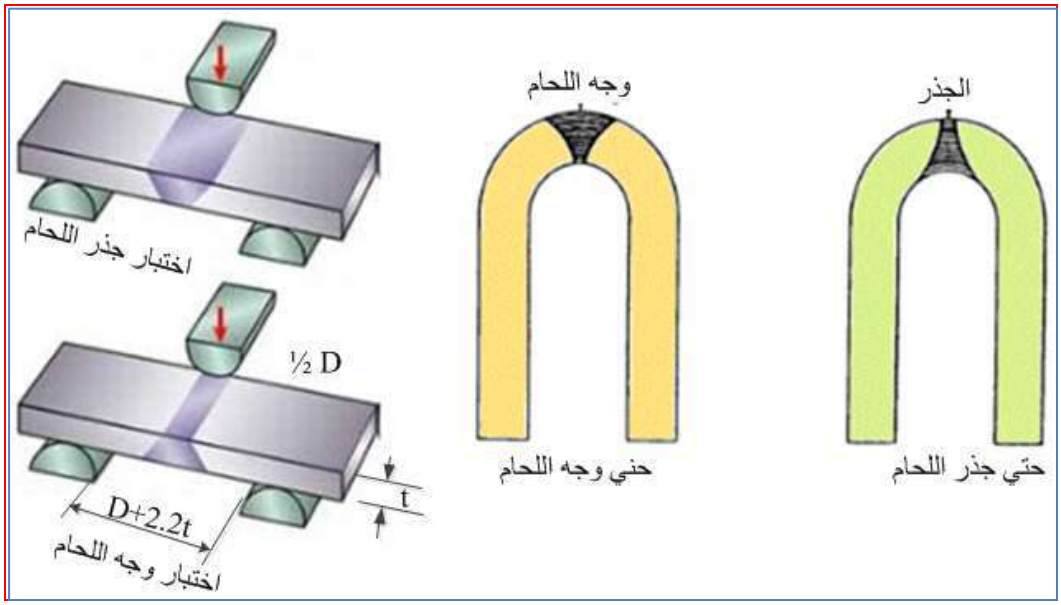


الشكل 5-19 قالب اختبار الحني الموجه الثابت

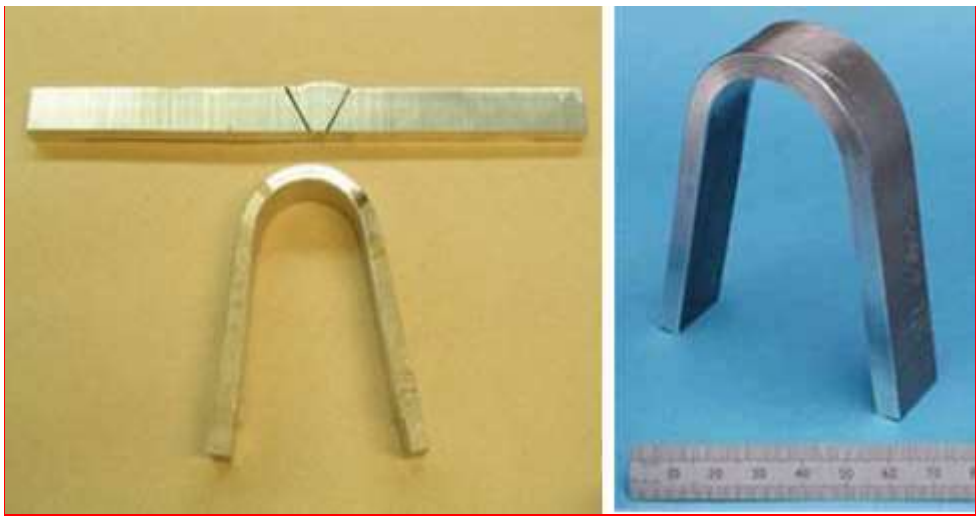
الشكل 5-20 قالب الحني الموجه القابل للضبط

ويتم إجراء الاختبار على وفق الخطوات الآتية:

- تحديد سمك العينة وذلك بناءً على قالب الحني المتوافر الثابت.
- تلحم العينة حسب متطلبات العمل مع تحديد شكل مجرى اللحام (I-V-X-U).
- تحديد الجهة المراد اختبارها فاختبار الحني الموجه يمكن أن يكون لمنطقة جذر اللحام أو لمنطقة وجه اللحام، وكما موضّح في الشكل (5-21).
- وضع عينة الاختبار وحنيها إلى زاوية (180°) ويلزم الانتباه إلى وجوب إيقاف الحني عند كسر العينة ولو لم يكتمل الحني.
- يجب أن تتم عملية الحني بالكامل من دون أن يؤدي ذلك إلى فشل أو انهيار لحام عينة الاختبار، كما موضّح في الشكل (5-22).
- إذا فشلت منطقة اللحام أثناء الحني فيعني ذلك أن اللحام غير جيد.



الشكل 5-21 طرائق اختبار وصلة اللحام التقابلية باختبار الحني الموجه



الشكل 5-22 العينة بعد الحني

3-4-5 الاختبارات اللاإتلافية

وهي احدى طرائق اختبار جودة اللحام عن طريق استعمال القواعد الفيزيائية لكشف العيوب والفجوات في وصلات اللحام من دون الحاجة لتشويه أو إتلاف الملحومة. والاحتياج للاختبارات اللاإتلافية في ازدياد متسارع وخصوصاً مع زيادة الحاجة إلى تصنيع منتجات موثوقة وذات جودة عالية. وتكمن أهمية الاختبارات اللاإتلافية في إجرائها قبل الإنتاج النهائي فهي تستعمل للكشف عن العيوب قبل التجميع وتشغيل المنتج ويستمر إجراءها أحياناً إلى ما بعد تشغيل المنتج كأعمال الصيانة الدورية أو الإصلاحات وذلك لضمان توافق اللحام مع متطلبات الخدمة.

يوجد العديد من أنواع الاختبارات اللاإتلافية، وأهمها:

1. اختبار الجسيمات المغناطيسية Magnetic Particles Test
2. اختبار الموجات الفوق صوتية Ultrasonic Test
3. اختبارات التصوير الإشعاعي Radiographic Test
4. اختبار الصبغة المتوغلة Dye-Penetrant Test

وسيتم في هذه المرحلة شرح اختبار الجسيمات المغناطيسية واختبار الموجات فوق الصوتية، أما بقية الاختبارات فلا يتسع المجال لذكرها جميعاً وسيتناولها الطالب في مراحل دراسية لاحقة.

أولاً: اختبار الجسيمات المغناطيسية Magnetic Particles Test

اختبار الجسيمات المغناطيسية هو اختبار لاإتلافي يستعمل المجال المغناطيسي لاكتشاف الشقوق والمسامات والفجوات والضعف في التغلغل السطحي أو القريب من السطح. ويستعمل بكثرة في فحص الملحومات الداخلة في صناعة الطيران.

ويمتاز الاختبار بالمزايا الآتية:

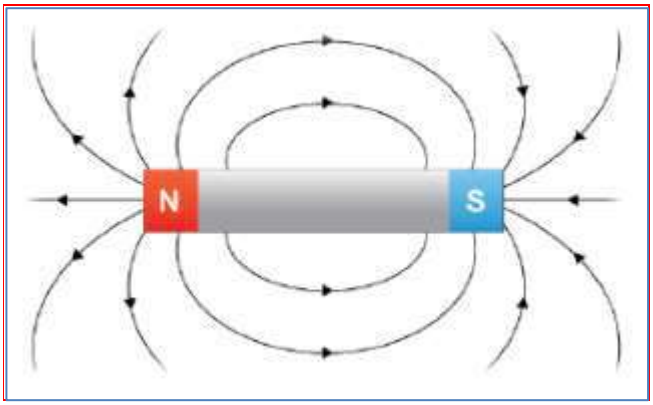
- القدرة على كشف الشقوق والفجوات السطحية، والقريبة من السطح.
- لا توجد اشتراطات على مقاس أو شكل القطعة المفحوصة.
- دقته العالية على اكتشاف الشقوق والفجوات السطحية.
- تجهيزاته قليلة.

ومن المحددات التي تصاحب اختبار الجسيمات المغناطيسية:

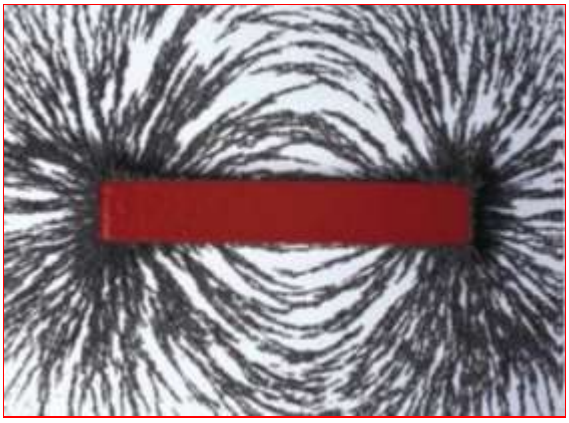
- يحتاج إلى سطح نظيف وناعم نوعاً ما لغرض إجراء الاختبار.
- يستعمل للمعادن المغناطيسية فقط كالفولاذ وحديد الزهر ولا يمكن تطبيقه على الألمنيوم والنحاس والبلاستيك والزجاج.
- لا يكتشف الشقوق الموازية لخطوط المجال المغناطيسي لذلك يجب تحريك مصدر المجال المغناطيسي بشكل متعامد باستمرار.
- يحتاج إلى مهارة في تطبيقه.
- لا يتمكن من اكتشاف العيوب الداخلية لخط اللحام.

يعتمد اختبار الجسيمات المغناطيسية على الخواص الفيزيائية للمغناطيس، وهي كالآتي:

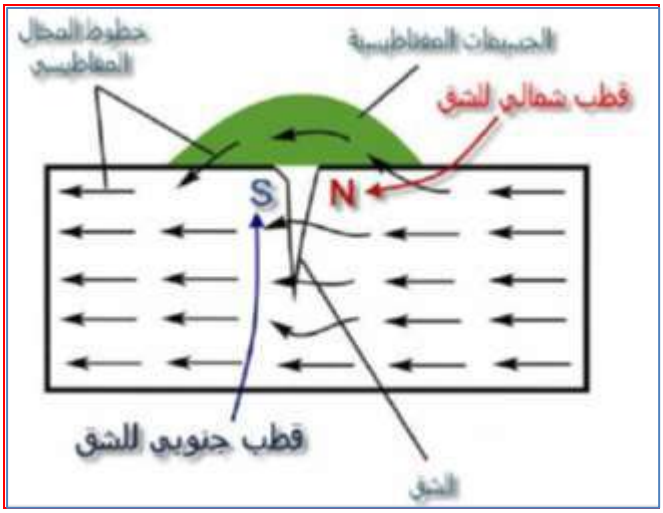
- تتدفق خطوط القوة المغناطيسية من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي للمغناطيس، وكما موضّح بالشكل (5-23).
- يجذب المغناطيس الجسيمات الحديدية لقطبيه الشمالي والجنوبي ويجعلها تنتظم على خطوط تدفق القوة المغناطيسية وكما موضّح بالشكل (5-24).
- إذا حصل انقطاع في سطح وصلة اللحام بسبب شق أو فجوة فان انقطاع خطوط المجال المغناطيسي سيحول طرفي الشق إلى قطبين مغناطيسيين مما يجعلهما يجذبان الجسيمات الحديدية كما هو موضّح في الشكل (5-25).
- جهاز الفحص يولد المجال المغناطيسي في منطقة اللحام وذلك باستعمال الطاقة الكهربائية لإنتاج المجالات المغناطيسية في القطبين، وكما هو موضّح في الشكل (5-26).
- تحديد الشقوق والفجوات السطحية والقريبة من السطح من خلال إيجاد مناطق تجمع جسيمات الحديد بالفحص البصري أو باستعمال المصباح الفلوري، وكما هو موضّح في الشكل (5-27).



الشكل 5-23 تتدفق خطوط القوة المغناطيسية

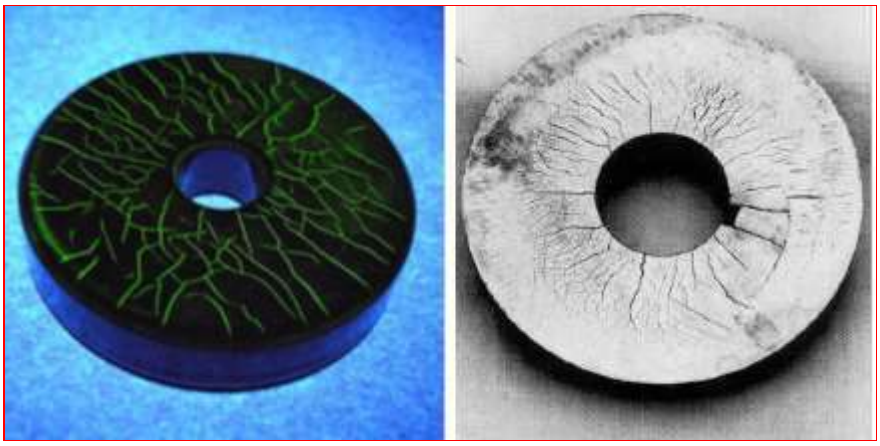


الشكل 5-24 انتظام جسيمات الحديد على خطوط القوة المغناطيسية



الشكل 5-25 تجمع الجسيمات الحديدية حول الشق بسبب خواصه المغناطيسية

الشكل 5-26 جهاز فحص المجال المغناطيسي



الشكل 5-27 جسيمات الحديد بالفحص البصري أو باستخدام المصباح الفلوري

ثانياً: اختبار الموجات فوق الصوتية (UT) Ultrasonic Test

اختبار الموجات فوق الصوتية هو أحد طرائق الاختبارات اللاإتلافية، ويتم بها فحص اللحام باستعمال موجات فوق صوتية للكشف عن عيوب اللحام السطحية والداخلية.

ويمتاز فحص اللحام باستعمال الموجات الفوق صوتية بالمزايا الآتية:

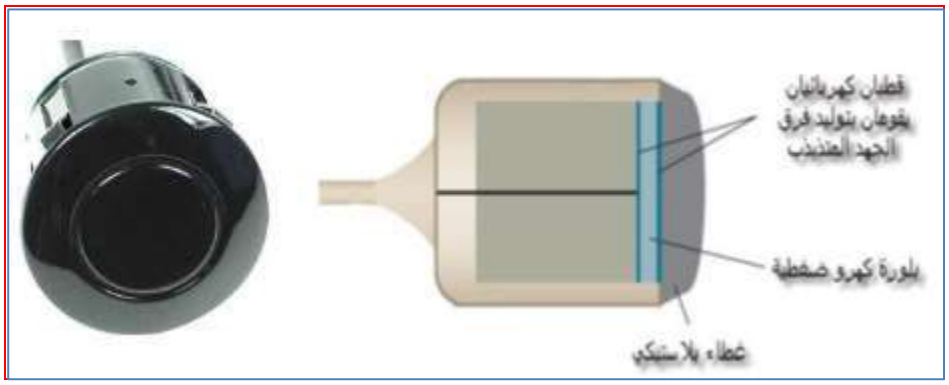
- إيجاد جميع عيوب اللحام الداخلية.
- يمكن تطبيقه على جميع المواد (المعادن والبلاستيك والزجاج).
- يستطيع تحديد عمق عيب اللحام.
- ذي مصداقية وموثوقية عالية.

ومن السلبيات التي تصاحب اختبار الموجات الفوق صوتية:

- يحتاج إلى تدريب ومهارة عاليتين لتطبيقه.
- مكلف مقارنة ببقية أنواع الاختبارات اللاإتلافية.
- محدودية استعماله مع خطوط اللحام الزاويّة والمعقدة جداً.

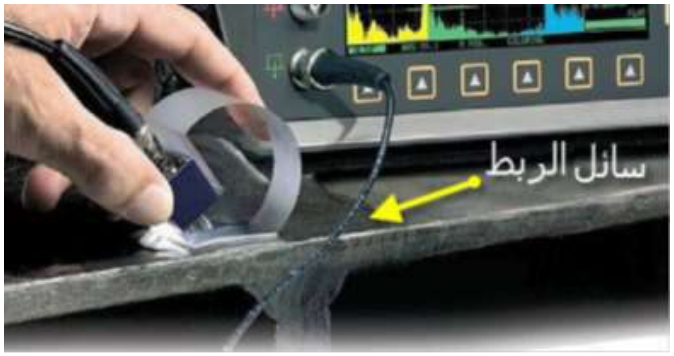
يستعمل جهاز اختبار الموجات فوق الصوتية مبدأ عمل الرادارات، أي بالنبضات والصدى فترات زمنية قصيرة بحدود جزء من ألف من الثانية، وكما يأتي:

- تُستخدم الاهتزازات الميكانيكية والمشابهة للموجات الصوتية ولكن بذبذبات أعلى في إجراء الاختبار.
- محول الطاقة (Transducer) هو جهاز يحتوي على بلورة كريستال كهروضغطية (Piezoelectric Crystal) تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية بحيث يتم توليد الموجات فوق الصوتية باستثارة البلورة الكهروضغطية بفرق جهد كهربائي عالي التردد والذي يسبب اهتزاز البلورة ميكانيكياً مولداً الاهتزازات الميكانيكية فوق الصوتية، وكما موضّح في الشكل (5-28).



الشكل 5-28 طريقة إنتاج الموجات الميكانيكية الفوق صوتية

- يتم دهن منطقة الاختبار باستعمال سائل الربط وهو في العادة طبقة من الزيت، ويعمل سائل الربط على نقل الاهتزازات الميكانيكية (الموجات فوق الصوتية) من محول الطاقة إلى قطعة الشغل، وكما موضّح في الشكل (5-29).



الشكل 5-29 سائل الربط بين محول الطاقة وقطعة الشغل

- تنتقل الموجات فوق الصوتية في المواد من دون أن تخسر طاقة ولكن عند اصطدامها بأي عيب داخلي بالمادة كمادة دخيلة أو شق أو فجوة هوائية (مسامات، ضعف تغلغل) فإنها تنعكس عائدة إلى مصدرها والذي هو محول الطاقة.

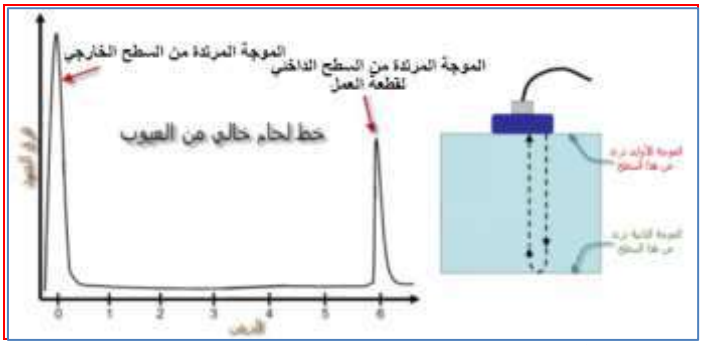
- يعمل محول الطاقة عند ارتداد الموجات فوق الصوتية بسبب العيب الداخلي كجهاز استقبال ويقوم بتحويلها إلى جهاز راسم الذبذبات Oscilloscope والذي يقوم برسمها على الشاشة ليتم تحليلها وقراءة النتائج، وكما موضّح في الشكل (5-30)

الشكل 5-30 جهاز راسم الذبذبات (Oscilloscope)

ويرسم جهاز رسم الذبذبات موجتين رئيستين وهما:

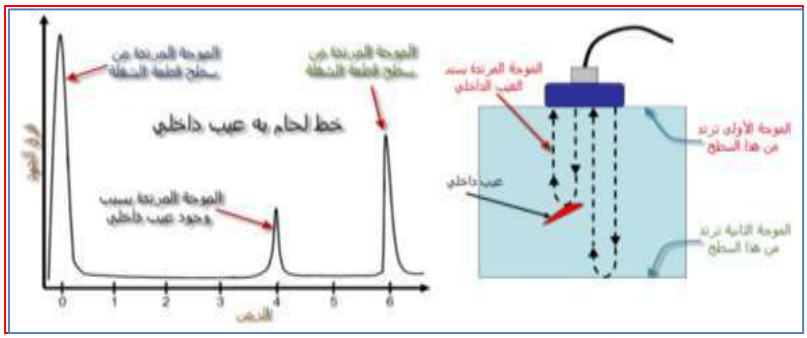
- الموجة المرتدة من سطح الملحومة.
- الموجة المرتدة من الطرف الآخر للملحومة.

ووجود هاتين الموجتين على الشاشة وليس بينهما أي موجات مرسومة يدل على خلو اللحام من العيوب الداخلية، وكما موضّح في الشكل (5-31).



الشكل 5-31 شكل شاشة راسم الذبذبات عند خلو اللحام من العيوب الداخلية

وحينما يقوم راسم الذبذبات برسم أي موجة بين الموجتين الرئيستين فيدل ذلك على وجود عيب داخلي بالقطعة، وكما موضّح في الشكل (5 -32)



الشكل 5-32 شكل شاشة راسم الذبذبات عند وجود عيب داخلي باللحام

أسئلة الفصل الخامس

س1) ما هي الإجهادات المتبقية والتشوهات التي تحدث بعد عملية اللحام بالقوس الكهربائي؟ وكيف يمكن تلافيها؟

س2) ما أسباب حدوث الشقوق في وصلات اللحام؟ وكيف يمكن تجنبها؟

س3) ما أنواع الشقوق حسب الشكل؟

س4) ما هي الفجوات وما أسباب حدوثها في وصلات اللحام؟ وكيف يمكن تجنبها؟

س5) عرف الشوائب الصلبة وما نوع عملية اللحام التي تحدث فيها الشوائب الصلبة؟

س6) وضّح أهم أسباب النقص في الانصهار أو التغلغل، وما الخطوات الواجب اتباعها لتجنب النقص في الانصهار أو التغلغل؟

س7) عدد بعضاً من أنواع عيوب الشكل غير التام وما هو أخطرها؟

س8) املأ الفراغات الآتية بما يلائمها:

1. الفحص البصري هو أحد طرائق ..... ويتم فيه فحص جودة اللحام باستعمال البصر وبمساعدة أدوات ..... و .....، ويستعمل لفحص العيوب .....و .....، ويساعد على اكتشاف أخطاء اللحام مبكراً ويمتاز بـ ..... و .....و.....
2. يتكون اختبار الشد من تعريض عينة الاختبار للفشل بتسليط .....ويتم تحضير عينات الشد على وفق ..... وتؤخذ عينات الاختبار القياسية في الاتجاه ..... أو ..... لخط اللحام.
3. اختبار الجسيمات المغناطيسية MT هو اختبار ..... يستعمل ..... لاكتشاف الشقوق والمسامات والفجوات والضعف في التغلغل السطحي أو القريب من السطح ويستعمل بكثرة في فحص اللحام في.....
4. اختبار الموجات فوق الصوتية UT هو أحد طرائق الاختبارات ..... يتم فيها فحص اللحام باستعمال ..... للكشف عن عيوب اللحام ..... و.....

الفصل السادس

تشكيل المعادن

Metal Forming

الأهداف

الهدف العام

في هذا الفصل سيتمكن الطالب من معرفة طرائق تشكيل المعادن (التشكيل الكتلوي، وتشكيل الصفائح المعدنية) وميزاتها وأسلوب عمل كل طريقة ليتمكن من تحديد طريقة تشكيل المنتج.

الأهداف الخاصة: بعد الانتهاء من دراسة الفصل السادس سيتمكن الطالب من فهم الآتي:

- عمليات التشكيل الميكانيكي للمعادن.
- درجة حرارة إعادة التبلور.
- التشكيل على البارد.
- التشكيل على الساخن.
- عمليات التشكيل الكتلوي.
- عمليات تشكيل الصفائح المعدنية.

- عملية (الدرفلة، السحب، البثق، والحدادة)
- المهارات في عمليات تشكيل الصفائح.
- قص الصفائح المعدنية.
- عملية السحب العميق.

تشكيل المعادن Metal Forming

1-6 مقدمة Introduction

تشمل عملية التشكيل الميكانيكي جميع عمليات التشكيل التي تجري على المعادن والسبائك في الحالة الجامدة أي من دون صهرها. وتجري جميع هذه العمليات تحت تأثير قوى ميكانيكية وباستعمال مُعدات وأجهزة خاصة تقوم بتأمين هذه القوى وإحداث التغيير المطلوب في أشكال أو هيئات المعادن والسبائك.

الخصائص العامة لعمليات تشكيل المعادن

1. الإفادة من قابلية المعدن على الانسياب اللدن في الحالة الصلبة.
2. تشكيل المعدن إلى الشكل المطلوب دون إزالة كميات منه.
3. الحاجة إلى قوى كبيرة وطاقة عالية.
4. تكون المكائن والعُدد المستعملة في التشكيل مرتفعة الكلفة، لذلك يجب أن يكون حجم الإنتاج كبير لتكون العملية اقتصادية.

تصنف عمليات التشكيل الميكانيكي استناداً إلى درجه الحرارة التي تجرى فيها عملية التشكيل إلى المجموعات الأساسية التالية:

- تشكيل المعادن على البارد Cold Metal Forming
- التشكيل الدافئ Warm Working
- تشكيل المعادن على الساخن Hot Metal Forming

ويجمع أحياناً بين الأنواع المذكورة آنفاً من التشكيل لغرض الحصول على نتائج معينة. يقصد بالتشكيل على الساخن التغيير أو التشويه اللدن أي الدائم الذي ينتج في المعادن نتيجة تأثير قوى أو إجهادات عليها وهي بدرجات حرارة مرتفعة، أي أن درجة حرارتها تكون دائماً فوق درجة حرارة الغرفة بمقدار معين ويختلف باختلاف المعادن والسبائك قيد التشكيل، والتمييز بين التشكيل على الساخن والتشكيل على البارد يستند إلى درجة حرارة معينة خاصة بكل معدن أو سبيكة، ودرجة الحرارة هذه تسمى بدرجة حرارة إعادة التبلور.

وتُصنف عمليات التشكيل بحسب شكل قطعة العمل (نسبة المساحة السطحية للحجم) إلى مجموعتين هما:

- **التشكيل الكتلوي** (أي يكون المعدن المستعمل بشكل كتلة) (Bulk Metal Forming).
- **تشكيل الصفائح** (Sheet Metal Forming).

2-6 درجة حرارة إعادة التبلور Recrystallization Temperature

تكون درجة حرارة إعادة التبلور بحدود نصف درجة انصهار المعدن أو السبيكة، ويمكن القول بأن التشكيل على البارد يجري عادةً في درجة حرارة الغرفة أي تحت درجة حرارة إعادة التبلور، بينما التشكيل على الساخن يجري فوق هذه الدرجة وقد يجري التشكيل على الساخن استناداً إلى نوع المعدن أو السبيكة في درجات أعلى بكثير من درجة حرارة إعادة التبلور، وكما هي الحالة مع الفولاذ، وتمتاز بعض المعادن بكون درجة حرارة إعادة تبلورها منخفضة جداً ومقاربة لدرجة حرارة الغرفة أو حتى أقل منها، لذلك فإن هذه المعادن لدى تشكيلها في درجة حرارة الغرفة يُعد هذا التشكيل تشكيلاً على الساخن، على سبيل المثال معدن الرصاص والقصدير، وكلما كانت درجة انصهار المعدن عالية كلما ارتفعت درجة حرارة إعادة تبلوره.

ويمكن تعريف درجة حرارة إعادة التبلور على أنها: ***الدرجة الحرارية التي تتكون فيها حبيبات جديدة متساوية المحاور تنمو بدلاً من الحبيبات المشوهة نتيجة التشكيل السابق، ومقدار تلك الدرجة ما يقارب نصف درجة حرارة انصهار المعدن أو السبيكة بمقياس درجة الحرارة المطلق (كلفن K)، وتتكون الحبيبات الجديدة ويكتمل نموها بزمن قدره ساعة واحدة لكل عينة بسمك (25 mm).***

$$T_r \approx 0.5T_m \qquad (6\text{-}1)$$

إذ أن:

T_r: درجة حرارة إعادة التبلور (K)، T_m: درجة حرارة انصهار المعدن (K)

مثال1: تتشكل قطعة من الرصاص في درجة حرارة الغرفة (30°C)، فإذا علمت أن درجة حرارة انصهار الرصاص (327°C)، هل يتم التشكيل على البارد أم على الساخن.

الحل:

$T_r = 0.5T_m$

$T_m = 327+273 = 600$ K

$T_r = 0.5\times 600 = 300$ K

$T = 300 -273 = 27$°C

بما أن درجة حرارة إعادة التبلور (27°C) أقل من درجة حرارة التشكيل (30°C)، لذا يُعد التشكيل لمعدن الرصاص بهذه الدرجة هو تشكيل على الساخن، وغالباً ما يتم تشكيل معدن الرصاص على البارد في درجات الحرارة تحت الصفر السيليزي.

3-6 عمليات التشكيل الميكانيكي على البارد Cold Metal Forming Processes

تستعمل لعمليات الدرفلة على البارد عادةً ماكينات بدرافيل أسناد، إذ يتطلب التشكيل على البارد قوى كبيرة جداً لإنجاز التشكيل المطلوب، لذا يتطلب استعمال درافيل رباعية أو سداسية تسمى بدرافيل الأسناد. وتستعمل الدرفلة على البارد بالدرجة الأساس لإكمال تشكيل منتوجات الدرفلة على الساخن كمرحلة نهائية وتؤدي الدرفلة على البارد في هذا المجال المهام الآتية:

1. **تحقيق منتجات بأبعاد عالية الدقة.**
2. **زيادة جودة سطح المنتج من حيث النعومة.**
3. **تحسين بعض الخواص الميكانيكية مثل الصلادة ومقاومة الشد.**

وتُعد الصفائح المعدنية الرقيقة (الرقائق المعدنية بسُمك بحدود 0.4 mm) من أهم منتوجات الدرفلة على البارد، بالإضافة إلى الشرائح والأشرطة والصفائح، كما تبرز أهمية الدرفلة على البارد بصورة خاصة في الاستعمال لتشكيل منتوجات الدرفلة على الساخن في المرحلة النهائية وللأسباب آنفة الذكر.

6-3-1 خصائص المواد المعدنية التي تشكل على البارد

1. يفضل أن يكون المعدن ذا مقاومة خضوع واطئة ومطيلية واسعة.
2. تفضل المواد ذات معامل المرونة العالي مع مقاومة خضوع واطئة مما يقلل من الرجوعية.
3. يجب أن يُزال الصدأ من السطح بوساطة حمام حامضي (يغطس في الحامض ومن ثم يتم غسله).
4. للحصول على أبعاد جيدة للمعدن يجب أن يكون ذو سُمك متجانس وسطح صقيل، لذلك فإن الصفائح المعدنية أحياناً تحتاج إلى عملية تشكيل بسيطة على البارد قبل دخولها إلى عملية التشكيل الرئيسة.
5. يمكن تفادي ظاهرة نقطة الخضوع (وهي شائعة في الفولاذ واطئ الكاربون) بالدرفلة على البارد.
6. إذا تضمنت عملية التشكيل معدلات تشويه عالية وبالتالي نقصان المطيلية، يمكن استعادة مطيلية المعدن بإجراء معاملة حرارية تسمى التلدين (التخمير) أثناء مراحل التشكيل.

6-3-2 مزايا التشكيل على البارد

1. يصاحب التشكيل على البارد ارتفاعاً في الخواص الميكانيكية (كالصلادة ومقاومة الشد) وانخفاضاً في خواص أخرى (كالمطيلية).
2. تمتاز المنتجات المشكلة على البارد بإنهاء سطحي ومظهر خارجي جيدين.
3. يمكن التحكم بصورة دقيقة في أبعاد ومقاسات المنتجات المشكلة على البارد، لذلك فإن التشكيل على البارد يُستعمل أحياناً كمرحلة نهائية لتشكيل المنتجات المشكلة على الساخن.
4. عدم الحاجة لتسخين قُطع العمل وبالتالي الاستغناء عن الأفران وغيرها من المُعدات المطلوبة للتسخين.

6-3-3 محددات التشكيل على البارد

1. الحاجة إلى قوى وقدرة عاليتين للتشكيل، مع ملاحظة أن مقاومة المعدن للتشكيل تزداد مع زيادة نسبة التشكيل.
2. الحاجة إلى سطح نظيف لقطع العمل خالٍ من العيوب والأكاسيد لتجنب بليان أو تلف مُعدات العمل.
3. زيادة الإجهادات الداخلية في المعدن والتي تقلل بعض الخواص كمقاومة التآكل والأكسدة.

4-3-6 النسبة المئوية للتشكيل على البارد Percentage of Cold Metal Forming

عند إجراء عملية التشكيل على البارد يحدث تشوّه دائمي في المعدن فيسبب تغييراً بإبعاده. ولإيجاد نسبة التشكيل على البارد يحسب الفرق في مساحة المقطع العرضي قبل وبعد التشكيل مقسوماً على المساحة الأصلية قبل عملية التشكيل على البارد.

$$C.W\% = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% \qquad (6\text{-}2)$$

إذ أن:

C.W%: نسبة التشكيل على البارد (Cold Working Percentage)

A_O: مساحة المقطع العرضي قبل التشكيل، A_f: مساحة المقطع العرضي بعد التشكيل.

مثال 2

تم تشكيل قضيب معدني (مقطع دائري) على البارد وكان قطر القضيب قبل التشكيل (50 mm) وبعد التشكيل (45 mm)، أحسب النسبة المئوية للتشكيل على البارد.

الحل:

$$C.W\% = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\%$$

$$A_o = (\frac{50}{2})^2 \times \pi = 1963\ mm^2$$

$$A_f = (\frac{45}{2})^2 \times \pi = 1592\ mm^2$$

$$C.W\% = \frac{1963-1592}{1963} \times 100\% = 19\%$$

مثال 3

احسب قطر قضيب معدني تم تشكيله على البارد، إذا علمت إن نسبة التشكيل (40%) وقطر القضيب قبل التشكيل (30 mm).

الحل:

$$A_o = (\frac{30}{2})^2 \times \pi = 707\ mm^2$$

$$C.W\% = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\%$$

$$40\% = \frac{707 - A_f}{707} \times 100\%$$

$$0.4 \times 707 = 707 - A_f$$

$$A_f = 424\ mm^2$$

$$424 = (\frac{D}{2})^2 \times \pi$$

$$D^2 = \frac{424 \times 4}{\pi} = 540\ mm^2$$

$$D = \sqrt{540} \approx 23\ mm$$

ملاحظة

الحجم قبل التشكيل يساوي الحجم بعد التشكيل

$$\mathbf{V_o = V_f} \qquad (6\text{-}3)$$

إذ أن:

V_o: حجم المعدن قبل التشكيل (mm^3)

V_f: حجم المعدن بعد التشكيل (mm^3)

$$V_o = A_o \times L_o$$

$$V_f = A_f \times L_f$$

$$V_o = V_f$$

$$\mathbf{A_o \times L_o = A_f \times L_f} \qquad (6\text{-}4)$$

مثال 4:

قضيب من الفولاذ قطره الابتدائي (30 mm) تم تشكيله إلى قطر نهائي مساوياً (20 mm)، فإذا كان طول القضيب (2 m)، أوجد طوله النهائي بعد التشكيل.

الحل:

$$V_o = V_f$$

$$A_o \times L_o = A_f \times L_f$$

$$(30/2)^2 \times 3.14 \times 2 \times 1000 = (20/2)^2 \times 3.14 \times L_f$$

$$L_f = 4500 \text{ mm} = 4.5 \text{ m}$$

4-6 عمليات تشكيل المعدن على الساخن Hot Metal Forming Processes

تستعمل عمليات التشكيل على الساخن بالدرجة الأولى لتشكيل المسبوكات الأولية، وتنقل المسبوكات الأولية مباشرة بعد صبها في القوالب وتجمدها إلى معامل التشكيل الميكانيكي، ويتم تشكيلها وهي ساخنة أو يُعاد تسخينها لزيادة قابلية المعدن على التشكيل، وتتم عملية التشكيل على الساخن بدرجات حرارة أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور للمعدن. وقد تصل درجة الحرارة لعمليات التشكيل على الساخن إلى ثلاث أرباع درجة انصهار المعدن كما في بعض عمليات التشكيل الخاصة بالفولاذ كما هو الحال في عمليات الدرفلة والطرق على الساخن. وتكون قابلية المعدن للتشكيل على الساخن عالية، إذ أن خاصية اللدونة للمعادن تزداد بزيادة درجة حرارة المعدن.

6-4-1 مزايا التشكيل على الساخن

1. الحاجة إلى قوى وقدرات واطئة نسبة للتشكيل على البارد لإنجاز التشكيل المطلوب.
2. يمكن تشكيل بعض المعادن على الساخن التي لا يمكن تشكيلها على البارد بسبب فشلها عند التشكيل.
3. لا يسبب التشوَه اللدن فوق درجة حرارة إعادة التبلور تصليداً انفعالياً (Strain Hardening) أي لا يسبب زيادة في مقاومة المعدن للتشكيل.
4. تحسن درجات التشكيل على الساخن العالي من عملية الانتشار لعناصر السبك، مما يساعد في التغلب على العديد من العيوب.
5. يساعد التشكيل على الساخن على الحد من تأثير الشوائب في المعدن حيث تتشوه لتكوَن ألياف طولية تجعل المعدن أقوى وتقلل من حدوث التشققات.
6. يمكن الإفادة من التشويه اللدن في عملية التشكيل على الساخن للحصول على حبيبات كروية الشكل ناعمة عشوائية الاتجاه وبالتالي ستكون مقاومة المعدن غير اتجاهية، فضلاً عن الزيادة في المطيلية والمتانة.
7. يتم التشكيل على الساخن للفولاذ في طور الأوستنايت (FCC)، وهو أكثر مطيلية مقارنةً بالفيرايت (BCC) المتواجد في درجات حرارة أقل.

6-4-2 عيوب التشكيل على الساخن

1. الدقة واطئة في الأبعاد بسبب التمدد الحراري وعدم حدوث تبريد متجانس.
2. ينتج عن التبريد غير المتجانس المرافق للمنتجات المشكلة على الساخن ذات الأشكال المعقدة تواجد إجهادات داخلية في المعدن.
3. وجود أكاسيد (صدأ) على سطح قُطع العمل المشكلة على الساخن.
4. الحاجة إلى طاقة عالية بسبب عملية التسخين المطلوبة للتشكيل على الساخن.
5. قصر العمر التشغيلي لمُعدات التشكيل على الساخن مقارنة بالتشكيل على البارد.
6. بقاء جهود في المعدن بسبب التبريد غير المتجانس.
7. عادةً تكون درجات الحرارة في التشكيل على الساخن أعلى من (0.6) من درجة حرارة انصهار المعدن المشكل، وإذا كانت درجة حرارة التشكيل عالية جداً فإنها تؤدي إلى نمو حبيبات خشنة كبيرة تسبب ضعف المقاومة، أما إذا كانت درجة الحرارة منخفضة كثيراً فتتشوَه الحبيبات مما يؤدي إلى حدوث تصليد إجهادي يُصعَب من عملية التشكيل.

6-5 عمليات التشكيل على الدافئ Warm Working Processes

وهي إحدى أنواع عمليات التشكيل الميكانيكي التي تتم بدرجات حرارة أعلى من درجة حرارة الغرفة ولكنها أقل من درجة حرارة إعادة التبلور أي أقل من درجات الحرارة في عمليات التشكيل على الساخن، وتُعد غير شائعة نوعاً ما وتتميز بالآتي:

1. تتم بدرجات بين (0.3 – 0.5) من درجة حرارة انصهار المعدن.
2. عملية متوسطة بين التشكيل الساخن والبارد (من حيث المزايا والعيوب).
3. لا يحدث تغيير ملحوظ في التركيب المعدني، إذ لا يتعرض سطح المعدن للأكسدة والظروف الأخرى كما هو الحال عند التشكيل على الساخن.
4. تستعمل بصورة رئيسة للأجزاء الكبيرة والفولاذ الكربوني الحاوي على نسبة كربون أعلى من 0.35% أو مع الفولاذ عالي السبائكي.

6-6 التشكيل الكتلوي للمعدن Bulk Metal Forming

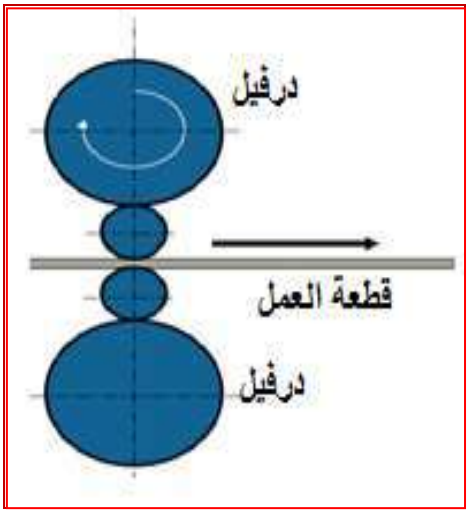
تتضمن عمليات التشكيل الرئيسة والمعروفة إدخال تغيرات جوهرية على قُطع العمل (مسبوكات) ذات أشكال هندسية بسيطة، مثل: الأسطوانة، أو القضبان، أو متوازي المستطيلات (المفلطح slab، والطولي billet ، الكتلي bloom)، وغيرها من الأشكال المشابهة.

تشتمل عمليات التشكيل الكتلوي الرئيسة على الآتي:

- **الدرفلة Rolling**
- **الحدادة Forging**
- **البثق Extrusion**
- **السحب Drawing**

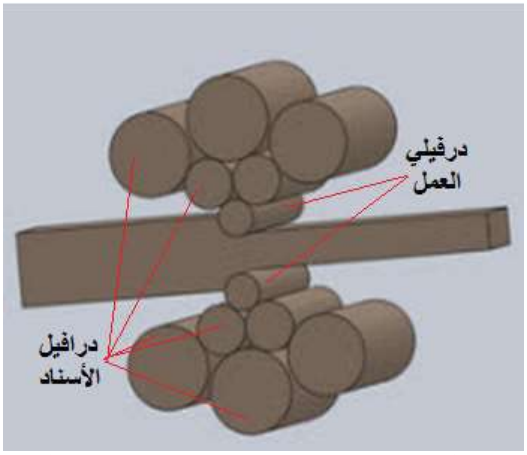
1-6-6 الدرفلة Rolling

وهي عملية تشكيل قُطع العمل بإمرارها بين أسطوانتين مستقيمتين (درفيلين) تدوران آلياً لتحويلها إلى منتجات ذات مقاطع مستطيلة أو مربعة وبأسماك مختلفة عادةً، وتستعمل كخطوة أولية لإنتاج أشكال مختلفة من الفولاذ، مثل: الصفائح والألواح المعدنية والشرائط والقضبان والمقاطع الإنشائية. تجري عملية الدرفلة بصورة مستمرة على عدد من مكائن الدرافيل المنتظمة بالتعاقب مما يؤدي إلى الحصول على المقاطع المطلوبة، إذ يجري في المرحلة الأولى تشكيل أو تخفيض السُمك إلى مقدار معين يليه تخفيض في المرحلة الثانية، بحيث تكون المسافة بين الدرفيلين في المرحلة الثانية أقل من المسافة بين درفيلي المرحلة الأولى، وهكذا تستمر عملية الدرفلة إلى أن يتم الحصول على المقطع المطلوب. وكل ذلك مع المحافظة على حرارة المعدن خلال عملية الدرفلة المستمرة، وقد يستوجب الأمر إعادة تسخين المعدن لغرض الاستمرار في العملية عند التشكيل (الدرفلة) على الساخن، إذ أن درجة الحرارة قد تنخفض إلى حدٍ كبير يصعب معه الاستمرار في التشكيل أو قد تنخفض إلى ما تحت درجة حرارة إعادة التبلور فيصبح التشكيل تشكيلاً على البارد وليس على الساخن، وبذلك لا يمكن التوصل إلى النتائج المطلوبة من التشكيل الساخن. ويوضّح الشكل (6-1) ماكينة وعملية الدرفلة.



شكل 6-1 ماكينة وعملية الدرفلة

وحينما يكون عرض القُطع المشكلة بالدرفلة كبيراً، فإن الدرافيل قد تتعرض إلى انحناء أثناء العمل، لذلك يُصار إلى إسنادها بدرافيل إضافية تسمى بدرافيل الإسناد. وتسمى الدرافيل التي تقوم بالتشكيل مباشرة بدرافيل العمل، ويزود كل درفيل عمل بدرفيل أو أكثر من درافيل الإسناد خاصة في عملية الدرفلة على البارد حيث تكون مقاومة المعدن للتشكيل عالية جداً وفي الوقت الذي تُدار فيه درافيل العمل آلياً، فإن درافيل الإسناد لا تُدار آلياً وإنما تدور بتأثير التماس مع درافيل العمل، وتكون الدرافيل الساندة أكبر قطراً من درافيل العمل ويتم التشكيل بالدرفلة في كلتا الحالتين الساخنة والباردة على حدٍ سواء، لاحظ شكل (6-2)، ومن الأمثلة الشائعة على منتجات الدرفلة مقاطع البناء بأنواعها المختلفة، وكما موضّح بالشكل (6-3).



شكل 6-2 الدرفلة بماكنة متعدة الدرافيل

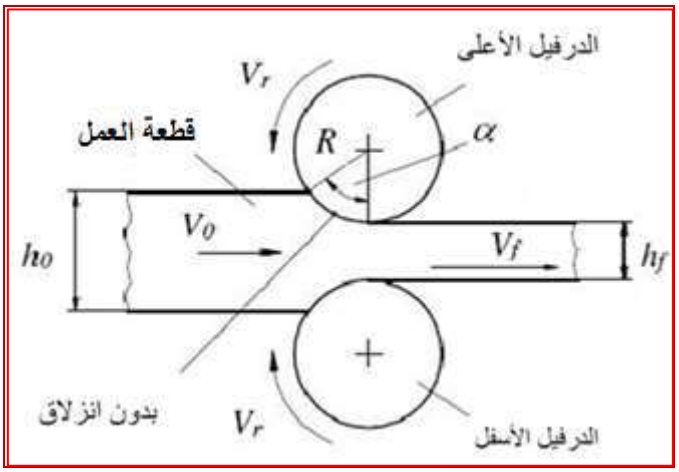
شكل 6-3 مقاطع إنشائية مدرفلة على الساخن

الخصائص العامة للدرفلة

1. تُعد الدرفلة العملية الأولى في تحويل المواد المسبوكة إلى منتجات مشكلة نهائياً أو إلى قُطع عمل تحتاج إلى عمليات تصنيعية أخرى للحصول على المنتجات النهائية. يكون ناتج العملية عادةً مقاطع مربعة أو مستطيلة الشكل أو مقاطع مدورة أو مربعة وبأبعاد أصغر من الجزء قبل الدرفلة.
2. تُعد عملية الدرفلة من ناحية الإنتاج الكمي العملية الأكثر شيوعاً من بين عمليات التشكيل.
3. تكون الدرافيل عادةً مكلفة وباهضه الثمن.
4. تستعمل عادةً لإنتاج الأشكال القياسية.

مبادئ عملية الدرفلة

تتلخص عملية الدرفلة وبالتحديد الدرفلة المستوية بإمرار معدن بين درفيلين يدوران باتجاهين متعاكسين ويكون الفراغ بين الدرفيلين أقل من سُمك قطعة العمل. إذ تدخل قطعة العمل بين الدرفيلين بسُمك (h_o) ويُضغط ويخرج بسُمك (h_f) ويعمل كل درفيل بمحركات كهربائية تدور بسرعة سطحية (v_r) وهذه السرعة أعلى من السرعة الابتدائية للمعدن (v_o) لذلك يحدث انزلاق نسبي بين سطح الدرافيل والمعدن المدرفل، وكما موضّح بالشكل (6-4).



شكل 6-4 عملية الدرفلة

عمليات الدرفلة

- درفلة على الساخن لإنتاج الأشكال القياسية كمقاطع الهياكل المعدنية وسكك الحديد والقضبان بأشكالها المدورة والسُداسية والصفائح والألواح.
- الدرفلة على البارد للصفائح والألواح وتستعمل للحصول على دقة عالية في الأبعاد وتحسين في مقاومة المعدن، فضلاً عن الحصول على إنهاء سطحي أعلى.

أنواع مكائن الدرفلة

أولاً: ماكينة الدرافيل الثنائية

وتستعمل في مراحل الدرفلة على الساخن أو البارد وخصوصاً لقطع العمل الأولية، وكما موضّح بالشكل (6-5). وتتوافر ماكينة درفلة ثنائية عكسية مع إمكانية عكس اتجاه الدوران لكل درفيل، ويستعمل هذا النوع لإمكانيته في تغيير اتجاه تغذية قطعة العمل، فعلى سبيل المثال القطعة المدرفلة للأمام يمكن أن تعاد إلى الماكنة نفسها بعكس الاتجاه دون الحاجة إلى قلبها، وبالتالي تسهيل العمل والإفادة من الوقت في حالة الدرفلة لأكثر من مرحلة، فضلاً عن عدم الحاجة لعدد من مكائن الدرفلة لتوضع بالتتابع.

ثانياً: ماكينة الدرافيل الثلاثية (العكسية)

يعكس اتجاه حركة قطعة العمل فيه بعد كل شوط مع تقليل الفراغ بين الدرفيلين تدريجياً بين الأشواط، والشكل (6-6) يوضّح الدرافيل الثلاثية.

شكل 6-5 ماكنة درفلة ثنائية

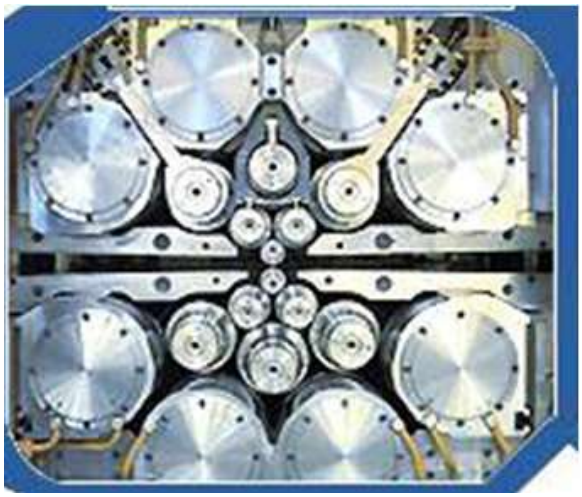
شكل 6-6 ماكنة درفلة ثلاثية

ثالثاً: ماكينة الدرفلة الرباعية

وتستعمل هذه الدرافيل لتقليل قوى الدرفلة والطاقة المستهلكة، وبذلك يكون سطح التماس مع المواد المدرفلة أقصر وهي أرخص من الدرافيل الكبيرة وسهلة التبديل، ومع ذلك تحتاج إلى إسناد إضافي يتم بدرفيلين آخرين لتقليل الانبعاج ويستعمل هذا النوع من الدرافيل لدرفلة الصفائح العريضة، إذ أن مقدار الانبعاج يكون صغيراً.

رابعاً: ماكينة الدرفلة العنقودية Cluster Mill

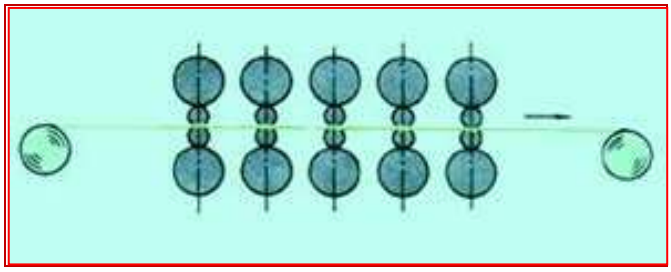
وهي ماكينة تم تطويرها للدرفلة على البارد لإنتاج الصفائح الرقيقة وبأبعاد دقيقة للمعادن عالية المقاومة، والشكل (6-7) يبيّن ماكينة الدرفلة العنقودية، إذ تتكون من درفيلين للتشكيل بأقطار صغيرة يثبت حولهما الدرافيل الساندة.



شكل 6-7 ماكينة الدرافيل العنقودية

خامساً: ماكينة الدرافيل الترادفية Tandem Rolls

تتم درفلة المعدن هنا باستمرار من خلال عدد من المراحل مع تقليل سُمك المعدن المدرفل. كل مرحلة تحتوي على مجموعة من الدرافيل المسيطر عليها، ومجموعة المراحل هذه تُسمى قطار، ومن ذلك فإن سرعة المعدن الخارج من كل مرحلة يجب أن تكون مناسبة لدخول المرحلة اللاحقة ويتم ذلك باستعمال أجهزة إلكترونية وحاسبات تسيطر على سرعة الدرافيل والحيز المفتوح بينها، كما في الشكل (6-8).

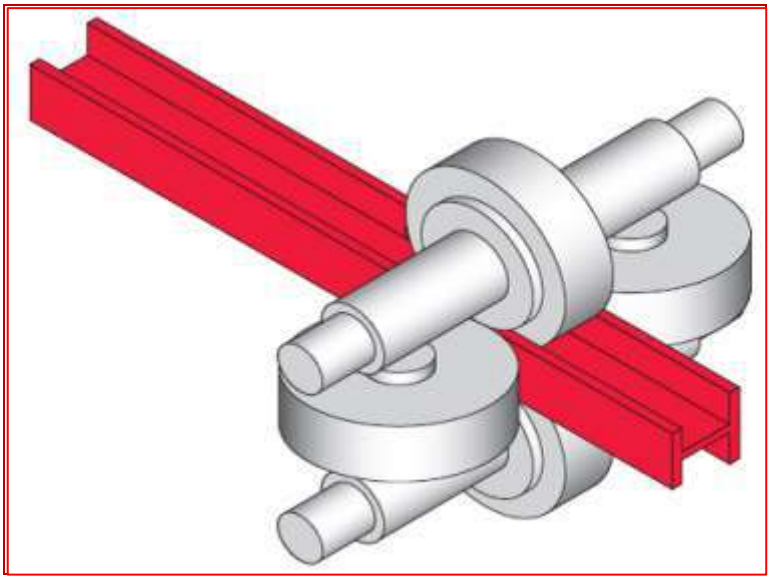


شكل 6-8 الدرافيل الترادفية

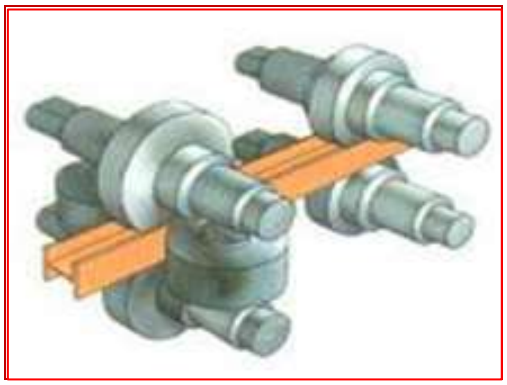
سادساً: الدرفلة التشكيلية Shape Rolling

- تشابه الدرفلة المستقيمة، إلاّ أن سطوح الدرافيل تحتوي على تشكيلات تناسب والمقطع المطلوب إنتاجه.
- تستعمل لإنتاج ودرفلة معادن باستقامة وطول كبيرين كمقاطع البناء الفولاذية مثل Solid Bar، والسكك الحديدية.
- تحتاج هذه الدرفلة إلى أشواط متعددة، وذلك لأن المقطع يتم تشكيله تدريجياً شيئاً فشيئاً خلال كل مرحلة، لاحظ الشكل (6-9) والشكل (6-10) مثال على درفلة مقطع سكة، والشكل (6-11) مثال على درفلة الشكل حرف (I).
- تصميم الدرافيل يتطلب خبرة كبيرة (لتجنب حدوث العيوب الخارجية، والداخلية، ولضبط الأبعاد، ولتقليل تلف الدرافيل).

شكل 6-9 ماكينة الدرافيل التشكيلية



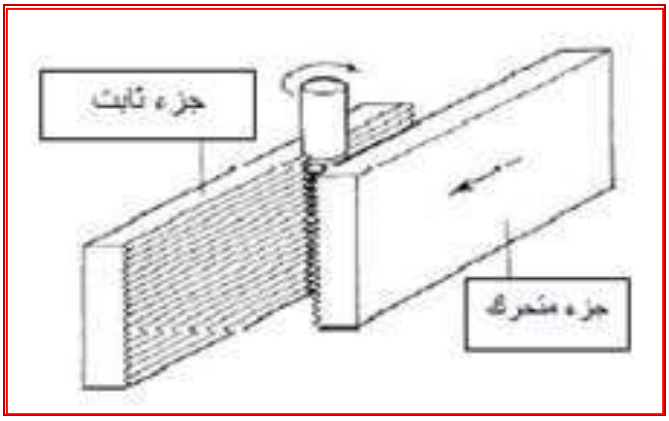
شكل 6-10 الدرفلة التشكيلية لمنتوج بمقطع سكة



شكل 6-11 إنتاج مقطع حرف (I) بوساطة الدرفلة

سابعاً: درفلة التسنين Thread Rolling

لغرض الدرفلة على البارد للتسنين المستقيم أو الزاوي يتم التشكيل على الأسطوانات بإمراره بين قوالب تحوي شكل الأسنان المطلوبة. من ميزات هذه الطريقة تكون الإنتاجية بمعدل عالٍ مع زيادة المقاومة، لاحظ الشكل (6-12).



شكل 6-12 درفلة على البارد لغرض التسنين

6-6-2 الحدادة Forging

عبارة عن تشكيل المعادن على الساخن وذلك بكبسها في قوالب تمثل الشكل المطلوب، ويجري التشكيل إما باستعمال ضغطٍ عالٍ Forging Press أو التشكيل بالصدمة بوساطة الطرق بالمطرقة Forging Hammer ، وتسخن المواد المعدنية لغرض طرقها أو كبسها إلى درجات حرارة مرتفعة أعلى من درجات إعادة تبلورها بكثير لتتقبل التشكيل بسهولة. ويجب أن تكون القوالب المستعملة في الحدادة مصنوعة من مواد معدنية تحافظ على خواصها في درجات حرارة عملية الحدادة وتحت تأثير القوى المؤثرة عليها، وتمتاز ماكينات الحدادة بالطرق بالبخار بارتفاع كفاءتها بسبب ارتفاع القوة الناتجة من سقوط المطرقة من ارتفاع معين. وأهم المنتجات التي تصنع بالطرق الأقراص المسننة على اختلاف أنواعها، وأعمدة الإدارة وحلقات المحامل وعجلات السكك الحديدية وما شابه ذلك. وهذه العملية هي عملية تشكيل المعادن بوساطة قوى ضاغطة موقعيه تنتج باستعمال مكابس أو مكائن الطرق.

الخصائص العامة للحدادة

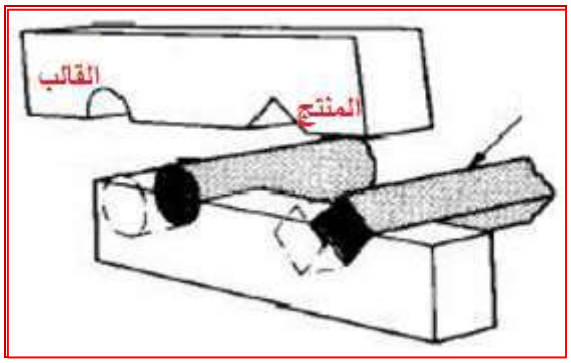
1. إمكانية إنتاج أجزاء معقدة، ومما يمكن إنجازه في الحالتين على الساخن وعلى البارد.
2. يمكن السيطرة على جريان المعدن في عمليات الحدادة، لذلك تستعمل الحدادة في إنتاج منتجات عالية المتانة في تطبيقات حرجة مثل: (عجلات الهبوط للطائرات، وأعمدة المحركات النفاثة، وأقراص المحركات) وغيرها من التطبيقات.

عمليات الحدادة الرئيسة

1. الحدادة بالقالب المفتوح Open – Die Forging
2. الحدادة بالقالب المغلق Closed– Die Forging
3. الحدادة بالضغط Compressive Forging
4. الحدادة العكسية Forging Upset

أولاً: الحدادة بالقالب المفتوح Open – Die Forging

هو نوع من أنواع الحدادة بالطرق على الساخن حيث يتم تسخين المعدن قبل عملية الطرق إلى درجة حرارة ملائمة. وتتم عملية الطرق أو الضغط بين قالبين مستقيمين ويثبت القالب العلوي بالذراع المتحرك للمطرقة (مطرقة بخارية أو هوائية) والجزء السفلي مثبت بالقاعدة، ويتم تشويه المنتج وتشكيله بوساطة صدمات من المطرقة ويكون التشويه كفوءاً ناجحاً، ومن الممكن أن يحتوي سطح القالب على تجاويف لإنتاج أشكال بسيطة، والشكل (6-13) يبيّن عملية الحدادة بالقالب المفتوح.



شكل 6-13عملية الحدادة بالقالب المفتوح

خصائص الحدادة بالقالب المفتوح

1. تُعد من أبسط عمليات الحدادة.
2. مشابه لطريقة الحدادين في تشكيل المعادن.
3. تتم عملية الطرق بوساطة المطرقة ولا يُستعمل المكبس عادةً.
4. التشكيل في هذه العملية بطئ.
5. تُستعمل عُدد خاصة وقوالب بإشكال بسيطة لتشكيل مقاطع أو صناعة ثقوب أو أجزاء مقطعة.
6. العُدد المطلوبة ليست مكلفة الثمن.
7. الدقة والإنهاء السطحي محدودين.
8. تُعد هذه الطريقة خطوة أولية لتجهيز المعادن بشكل مناسب لعمليات أخرى كالطرق بالقالب المغلق.
9. مناسب للأجزاء الكبيرة ذات الأشكال البسيطة مع حجم إنتاج منخفض.

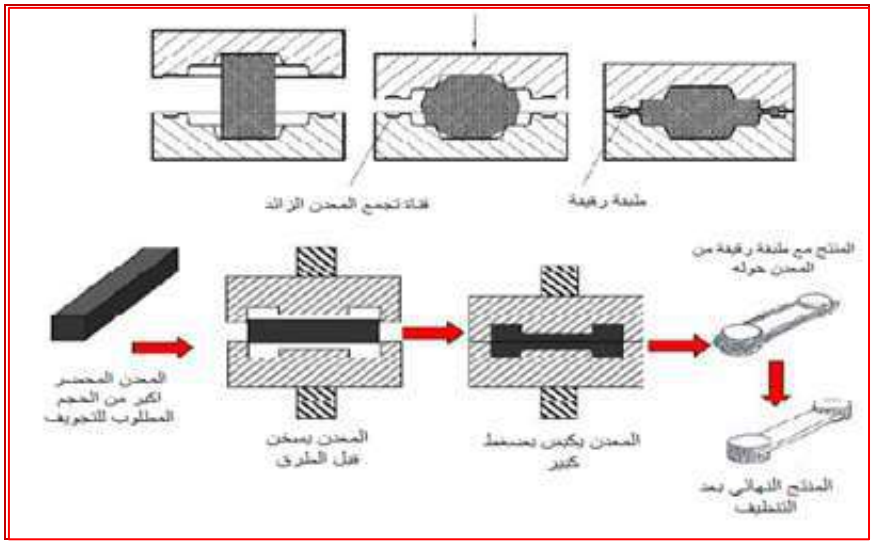
ثانياً: الحدادة بالقالب المغلق Closed– Die Forging

وتشمل هذه الطريقة نوعين، وهما:

- الحدادة بالقالب الضاغط (الضبعة) Impression Forging
- الحدادة بالقوالب المغلقة عديمة الزوائد Flashless Forging

1- الحدادة بالقالب الضاغط Impression Forging

في هذه العملية يتشكل المعدن ويأخذ شكل تجويف القالب حينما يتم طرقه بين نصفي القالب، ويوضع المعدن المسخن في التجويف النصف سفلي من القالب ومن ثم يُطرق مرة أو أكثر بوساطة النصف العلوي، وهذا الطَرق يجعل المعدن ينساب ليملأ تجويف القالب بصورة كاملة. وفي أثناء الطَرق سينساب جزء من المعدن (المعدن الفائض) إلى الخارج بشكل طبقة رقيقة تسمى الزائدة (Flash) في قنوات (Flash Gutters) حول التجويف، وبما أن الزوائد رقيقة السمك فهي تبرد بسرعة كبيرة مما يؤدي إلى جعل قوى الاحتكاك تمنع المعدن الساخن في التجويف من الانسياب إلى خارج القالب وبالتالي فإن قوى الضغط العالية تجعل المعدن يملأ تجويف القالب ووجود الزوائد يؤثر على حجم المعدن المطلوب لمليء تجويف القالب ولا حاجة لحسابات دقيقة لحجم المعدن المطلوب. وحينما تنتهي عملية الطَرق تُزال الزوائد بوساطة قوالب التشذيب (Trimming)، وبسبب محدودية مطيلية المعدن المطروق لا يمكن تشكيل الأجزاء المعقدة عن طريق تجويف واحد لذلك تستعمل القوالب التي تحتوي على عدة تجاويف. لإكمال التشويه في كل تجويف يتطلب أكثر من طرقة واحدة من المطرقة، والشكل (14-6) يبيّن الحدادة بالقالب الضاغط.



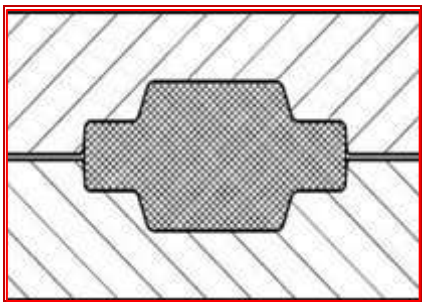
شكل 14-6 الحدادة بالقالب الضاغط

خصائص الحدادة بالقالب الضاغط

1. التغير في الأبعاد محدود، مما يسهل إمكانية الحصول على منتجات متشابهة الأبعاد والخواص.
2. التغير الحاصل في الأبعاد قد يحدث بسبب بليان (تآكل ميكانيكي) للقالب.
3. السماح بخروج الزوائد يحمي ماكينة الطرق من التعرض إلى إجهادات عالية تفوق المعايير التصميمية لها (Overload).
4. انسياب المعدن بالاتجاهات الممكنة في تجويف القالب يسبب تكوَن بُنية ليفية.
5. للجزء المطروق مقاومة أعلى بنسبة 20% من الأجزاء المسبوكة أو المشغولة.

2- الحدادة بالقوالب المغلقة عديمة الزوائد Flashless Forging

وهذا النوع شبيه بالنوع السابق ولكن بدون ظهور زوائد وهو نوع من الأنواع المغلقة، وفيه يُشكل المعدن في داخل التجويف ولا يسمح له بالخروج من التجويف لتكوين زوائد. ويحتاج إلى حسابات دقيقة لحجم المعدن اللازم لملء القالب وإلاّ فإن تجويف القالب لن يُملأ إذا لم يكن حجم المعدن كافياً، أما في حالة كان حجم المعدن اللازم أكثر من المطلوب فإن المعدن الزائد سيخرج من التجويف مسبباً زيادة قوة الطَرق التي تؤدي إلى عدم دقة أبعاد المنتج، ويوضّح الشكل (6-15) الطرق بالقالب المغلق عديم الزوائد.



شكل 6-15 الحدادة بالقوالب المغلقة عديمة الزوائد

ثالثاً: الحدادة بالضغط (الكبس) Compressive Forging

قد يكون الطَرق بوساطة المطارق غير كافٍ على إحداث التشويه في المناطق الداخلية في القطع الكبيرة لذلك يلجأ إلى الحدادة بوساطة المكابس (Presses)، إذ يضغط المكبس على المعدن ببطء جاعلاً انسياب المعدن أكثر انتظاماً.

ميزات الحدادة بالضغط

1. بسبب كون انسياب المعدن أكثر انتظاماً، يمكن إنتاج أشكال أكثر تعقيداً.
2. الطَرق بواسطة المكابس يعطي أبعاداً أكثر دقة.
3. يقلل الضوضاء والاهتزازات.
4. تكون المكابس كبيرة أحياناً.
5. بسبب بطء عمل المكابس يزداد زمن التماس بين سطوح القالب والقطعة المشكلة مما يجعل سطح القطعة يبرد بسرعة مسبباً انخفاضاً في مطيلية المنتج، لذلك يتطلب تسخين القوالب في بعض الحالات.

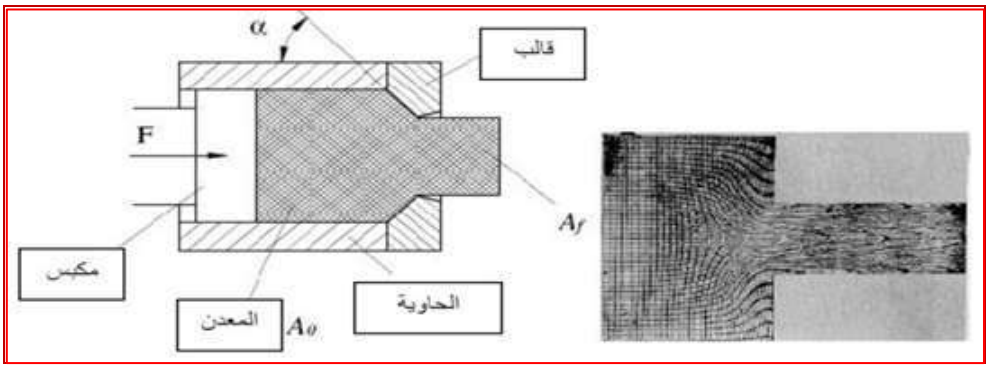
رابعاً: الحدادة العكسية Forging Upset

تستعمل طريقة الحدادة العكسية لزيادة قطر المعدن بوساطة ضغط طوله، وتستعمل في تصنيع نهايات بعض الأدوات، ومن الممكن أن يكون التشكيل على البارد أو على الساخن، وكما في الشكل (6-16).

شكل 6-16 منتجات الحدادة العكسية

6-6-3 عملية البثق Extrusion

البثق هو عملية تسليط قوة على كتلة من المعدن ذات مساحة مقطع (A_0) تمر من خلال قالب التشكيل لتنتج معدناً بمساحة مقطع أقل (A_f). شكل المقطع النهائي للمنتج شبيه لمقطع القالب، والمنتجات المبثوقة لها مقطع حبيبي طولي، والشكل (6-17) يوضّح عملية البثق وانسياب كتلة المعدن في العملية. وتنقسم أساليب البثق من حيث طريقة عملها إلى أنواع رئيسة منها البثق المباشر والبثق غير المباشر والبثق الصدمي.



شكل 6-17عملية البثق وانسياب كتلة المعدن

أولاً: البثق الأمامي المباشر Direct Extrusion

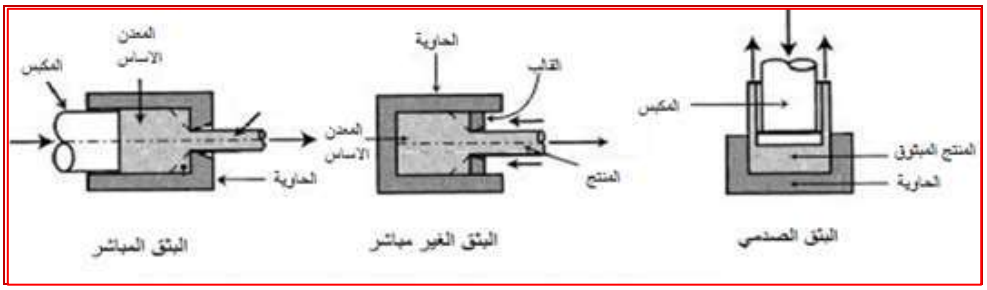
توضع كتلة المعدن في حاوية ومن ثم تدفع إلى الأمام بوساطة مكبس من خلال فتحة الحاوية أو من خلال فتحة القالب المثبت في الحاوية، وتعتمد طريقة البثق المباشر على تشكيل الكتلة المعدنية بوساطة تسليط قوى الضغط على المعدن في داخل القالب فينساب خارجاً من خلال فتحة القالب الموجودة في النهاية المواجهة من الحاوية، أي أن المعدن ينساب متحركاً في نفس اتجاه حركة المكبس.

ثانياً: البثق الخلفي غير المباشر Indirect Extrusion

وفي هذه الطريقة تكون حركة المكبس باتجاه معاكس لاتجاه حركة المعدن المبثوق، وتقلل هذه الطريقة الاحتكاك بين كتلة المعدن وجدار القالب وبالتالي تقلل من الطاقة المبذولة، وتكون المُعدات في هذه الطريقة أعقد من مُعدات البثق الأمامي و يكون طول المنتج المبثوق محدوداً مقارنة بطول المنتج في الطريقة الأمامية.

ثالثاً: البثق الصدمي Impact Extrusion

يتم عادةً على البارد إذ يصدم المُشكل (مثبت على المكبس) كتلة المعدن بسرعة وقوة عاليتين نوعاً ما مسبباً جريان المعدن بمعدل انفعال عالٍ حول المُشكل، ويكون سُمك المنتج المبثوق معادلاً للفراغ الموجود بين المُشكل والقالب، تستعمل هذه الطريقة لإنتاج أنابيب معجون الأسنان والمستحضرات الطبية. ويكون معدل الإنتاج عالٍ (ضربتان للمكبس في الثانية على سبيل المثال)، والشكل (6-18) يوضّح عملية البثق المباشر وغير المباشر والبثق الصدمي.



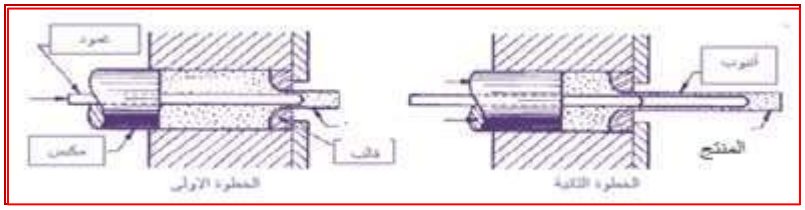
شكل 6-18 أنواع عمليات البثق

بثق الأشكال المجوفة Extrusion of Hollow Shapes

تبثق الأشكال المجوفة بالطرائق الآتية:

أولاً: العمود الثابت Stationary Mandrel

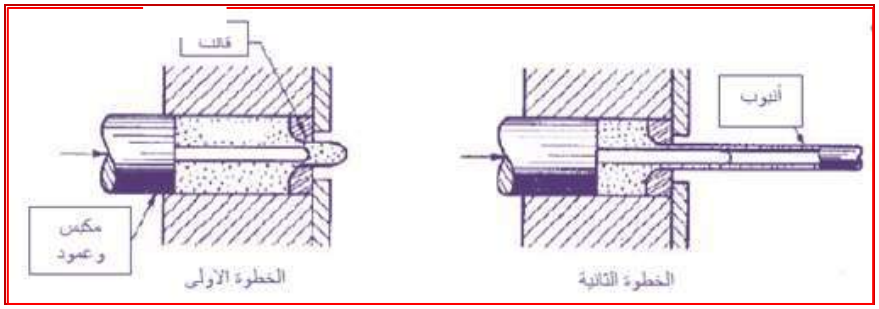
ينزلق المكبس على طول عمود ثابت، وسُمك المنتج المبثوق يمثل الفراغ بين العمود والقالب ويمكن استعمالهُ لإنتاج الأجزاء الأنبوبية، وكما في الشكل (6-19).



شكل 6-19 العمود الثابت في عملية البثق

ثانياً: العمود المتحرك

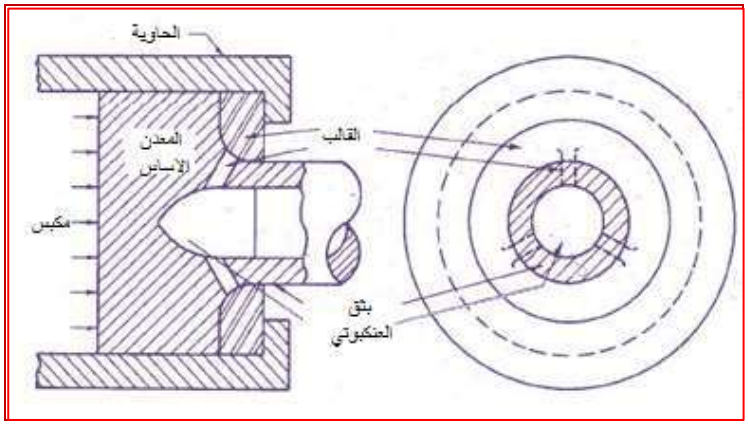
يثبت العمود إلى المكبس (إذ يتحركان معاً)، والشكل (6-20) يوضّح العمود المتحرك في عملية البثق.



شكل 6-20 العمود المتحرك في عملية البثق

ثالثاً: العمود العنكبوتي

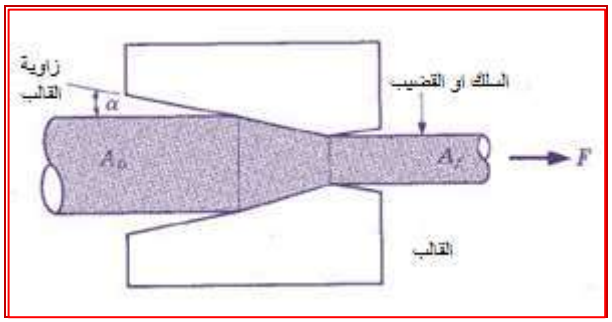
ويستعمل لبثق أجزاء تحوي تجاويف داخلية معقدة ويثبت العمود بالقالب بوساطة أضلاع عنكبوتية. وتقوم هذه الأضلاع فعلياً بتشكيل المعدن فينساب المعدن ويجري حولها، ولكن بعد عبور المعدن للأضلاع يعاني انضغاطاً إضافياً نتيجة تقلص الفراغ بين العمود والقالب، ويوضّح الشكل (6-21) مقطعاً للعمود العنكبوتي في عملية البثق.



شكل 6-21 مقطعاً للعمود العنكبوتي في عملية البثق

6-6-4 السحب Drawing

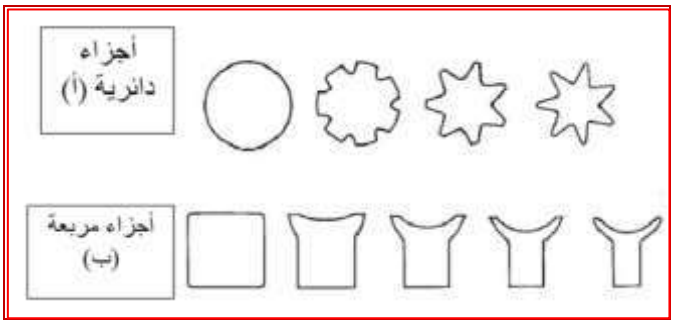
تتضمن عمليات السحب تشكيل القضبان المعدنية إلى الأسلاك بوساطة السحب على البارد، وكذلك تشكيل الصفائح المعدنية إلى أوعية بوساطة السحب العميق، وتُعد المطيلية العالية من أهم خواص المواد المعدنية التي تؤهلها لعمليات التشكيل بالسحب على البارد، وكما في الشكل (6-22).



شكل 6-22 عملية السحب

السحب متعدد المراحل Multi – Pass Drawing

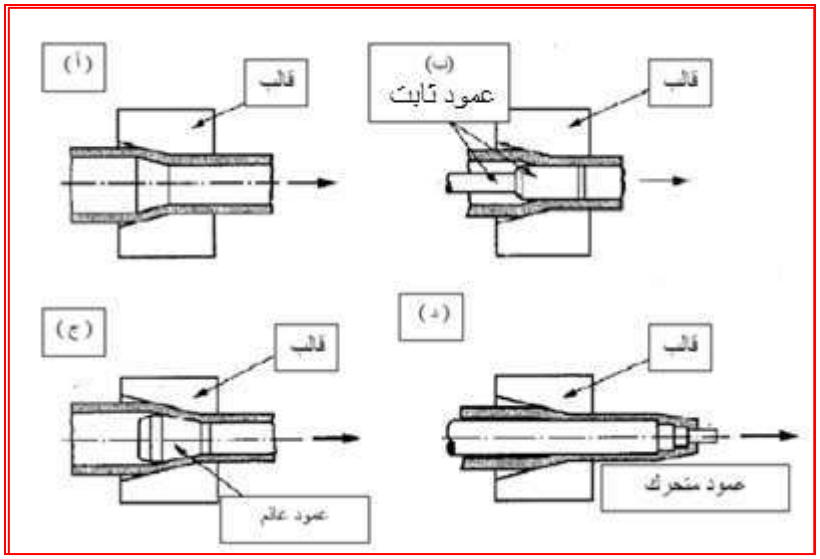
إذا كانت نسبة التقليل كبيرة فمن الممكن أن يتم السحب في مراحل عدة، وكذلك يمكن تشكيل شكل المقطع العرضي تدريجياً، وكما مبيّن بالشكل (6-23).



شكل 6-23 السحب متعدد المراحل

طرائق سحب الأنابيب Tube Drawing

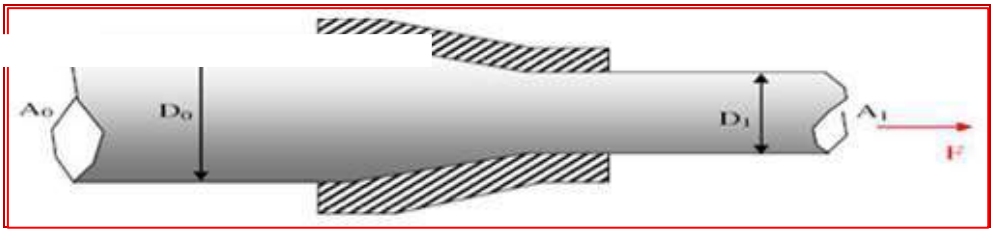
1. من دون عمود: يسحب الأنبوب خلال القالب من دون عمود وبذلك يكون القطر الداخلي والإنهاء السطحي غير مسيطر عليه، كما في الشكل (6-24- أ)
2. مع عمود ثابت: وهنا لا يتحرك العمود نسبة إلى القالب ويتحدد سُمك الأنبوب بمقدار الفراغ بين العمود والقالب، ولـذلك فمن الممـكن الحـصول على إنـهاء سطـحي جيد وسُمك دقيق، وكما في الشكل (6-24- ب)
3. باستعمال عمود عائم: يسحب العمود مع الأنبوب لكنه لا يُعد جزءاً من القالب، وسُمك الأنبوب غير دقيق لأنه يعتمد على موقع العمود نسبة إلى القالب، وهذا الموقع يتحدد بمقدار الاحتكاك بين القالب والأنبوب من جهة والأنبوب والعمود من جهة أخرى، وتستعمل هذه الطريقة لسحب الأنابيب الطويلة رقيقة الجدران (طول العمود لا يحدد طول الأنبوب)، وكما هو موضّح بالشكل (6-24- ج).
4. باستعمال العمود المتحرك: يتحرك العمود مع الأنبوب ليقلل الاحتكاك (لا يوجد احتكاك بين العمود والأنبوب) لذا يجب أن يشغل العمود بدقة، لاحظ الشكل (6-24- د).



شكل 6-24 طرائق سحب الأنابيب

سحب الأسلاك Wire Drawing

تصنع الأسلاك بالسحب البارد لقضبان مصنوعة بوساطة الدرفلة على الساخن وذلك بإمرار هذه القضبان على مراحل عدة إلى أن تتحول إلى أسلاك بالأقطار المطلوبة، وتُعد القضبان المُراد سحبها بدرفلة كتل معدنية على الساخن إلى قطر يساوي (5-6 mm) ثم يجرى سحبها بوساطة قوالب السحب إلى الأسلاك، من الضروري تنظيف القضبان من طبقات الأوكسيد السطحية قبل عملية السحب بمعاملتها ببعض الحوامض، وتستعمل عادة بعض مواد التزييت لتسهيل عملية السحب، ويبيّن الشكل (6-25) عملية سحب الأسلاك.



شكل 6-25 سحب الأسلاك

ونظراً لزيادة الصلادة الناتجة عن السحب على البارد فإن مقاومة المعدن للتشكيل ستزداد وعند تعذر الاستمرار بالتشكيل تجري العملية على مرحلتين: السحب إلى أدنى قطر ممكن والتسخين والتخمير لغرض تليين القطعة ومن ثم الاستمرار بالسحب. وقد يتكرر تسخين المعدن عدة مرات إلى أن يتم الحصول على القطر المطلوب، وتصنع القوالب المستعملة عادة من مواد معدنية تمتاز بصلادتها ومقاومتها العاليتين، وأكثرها استعمالاً هو كربيد التنكستن، وقد تستعمل أيضاً قوالب من الماس لبعض الأغراض الخاصة وتستعمل هذه العملية بشكل واسع لسحب أسلاك من النحاس والألُمنيوم والفولاذ.

الخطوات العامة لعملية سحب الأسلاك

1. تسخين كتل الفولاذ في أفران إعادة التسخين.
2. درفلة الكتلة على الساخن قبل سحب الأسلاك (هذه العملية يجب أن تكون سريعة قبل أن يبرد المعدن ويصبح أقوى).
3. يوجد نوعين من البكرات لاستلام القضيب، الأولى تدور بسرعة مناسبة مع سرعة الدرفلة وتقوم بلف القضيب، بينما الثانية ثابتة وفي الحالتين تقوم آلية ميكانيكية بلف القضيب حول البكرات.
4. تقوم الرافعات بحمل البكرات إلى العملية التالية.
5. يتم تحضير قضبان الفولاذ لعملية السحب بعدة طرائق:
   - التنظيف الكيميائي (إزالة القشرة كيميائياً): وتتم باستعمال حامض الكبريتيك لتنظيف السطح من الصدأ والأكاسيد وباستعمال مرشات مائية، تُطلى القضبان المحضرة بمادة مثل بوراكس الفوسفات لحماية السطح والتي تعمل كمزيتات في عملية السحب.
   - التنظيف الميكانيكي: وهنا تتم إزالة القشرة ميكانيكياً بطرائق متعددة مثل الحث المتعاكس للقضيب أو باستعمال الهواء المضغوط مع مواد مخدشه أو باستعمال فرش ميكانيكية.
6. بعد إزالة القشرة تربط القضبان بوساطة اللحام ومن ثم تدخل إلى البكرات.
7. لسحب سلك مفرد يتم تغذية القضيب إلى صندوق القالب المزيت وبعد السحب يلف لغرض التسويق.

8. يُسحب السلك المستمر بتغذية السلك إلى صندوق القالب المزيت ومن ثم يدرفل على عجلة لضبط سرعة السحب وبعدها يلف على بكرة لغرض التسويق.

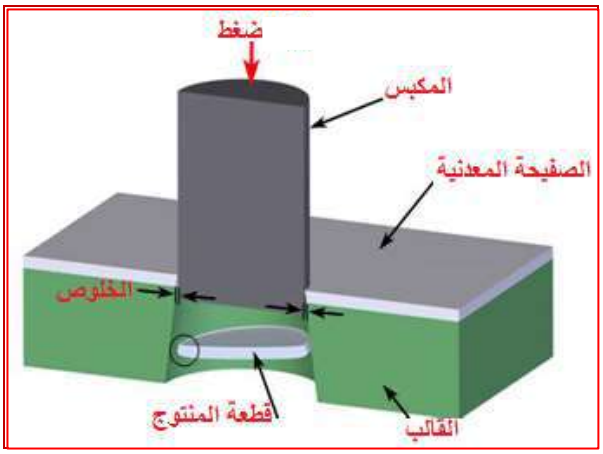
7-6 تشكيل الصفائح المعدنية Sheet Metal Forming

تُعد عمليات تشكيل الصفائح المعدنية من عمليات الإنتاج المهمة إذ تصنع أغلب الأدوات المنزلية وكثيراً من الأدوات الكهربائية بوساطة هذه العمليات إما يدوياً أو باستعمال أسطمبات خاصة، وتتم عملية تشكيل الصفائح على البارد. ويمكن تصنيف عمليات تشكيل الصفائح المعدنية إلى الآتي:

1. قص الصفائح المعدنية Shearing of Metal Sheets
2. ثني الصفائح المعدنية Bending of Metal Sheets
3. سحب الصفائح المعدنية Drawing of Metal Sheets

1-7-6 قص الصفائح المعدنية Shearing of Metal Sheets

تتم عملية قص صفيحة المعدن من دون تكوّن الرايش Chips بتعريض المعدن إلى جهود قص بين المكبس (Punch) والقالب (Die) (والاثنان مصنوعان من الفولاذ المصلد)، وكما في الشكل (6-26).

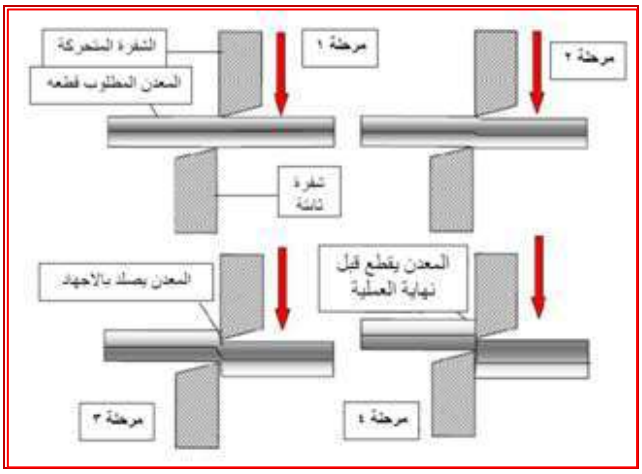


شكل 6-26 عملية قص الصفائح

مراحل عملية قص الصفائح:

1. تتحرك الحافة العليا للمشكل (Punch) باتجاه الحافة السفلى من القالب (Die) إلى أن يلامس سطح الصفيحة، ومن ثم تبدأ عملية التشكيل.
2. مع زيادة الضغط تقترب الحافتين من بعضهما وتبدأ عملية التشويه اللدن.
3. تبدأ الحافات القاطعة باختراق المعادن وفي هذه المرحلة تتعرض المادة لعملية التصليد الانفعالي.
4. يبدأ القطع بالحدوث في منطقة التصليد عند نقطة الاتصال مع الحافات القاطعة.

حينما يلتقي طرفا القطع يُفصل المعدن المقطوع بالقص إلى جزئين مختلفين ويحدث فشل المادة قبل أن تخترقهُ حافة القطع المعدنية بصورة كلية، وتعرف النسبة بين قيمة السمك الذي تخترقهُ الشفرة من المعدن إلى السمك الكلي لهُ بنسبة الاختراق (Penetration)، والشكل (6-27) يبيّن مراحل عملية قص الصفائح.

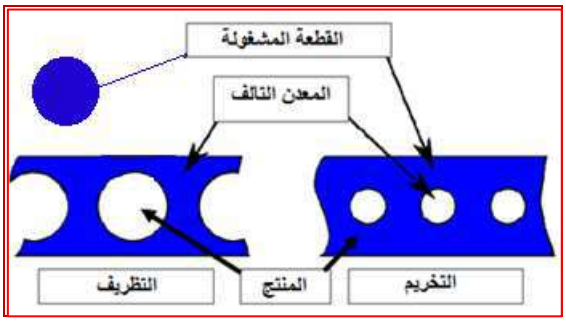


شكل 6-27 مراحل عملية قص الصفائح

أنواع عملية قص الصفائح

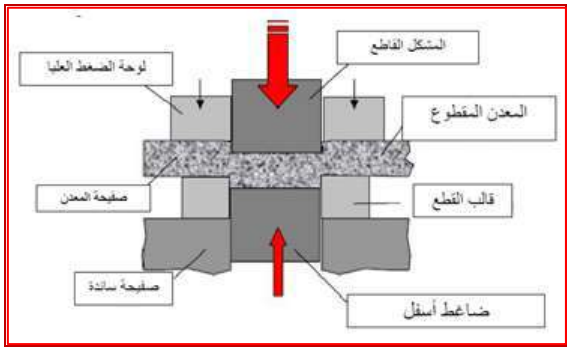
1. التجزئة Parting: قطع الصفيحة إلى قطعتين بوساطة حافات مستقيمة.
2. التخريم Piercing (Punching) والتظريف Blanking: وهاتان العمليتان متشابهتان وكلاهما عبارة عن قطع أشكال من خلال عملية قص الصفيحة والفرق بين العمليتين هو يتم قطع الشكل ورمي باقي الصفيحة في عملية التظريف بينما في التخريم يتم رمي الجزء المقطوع وتكون الصفيحة المثبتة هي المنتج، ويبيّن الشكل (6-28) بعض استعمالات عملية التخريم، في حين يوضّح الشكل (6-29) الفرق بين العمليتين.

شكل 6-28 بعض استعمالات عملية التخريم

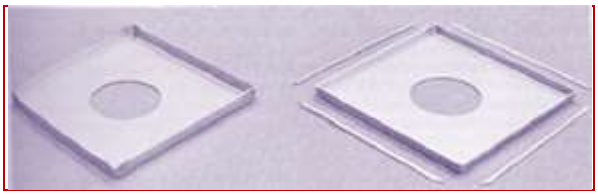


شكل 6-29 الفرق بين عمليتي التخريم والتظريف

3. التظريف الدقيق Fine Blanking: عملية شبيهة بالتظريف العادي ولكن قبل حدوث عملية القص يتم مسك الصفيحة بقوة ويتم ضغطها من الأعلى والأسفل للحصول على أبعاد دقيقة وحافات ذات أسطح جيدة، وكما في الشكل (6-30).
4. التحديد Trimming: هو إزالة المادة الزائدة (Flash) من الجزء وهي شبيهة بعملية التثقيب، ويوضّح الشكل (6-31) منتوجاً قبل وبعد عملية التحديد.



شكل 6-30 عملية التظريف الدقيق



شكل6-31 منتوج قبل وبعد عملية التحديد

القطع بالقص الاقتصادي للصفائح

خلال عملية القص يجب أن يتم توزيع الأشكال المراد قصها على الصفيح المعدني بصورة متجانسة ومنتظمة وخصوصاً في حالة الإنتاج الكمي أو المستمر لغرض تحقيق أقل خسارة ممكنة بالصفيح، أي تقليل الجزء التالف من المعدن، وتحسب نسبة التلف بالمعادلة الآتية:

$$\mathbf{Ps} = \frac{\mathbf{A}-\mathbf{B}_t}{\mathbf{A}} \times \mathbf{100\%} \qquad (6\text{-}5)$$

$$A = L \times W \quad , \qquad B_t = B \times N$$

إذ أن:

A: مساحة الصفيحة المعدنية التي يحصل بها القص (mm^2).

B_t: المساحة الكلية لشكل قطعة العمل المطلوبة (mm^2).

B: مساحة قطعة عمل واحدة (mm^2).

L: طول القص (عرض قطعة العمل زائد الخلوص ما بين القطعتين mm).

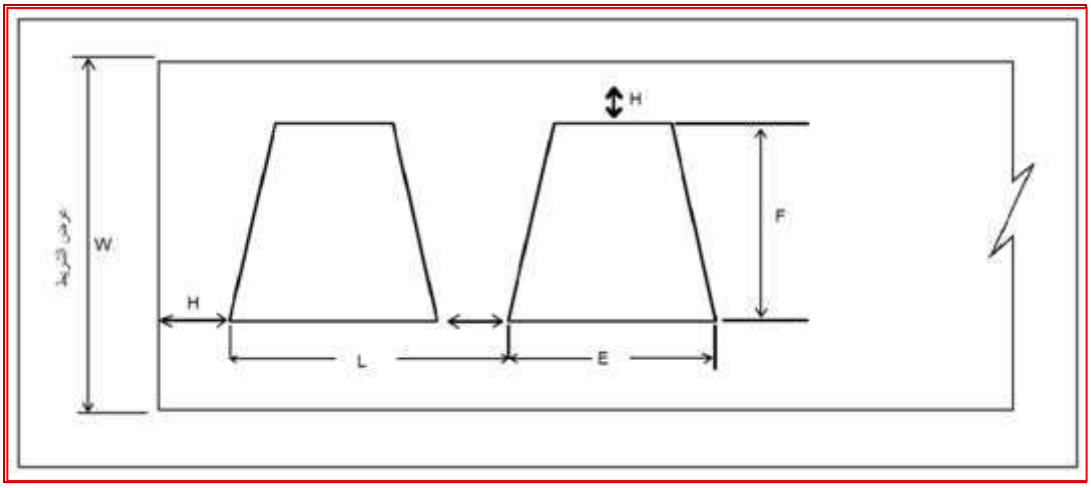
W: عرض الشريط الواحد المقطوع من الصفيحة المعدنية (عرض القص mm).

N: عدد الأجزاء المراد قصها بضربة واحدة.

t: سمك الصفيحة (mm).

طول أو عرض المنتج المطلوب أيهما أطول E, F (mm)	الخلوص بين قطعتين متجاورتين G (mm)	الخلوص بين قطعة طرفية وحافة الصفيحة H (mm)
0-50	1t	1.25t
50-150	1.25t	1.5t
150-250	1.5t	1.75t
250-400	1.75t	2t

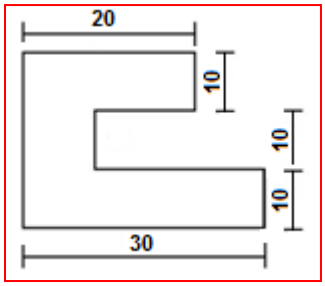
الشكل (6-32) يوضّح كيفية تخطيط الصفيحة المعدنية قبل عمليات القص مع توضيح الرموز المستعملة في حسابات القص الاقتصادي.



شكل 6-32 تخطيط الصفيحة مع الرموز المستعملة

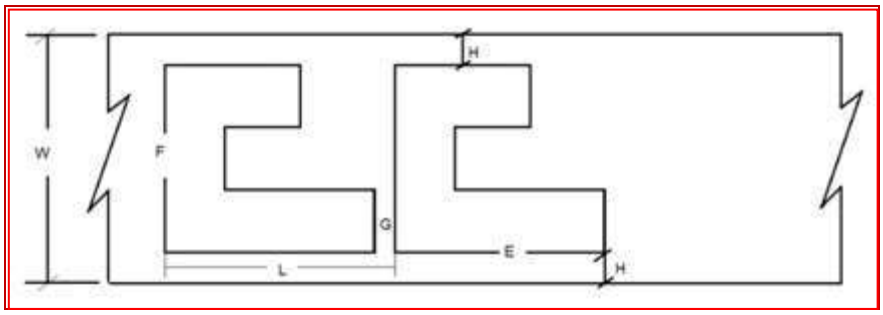
مثال 5:

جد النسبة المئوية للجزء التالف من الصفيحة المعدنية الناتج من قطع الشكل الآتي وصولاً إلى أفضل نسبة اقتصادية، سُمك الصفيحة = 2 mm، ارتفاعها F = 30 mm، طولها L = 30 mm



الحل:

نفرض أن ترتيب الشكل عند القطع يكون بالشكل الآتي:



من اختيار هذا الترتيب تكون N = 1

E = 30 mm , F = 30 , t = 2 mm

G = 1×t = 1×2 = 2 mm

H = 1.25×t = 1.25×2= 2.50 mm

L = E + G = 30 + 2 = 32 mm

W = F + 2×H = 30 + 2×2.5 = 35 mm

A = L×W =32×35 = 1120 mm^2

مساحة الجزء المراد الحصول عليه يقسم إلى مستطيلين، وكالآتي:

B = (30× 10) + (10 ×10) +(20 × 10) = 300 + 100 + 200 = 600 mm^2

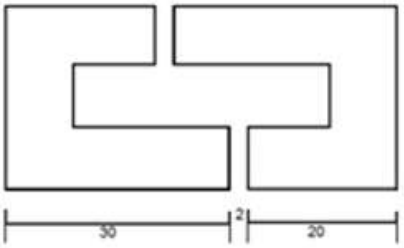
B_t= B ×N = 600×1= 600 mm^2

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

$$= \frac{1120-600}{1120} \times 100 = 46\%$$

يُلاحظ من الناتج إن نسبة التالف كبيرة، لذلك يجب إيجاد ترتيب آخر لغرض الحصول على الشكل المطلوب وبأقل قطع صفيح تالف (القص الاقتصادي) وليكن الترتيب الآتي:

سيكون بهذا الترتيب عدد القُطع بضربة واحدة هو **قطعتان**



$L = 30 + G + 20 = 30 + 2 + 20 = 52\ mm$

$W = F + 2\times H = 30 + 2\times 2.5 = 35\ mm$

$A = L \times W = 52\times 35 = 1820\ mm^2$

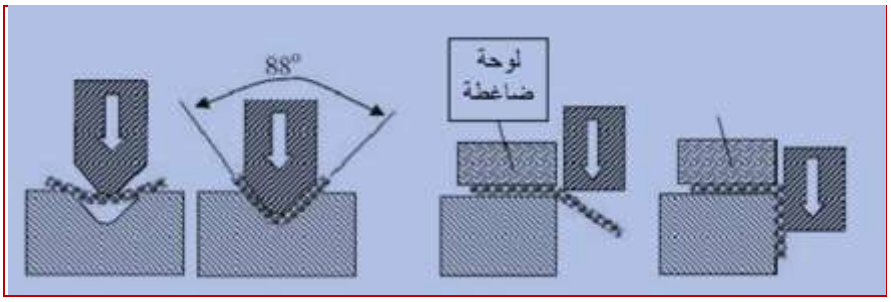
$B_T = B\times N = 600\times 2 = 1200\ mm^2$

$$P\mathbf{S} = \frac{\mathbf{A} - \mathbf{B}_t}{\mathbf{A}} \times 100\%$$

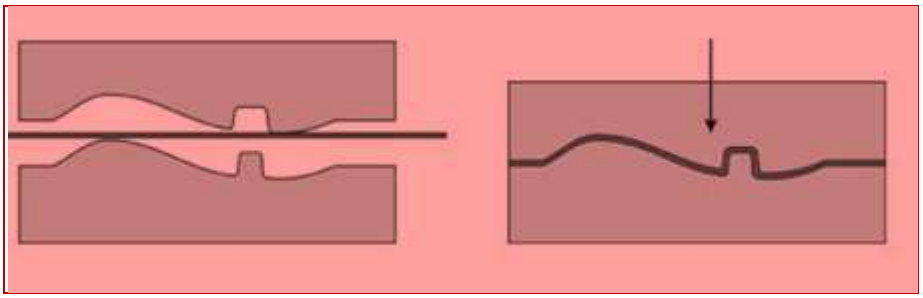
$$= \frac{\mathbf{1820-1200}}{\mathbf{1820}} 100\% = 34\%$$

2-7-6 ثني الصفائح المعدنية Bending of Metal Sheets

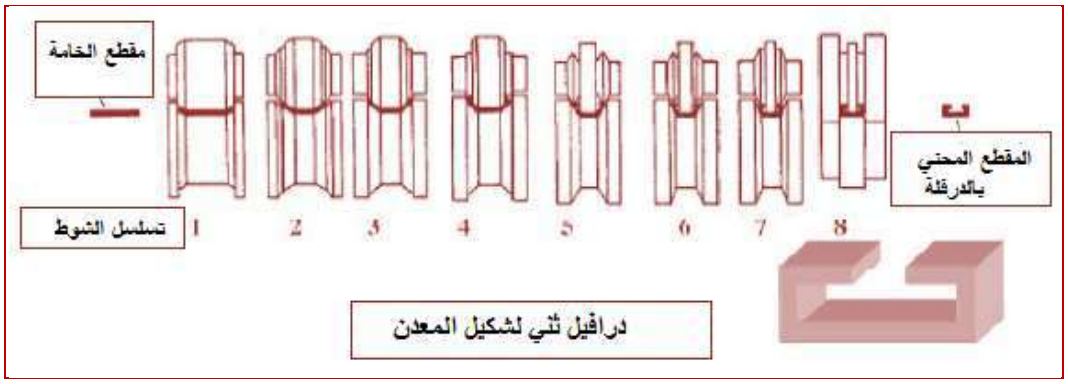
تُعد عملية الثني من أكثر عمليات التشكيل شيوعاً، وهي عبارة عن عملية تشويه لدن للمعدن حول محور خطي مع عدم تغيير المساحة السطحية أو مع تغيير بسيط فيها، ويستعمل الثني بكثرة في ثني الصفائح والأنابيب، وتستعمل طرائق مختلفة في عملية الثني بالإفادة من قوالب مغلقة ومفتوحة وتستعمل المكابس الهيدروليكية والميكانيكية المختلفة، والشكل (6-33) يبيّن ثني الصفائح، في حين يوضّح الشكل (6-34) ثني الأنابيب. لثني معدن بشكل معين ولأطوال وبشكل مستمر، يتم ثنيه بإمراره من خلال سلسلة من الدرافيل، وكما بالشكل (6-35).



شكل 6-33 ثني الصفائح



شكل 6-34 ثني الأنابيب



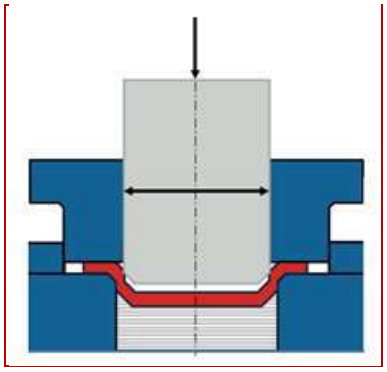
شكل 6-35 سلسلة الدرافيل

3-7-6 سحب الصفائح المعدنية Drawing of Sheets Metal

من الطرائق المستعملة في سحب الصفائح المعدنية هي السحب العميق.

السحب العميق Deep Drawing

غالباً ما يتم تشكيل صفيح معدني بسُمك معين بوساطة مكبس دائري المقطع بالضغط على الصفيح ويكبس داخل قالب دائري المقطع أيضاً والشكل الناتج عبارة عن وعاء بسُمك يساوي الفرق بين قطر المكبس والقطر الداخلي للقالب، والشكل (6-36) يبيّن عملية السحب العميق. وبالإمكان إنتاج أوعية ذات أعماق كبيرة وذلك بإجراء العملية على عدة مراحل، ويتم أولاً التشكيل إلى عمق معين على البارد ثم يسخن الوعاء الناتج فتزداد ليونته ويتقبل مقدار إضافي من التشكيل، فيجري سحبهُ مرة أخرى. وقد تتكرر عملية السحب والتسخين عدة مرات لحين تحقيق العمق المطلوب، وتستعمل عملية السحب العميق بشكل واسع لإنتاج أغلفة أو ظروف القذائف، وهياكل السيارات، وهياكل الثلاجات، وأسطوانات الغاز السائل، وأحواض الغسل والاستحمام المنزلية، والشكل (6-37) يبيّن أنواع منتجات السحب العميق. وتستعمل عملية السحب بصورة واسعة في إنتاج الصفائح الحديدية لإنتاج الأواني والأحواض المعدنية وهي عادةً من العمليات النهائية.



الشكل 6-36 عملية السحب العميق

شكل 6-37 أنواع منتجات السحب العميق

خصائص المادة الملائمة لعملية السحب العميق

1. مطيلية عالية للسماح بانسياب لدن أثناء العملية.
2. قابلية تصليد واطئة لمنع تشقق الجزء وتقليل عمليات إعادة التلدين الضرورية.
3. مقاومة شد مقبولة لتحمل جهود السحب التي تحاول تمزيق جدران المنتج أثناء سحبه.
4. حجم حبيبي متجانس ومنتظم للحصول على انسياب منتظم وتقليل ظاهرة التأذن Earring.

ملاحظة

عُرفت ظاهرة التأذن بظهور حافات بارزة في نهاية المنتوج بعد إتمام عملية السحب العميق.

أسئلة الفصل السادس

س1) املأ الفراغات الآتية بما يلائمها:

1. يصنف التشكيل الميكانيكي بحسب شكل قطعة العمل إلى..... و .....
2. إن درجة حرارة إعادة التبلور تساوي ..... من درجة انصهار المعدن.
3. أنواع التشكيل الكتلوي ..... و..... و..... و.....
4. تصنف عمليات تشكيل الصفائح المعدنية إلى .....
5. ..... عبارة عن تشكيل المعادن على الساخن وذلك بكبسها في قوالب تمثل الشكل المراد الحصول عليه.

س2) اذكر أنواع ماكينات الدرفلة واشرح واحدة منها.

س3) ماهي خصائص الطرق بالقالب المفتوح؟

س4) ما الفرق بين البثق المباشر وغير المباشر؟

س5) اذكر مراحل عملية قص الصفائح.

س6) اذكر طرائق عملية قص الصفائح.

س7) اشرح عملية ثني الصفائح، ولأي الأغراض تستخدم وضح ذلك بالرسم؟

س8) ارسم عملية السحب العميق.

س9) كيف يمكن تمييز نوع التشكيل للمعادن (على البارد أو على الساخن)؟

س10) تم تشكيل قضيب (مقطع دائري) معدني على البارد وكان نصف قطره الأصلي (60 mm) ونصف قطره النهائي (40 mm)، احسب النسبة المئوية للتشكيل على البارد.

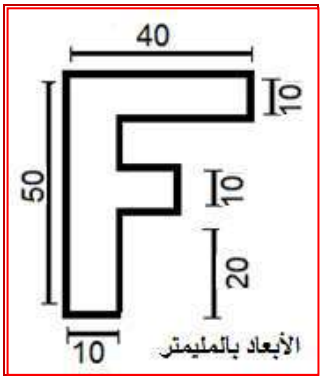
(55% /ج)

س11) قطعتان من الحديد تم تشكيلهما بالطرق، الأولى في درجة حرارة (900 °C) والثانية (500 °C)، أيهما يتم تشكيلها على الساخن؟ ولماذا؟ علما أن درجة انصهار الحديد (1535 °C).

س12) قضيب من الصلب قطره (16 mm) وسمكه (2 mm)، سخن ثم كبس فأصبح قطره (40 mm) فما سمكه بعد الكبس؟

0.32 mm /ج

س13) احسب النسبة المئوية للجزء التالف من الصفيح المعدني الناتج من قطع الشكل فيما يأتي، وهل يمكن تقليلها إلى نسبة أخرى؟ سمك الصفيحة 2mm



(37%) /2ج ،(61%) /1ج

س14) قضيب أسطواني بطول 9 cm ، سـحب القضيب بحيث أصبح طوله النهائي 15 cm وقطره 1.5 cm ، احسب مساحة القضيب اللازم لعمليةٌ التشكيل. $2.94cm^2$/ج

س15) قطعة خام معدنية قطرها (28 cm) سخنت وأجريت عليها عملية كبس فأصبحت قرصاً دائرياً قطره (48 cm)، فما طول قطعة الخام قبل الطرق؟ إذا علمت أن سمك القرص (4 cm).

11.755 cm /ج

الفصل السابع

عمليات المعالجة ما بعد اللحام والتشكيل

Processes of Treatment after Welding and Forming

الأهداف

الهدف العام

في هذا الفصل سيتمكن الطالب من معرفة المعاملات الحرارية، وعمليات المعالجة للمعادن ما بعد اللحام، والتشكيل وكيفية إزالة التشوهات والإجهادات المتبقية في المعادن بعد عمليات اللحام والتشكيل، وتحسين الخواص للملحومات والمعادن والصفائح ما بعد التشكيل.

الأهداف الخاصة: بعد الانتهاء من دراسة الفصل يتمكن الطالب من فهم الآتي:

- المعاملات الحرارية.
- التلدين، المعادلة (التطبيع)، والتقسية، والمراجعة.
- عمليات المعالجة ما بعد اللحام.
- عمليات المعالجة ما بعد اللحام لإزالة التشوهات.
- عمليات المعالجة ما بعد اللحام لإزالة الجهود المتبقية.
- عمليات المعالجة ما بعد التشكيل
- الطلاء ما بعد عمليات اللحام وعمليات التشكيل

عمليات المعالجة ما بعد اللحام والتشكيل

Processes of Treatment after Welding and Forming

1-7 مقدمة Introduction

يتناول الفصل السابع أنواع العمليات والمعالجات التي تجرى ما بعد اللحام والتشكيل للمعادن، إذ أنها تتعرض إلى تغيرات حرارية تؤثر على البنية المجهرية وخواص المعدن الملحوم أو المُشكَل. ففي عملية اللحام للمعادن يتعرض المعدن إلى تدرج حراري ومن ثم انجماد لمعدن اللحام والذي يعتمد على الظروف المحيطة بمنطقة اللحام، والبنية المجهرية، والغازات الممتصة، والمسامات الغازية وكل هذه العوامل تؤثر في خواص المعدن، لذا تُعد المعاملة الحرارية من أهم طرائق المعالجة. وسيتناول الفصل شرحاً موجزاً عن المعاملات الحرارية للمعادن.

2-7 المعاملات الحرارية Heat Treatment

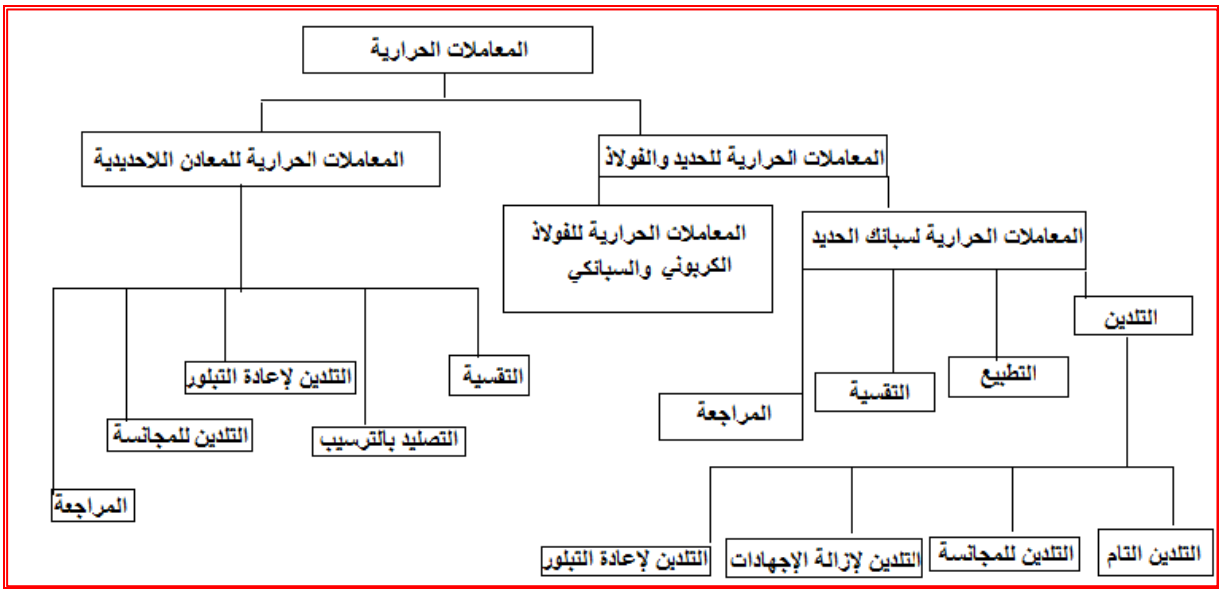
تعرف المعاملة الحرارية بأنها عملية تسخين (Heating) وتبريد (Cooling) بوسائط مختلفة خلال مُدد زمنية محددة لبعض أنواع المعادن وسبائكها لغرض الحصول على خواص معينة مرغوباً فيها وتشمل المعاملات الحرارية ثلاث مراحل رئيسة وهي:

1. التسخين عند درجة حرارة محددة.
2. التثبيت عند هذه الدرجة الحرارية لمدة زمنية مناسبة.
3. التبريد بوسط مناسب.

وتصنف المعاملات الحرارية بالاعتماد على الدرجة الحرارية والفترة الزمنية للتبريد ومعدل التبريد إلى الآتي:

1. التلدين Annealing
2. التطبيع Normalizing
3. التقسية Hardening
4. المراجعة Tempering

ويمكن تقسيم المعاملة الحرارية بحسب المعادن وسبائكها، وكما موضّح في المخطط (7-1) إلى الآتي:



مخطط 7-1 المعاملات الحرارية للمعادن

7-2-1 التلدين Annealing

يسمى التلدين في بعض المراجع العلمية بالتخمير، وتتضمن هذه المعاملة الحرارية تسخين المعدن إلى درجة حرارية عالية (أعلى من درجة إعادة التبلور) لمدة زمنية معينة كافية ثم تبريده ببطء شديد وتتم بداخل الفرن ليصل إلى درجة حرارة الغرفة.

ومن أهم الأهداف الأساسية لمعاملات التلدين:

1. تقليل الصلادة Hardness وكذلك تقليل القصافة Brittleness.
2. تغيير البنية المجهرية للحصول على خواص ميكانيكية مرغوباً فيها.
3. تليين المعدن لتحسين قابلية التشغيل والتشكيل.
4. إزالة الإجهادات المتبقية المتكونة في أثناء العمليات التي أجريت على المعدن وسببت هذه الجهود كعمليات التشكيل.
5. مجانسة البنية البلورية.

ويمكن تقسيم التلدين إلى ثلاث أنواع:

1. التلدين التام Full- Annealing
2. التلدين لغرض المجانسة Annealing for Homogenization
3. التلدين لغرض إزالة الإجهادات Annealing for Stress – Relieving

أولاً: التلدين التام Full- Annealing

وتتضمن هذه المعاملة تسخين المعدن إلى درجة حرارية عالية والتثبيت عند هذه الدرجة لمدة زمنية ثم التبريد ببطء شديد (داخل الفرن) لغرض تحسين قابلية التشغيل والتشكيل وإزالة الإجهادات المتبقية ومجانسة البنية البلورية، علماً أن الحبيبات تنمو وتكبر كلما زادت درجة الحرارة وزاد بقاء قُطع العمل في داخل الفرن. ويستعمل التلدين التام عادةً للفولاذ وخصوصاً الفولاذ واطئ أو متوسط الكربون.

ثانياً: التلدين لغرض المجانسة Annealing for Homogenization

وتتم عملية التلدين لغرض المجانسة بالتسخين إلى درجات حرارية عالية ولمدد زمنية طويلة يتبعه التبريد البطيء نوعاً ما لإزالة الانعزال الحبيبي ومجانسة البنية. ويسخن الفولاذ إلى درجات حرارية تتراوح (1100 – 1200°C) لمدة زمنية (10-20 hr) يتبعه التبريد البطيء نسبياً في داخل الفرن.

ثالثا: التلدين لغرض إزالة الإجهادات Stress – Relieving Annealing

تتم عملية التلدين لإزالة الإجهادات بالتسخين إلى درجة حرارية معينة ثم التبريد في داخل الفرن حيث يسخن الفولاذ إلى درجة حرارية (500-650 °C) يتبعه التبريد البطيء نسبياً في داخل الفرن أو في الهواء الساكن. وتؤدي عملية التلدين إلى حدوث تغييرات داخلية في الحالة الصلبة وتحدد درجة حرارة التلدين نوع هذه التغييرات.

وقد تطرأ على الجزء المعدني خلال عملية التلدين التغيرات التي تحدث في مرحلة أو أكثر من المراحل الثلاث المتعاقبة الآتية:

1. الاستعادة Recovery
2. إعادة التبلور Recrystallization
3. النمو الحبيبي Grain Growth

أولاً: مرحلة الاستعادة Recovery Stage

تحدث في درجات حرارية منخفضة نسبياً (أقل من درجة حرارة إعادة التبلور Tr) وتزداد الطاقة الحركية للذرات نتيجة الارتفاع بدرجة الحرارة فتصبح في مواقع أقرب للاتزان في الشبكة الحيزية للحبيبات وهذه الحركة القليلة تقلل من الإجهادات الداخلية الناتجة من عملية التشكيل السابقة، ولا تؤدي مرحلة الاستعادة إلى تغيير مرئي بالتركيب المجهري أو بالخواص الميكانيكية.

ثانياً: مرحلة إعادة التبلور Recrystallization Stage

تبدأ هذه المرحلة حينما تصل درجة الحرارة إلى درجة تساوي أو أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور(Tr) وتتكون نويات الحبيبات في المناطق التي تكون فيها الطاقة عالية (في الحدود الحبيبية). ومع مرور الوقت تنمو هذه النويات إلى حبيبات جديدة خالية من الإجهادات الداخلية وتزول تدريجياً الحبيبات القديمة المشوهة ويولد هذا تغييراً كبيراً في الخواص الميكانيكية إذ يحدث هبوطاً سريعاً في الصلادة ومتانة الشد وارتفاع في المطيلية.

العوامل المؤثرة في درجة إعادة التبلور (T_r):

1. نسبة التشكيل السابقة.
2. زمن التلدين.
3. وجود الشوائب أو إضافة عناصر السبك.

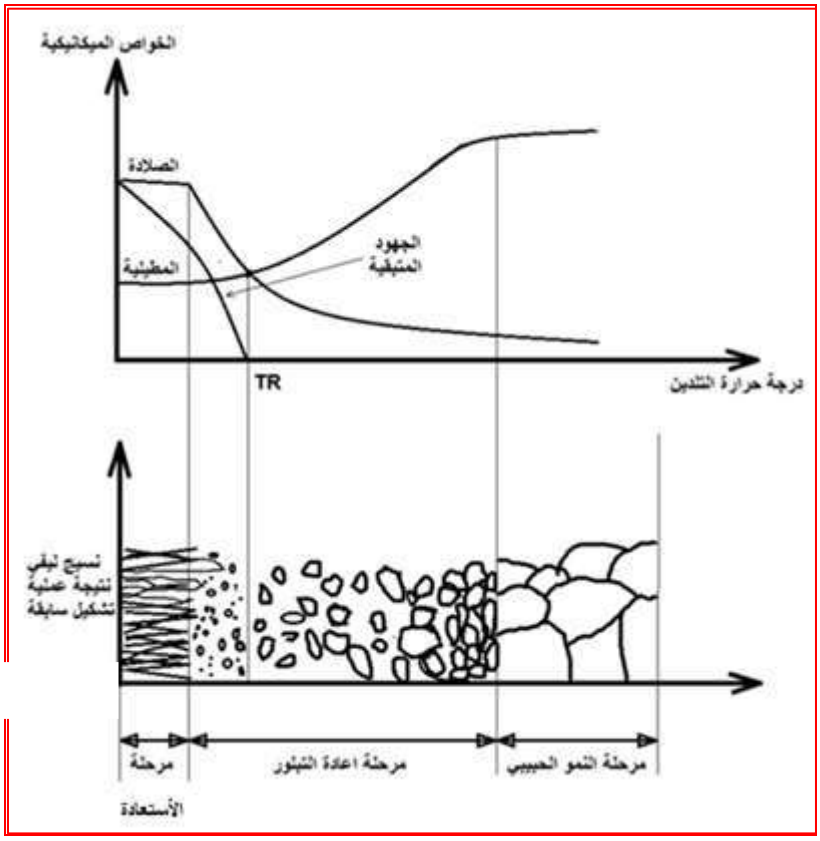
ثالثاً: مرحلة النمو الحبيبي Grain Growth Stage

إذا كانت درجة الحرارة أعلى من درجة إعادة التبلور فإن نويات الحبيبات تنمو وتكبر حتى تصبح حبيبية، لذا ستقل الصلادة ومتانة الشد وترتفع المطيلية بمقدار يسير.

العوامل المؤثرة على النمو الحبيبي:

1. زمن التلدين.
2. درجة حرارة التلدين.
3. نسبة التشكيل على البارد.
4. وجود عناصر السبك أو الشوائب.

ويبيّن الشكل (7-1) مراحل عملية التلدين وتأثيرها على الخواص الميكانيكية.



شكل 7-1 مراحل عملية التلدين وتأثيرها على الخواص الميكانيكية

7-2-2 التطبيع (المعادلة) Normalizing

تتم المعادلة بالتسخين إلى درجة حرارية معينة أعلى من (A_3) بالنسبة للفولاذ والثبوت عند هذه الدرجة لمدة زمنية محددة ثم يتم التبريد في الهواء الساكن، بحيث يتم الحصول على حجم حبيبي ناعم وبذلك تتحسن الخواص الميكانيكية.

3-2-7 التقسية Quenching

يتم إجراء هذه المعاملة الحرارية بتسخين المعدن إلى درجة حرارية عالية نوعاً ما أعلى من (A_3) أو (A_1) بالنسبة للفولاذ، والتثبيت عند هذه الدرجة لمدة زمنية محددة، ثم يتم التبريد السريع في وسط معين يسمى وسط التقسية مثل الماء أو الزيت.

4-2-7 المراجعة Tempering

تتم بهذه المعاملة الحرارية تسخين الفولاذ المقسى إلى درجة حرارية أقل من درجة حرارة التقسية (A_1) والثبات عند هذه الدرجة لمدة زمنية معينة ثم التبريد في الهواء لاستعادة بعض الخواص المفقودة المرافقة لعملية التقسية كالمتانة (Toughness).

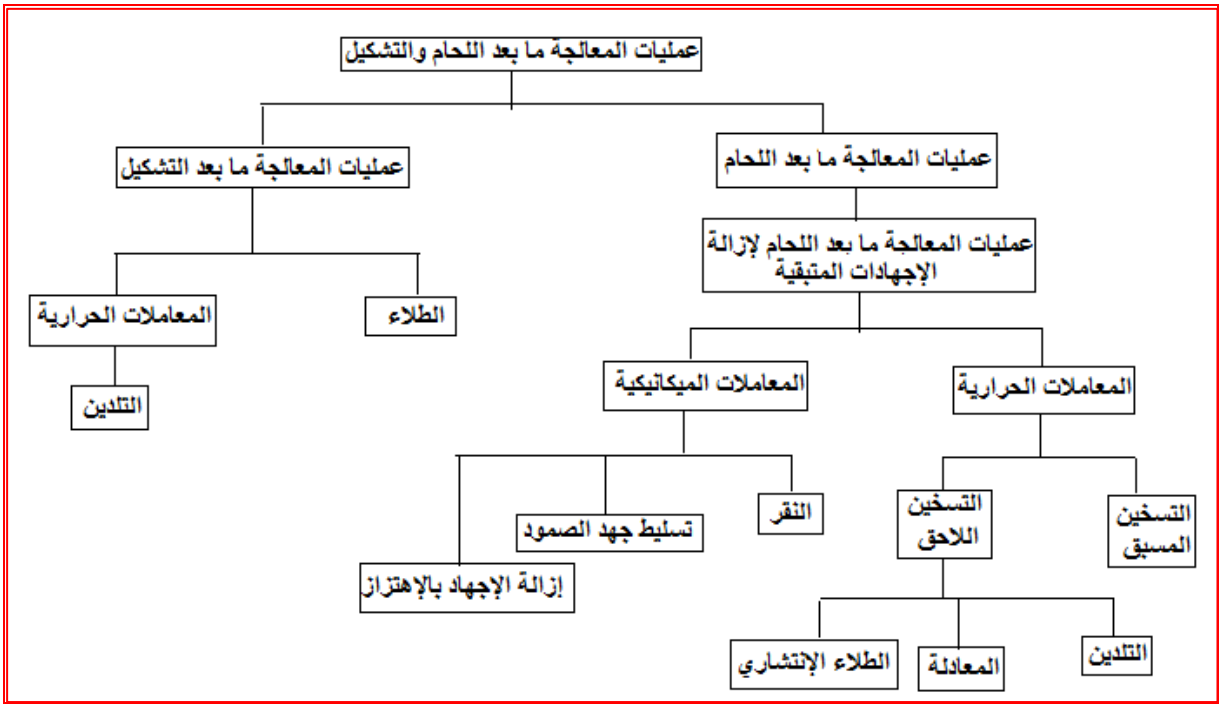
3-7 المعالجة ما بعد اللحام والتشكيل

Treatments after Welding and Forming

تتضمن هذه العمليات طرائق المعالجة التي يتم استعمالها لإزالة التشوهات والإجهادات المتبقية بعد عملية اللحام والتشكيل. ويمكن تصنيف هذه العمليات كالآتي:

1. المعالجة ما بعد اللحام Treatment after Welding
2. المعالجة ما بعد التشكيل Treatment after Forming

ويوضّح المخطط (2-7) تصنيف عمليات المعالجة ما بعد اللحام والتشكيل.



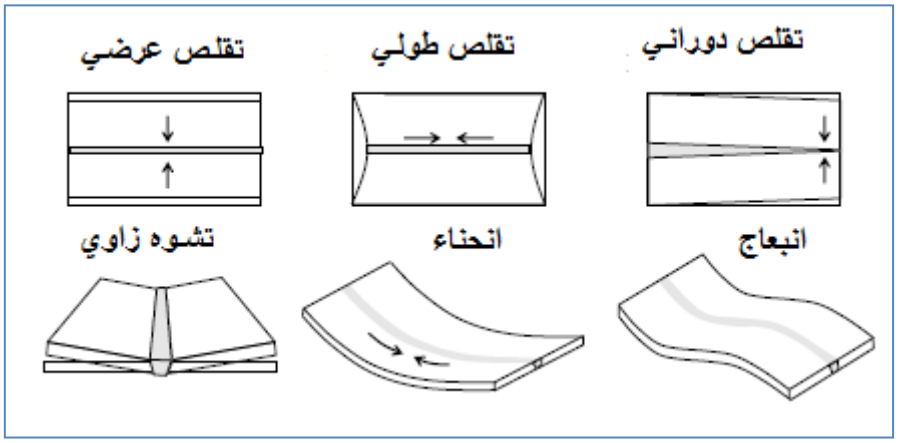
مخطط 2-7 تصنيف عمليات المعالجة ما بعد اللحام والتشكيل

1-3-7 عمليات المعالجة ما بعد اللحام Treatments after Welding

تنتج عن التسخين والتبريد في عملية اللحام انفعالات حرارية في معدن اللحام ومعدن الأساس والمناطق القريبة من اللحام ويرافق هذه الانفعالات تشويه دائمي وإجهادات متبقية، وهذه الجهود تولد قوى داخلية تسبب انحناء وانبعاج وإزاحة تسمى بالتشوه والتي تسبب تغييراً في الخواص الميكانيكية للملحومة، والتغييرات الثلاثة الأساسية التي تسبب التشوه في الملحومات، وهي:

1. الانكماش المستعرض العمودي على خط اللحام.
2. الانكماش الطولي الموازي لخط اللحام.
3. التشوه الزاوي (الدوران حول خط اللحام).

ويوضّح الشكل (2-7) الأنواع المختلفة من التشوهات.



شكل 7-2 الأنواع المختلفة من التشوهات

تتم عمليات المعالجة ما بعد اللحام لإزالة التشوهات والإجهادات المتبقية، فجزء من هذه العمليات تستعمل لإزالة التشوه والجزء الآخر يعمل على تقليل الإجهادات الداخلية والتشوهات في الملحومة.

1-1-3-7 عمليات ما بعد اللحام لإزالة الإجهادات المتبقية

Treatments after Welding to Relieving the Stresses

وتجرى هذه العمليات لإزالة الإجهادات المتبقية والتشويهات وتتضمن الآتي:

1. المعاملات الحرارية للملحومات Heat Treatments of Weldments
2. المعاملات الميكانيكية للملحومات Mechanical Treatments of Weldments

أولاً: المعاملات الحرارية للملحومات Heat Treatments of Weldments

المعاملة الحرارية للمعدن الأساس أثناء اللحام

يكون اللحام الانصهاري للمعدن عادة مصحوباً بمعاملة المعدن المجاور لمنطقة اللحام حرارياً وكما مرَ ذكره آنفاً.

1- الطور الحراري Heating Phase

يتعرض المعدن الأساس المجاور لمنطقة اللحام إلى دورة حرارية معقدة تتضمن درجات حرارة تتراوح بين درجة انصهار المعدن الأساس ودرجات الحرارة الاعتيادية. وتؤثر هذه الدورة الحرارية على بنية المعدن وخواصهِ تأثيراً كبيراً، ونجد في المنطقة البعيدة عن منطقة الانصهار فيما يخص الفولاذ إن البنية المجهرية لا تتغير في هذه المنطقة (المعدن الأساس) ولدى الاقتراب إلى منطقة اللحام هنالك مناطق تتكون من بُنية بيرلايت مشوهة بعض الشيء، وتدل على أن المعدن في المنطقة قد سخن فوق درجة الحرارة السفلية (723°C)، التي تحدد في مخطط الحديد – كربيد الحديد مباشرة بحيث إن هذا التسخين يكفي لتحويل البيرلايت إلى الأوستنايت ولو جزئياً على الأقل، إلا انهُ لا يكفي لتشويه الفيرايت أو تحويلهُ. عند التبريد يعود الأوستنايت إلى التحول مرة أخرى إلى البيرلايت الناعم. وتتغير البنية في المناطق الأقرب إلى منطقة اللحام بشكل أوسع حيث يتحول البيرلايت إلى الأوستنايت ويبدأ بعض الفيرايت بالذوبان في المحلول الجامد ويسبب التبريد اللاحق إعادة ترسيب البيرلايت على شكل بنية مبعثرة. في المناطق الأكثر قرباً من منطقة اللحام يتحول المعدن كلياً إلى الأوستنايت على هيأة بنية جديدة ذات حبيبات من البيرلايت الناعم. عند الاقتراب من خط الانصهار، تؤدي درجات الحرارة العالية جداً إلى تكبير الحجم الحبيبي، لذا فإن المعدن الأساس يشمل سلسلة من البنية المتدرجة والمحيطة بمنطقة اللحام استناداً إلى التدرج الحراري الذي تعرضت له هذه المنطقة.

2- طور التبريد Cooling phase

إن التغيرات الحاصلة في البنية المجهرية لدى التبريد السريع معروفة، وفيما يخص التغيرات في الفولاذ الكربوني يمكن أن يبرد بسرعة تتراوح ما بين سرعة التبريد في الهواء وسرعة تبريد في الماء. والإخماد بالماء يؤدي إلى تكوين بنية مجهرية (صلدة جداً) مختلفة كلياً عن البنية المجهرية (أقل صلادة) الناتجة عن التبريد بالهواء.

العوامل المؤثرة على معدل أو سرعة تبريد منطقة اللحام تعتمد على الآتي:

1. كمية الحرارة المستعملة في أثناء اللحام.
2. درجة الحرارة المسبقة للأجزاء الملحومة.
3. سُمك الملحومات.
4. تصميم منطقة اللحام.

3- إزالة الإجهادات Stresses Relieving

إزالة الإجهادات هي معاملة حرارية يتم فيها إعادة تسخين الفولاذ بدرجة حرارة أقل من درجة A_1 (723°C)، والغرض منها هو إزالة الإجهادات واستعادة مقدار من المتانة. إن أهم تأثير للتسخين اللاحق ما بعد اللحام هو لتحويل المارتنسايت المتكوّن عند حدود الحبيبة للفولاذ المتوسط الكاربون إلى مارتنسايت مراجع مع إزالة عالية للإجهادات الداخلية.

4- التغيرات الحجمية Volumetric Changes

تسبب التغيرات الحجمية الناتجة في الملحومات والتي تصاحب عملية اللحام التشوه وإجهادات متخلفة أو حتى تشقق منطقة اللحام أو المناطق الأخرى في خلال الدورة الحرارية، وتنتج هذه التغيرات الحجمية بشكل أساس من التمدد والتقلص الحراريين في المعدن المصاحب للتغيير بالأطوار بسبب حرارة اللحام. تسبب التغيرات الحجمية المصاحبة للدورة الحرارية في اللحام عدداً من المشاكل تعود إلى الظروف المصاحبة لهذه الدورة وهي:

1. تأثيرات الجو المحيط على التفاعلات في الحالة السائلة. قد يتفاعل معدن اللحام المنصهر أثناء اللحام مع بعض مركبات الجو المحيط، مثل: الأوكسجين والنتروجين والهيدروجين، أو مع بعض هذه الغازات مع الكربون. ويعتمد مقدار هذا التفاعل الكيمياوي على درجة حرارة اللحام المستعملة والمدة الزمنية التي يبقى فيها اللحام منصهراً والمساحة السطحية للمعدن المنصهر والمعرض للجو المحيط، ودرجة الحماية المتوفرة لمعدن اللحام في عمليات اللحام المختلفة.
2. بعض التأثيرات لعناصر سبك معينة على معدن اللحام والتي قد تؤثر سلباً على البنية المجهرية وكما في لحام بعض أنواع الفولاذ وهذه العناصر هي الكاربون، المنغنيز، الفسفور، الكبريت، السيليكون، النيكل، النحاس، الكروم، المولبيدنيوم، الفناديوم، الألمنيوم، التيتانيوم، الأوكسجين، الهيدروجين، والنتروجين.

تُعد المعاملات الحرارية ضرورية للحفاظ على خواص المعدن الأساس أو لاسترجاعها، إذ تتأثر هذه الخواص بحرارة اللحام. وبالإضافة إلى ذلك فإن خواص معدن اللحام المترسب قد تحسن أو تعدل باستعمال هذه العمليات.

المعاملات الحرارية التي تجرى للملحومات، هي:

- التسخين المسبق Preheating
- التسخين اللاحق Post heating

التسخين المسبق Preheating

ويتضمن التسخين المسبق رفع درجة حرارة المعدن الأساس أو مقطع منه إلى درجة أعلى من المحيط قبل إجراء عملية اللحام. وقد تكون الدرجة واطئة تصل (30°C) أو تصل (650°C) عند لحام حديد الزهر المطيلي أو(350°C) عند لحام الصلب عالي الصلادة وعامةً يجب أن يسيطر على درجة حرارة التسخين المسبق تماماً لتلافي حدوث تغيرات غير مطلوبة. والوسيلة المفضلة في عملية التسخين المسبق تسخين القطعة في الفرن عند الدرجة المطلوبة أو التسخين باستعمال أجهزة التسخين الحثي عند لحام الأنابيب أو الهواء الساخن أو المصابيح المشعة للحرارة. وجميع هذه الأساليب مصحوبة بأجهزة قياس درجة الحرارة.

ومن ميزات التسخين المسبق ما يأتي:

1. أسلوب فعال لتخفيض تشقق المعدن الأساس ومعدن اللحام.
2. يقلل معدل التبريد في معدن اللحام ومنطقة التأثير الحراري في المعدن الأساس مما يحد من التحولات الطورية غير المرغوب فيها.
3. يقلل من التشوهات عامةً.

التسخين اللاحق Post heating

يستعمل التسخين اللاحق بالمعاملات الحرارية لإزالة الإجهادات المتبقية والذي يتضمن تسخيناً منتظماً للبنية لدرجة ملائمة والاحتفاظ بالبنية المجهرية عند هذه الدرجة لمدة محددة مسبقاً وتليها عملية تبريد منتظمة. وتنجز عملية إزالة الإجهادات عند مدى أدنى من الحد الحرج A_1 (723°C) والذي يحدث عنده التغيرات في البنية المجهرية والأبعاد الخارجية، وتعتمد نسبة الجهد الداخلي المزال على نوع المعدن ومقاومة الخضوع ومدى تأثير هذه العملية في البنية المجهرية، فضلاً عن مقاومة الصدمة ومقاومة الشد، لذا فإن اختيار درجة الحرارة يجب أن يتم بقيمة تعطي الخواص المرغوب فيها. تسخن الملحومات الكبيرة التي لا يمكن وضعها في الأفران على جانبيها إلى درجات حرارية ما بين (150-200°C).

ثانيا: المعاملات الميكانيكية Mechanical Treatments

تشمل المعاملات الميكانيكية الطرائق الآتية:

1. النقر Penning
2. تسليط إجهاد الصمود Applying Proof Stress
3. إزالة الإجهاد الاهتزازي Vibratory Stress - Relieving

أولاً: النقر penning: يستعمل النقر بحافة المطرقة على جانبي اللحام، وهناك أساس ثابت فيما يخص عدم إجراء النقر للخط الأول قد يزيل التركيبة الملحومة إلى الجانب أو يثقب اللحام، وفي هذه العملية يتم اختيار الأجهزة بدقة نظراً لحاجة عملية النقر إلى قوة معينة دون حدود التصليد الانفعالي. وأن لا يولد الحمل المستعمل من الأجهزة جهد حناية قد تسبب التشقق في اللحام، ولا يفضل نقر الخط الأول من اللحام لتفادي حدوث التشكيل البارد الذي يؤثر بمعدن اللحام، ولأجل أن يكون النقر فعالاً يجب أن يجرى لكل خط لحام عدا الخط الأول ويقل التأثير هذا بزيادة سُمك المعدن. وعند نقر اللحام تُستعمل المطارق الميكانيكية ذات المساند المسطحة أو المشكلة حسب نوع اللحام لتخفيض التشويه في الصفائح المعدنية الملحومة. وكلما قل سُمك المعدن تسند القطعة من الخلف بساند لتقليل تأثير المطرقة وتحديد التشويه الناتج من النقر. وينقر المعدن المتأثر مثل نقر منطقة اللحام.

ثانياً: تسليط إجهاد الصمود Applying Proof Stress: إن تسليط حمل ثقيل بشكل منتظم يقلل من الإجهاد المتبقي الطولي اعتماداً على كمية هذا الحمل وتستعمل التقنية كعملية نهائية في التصنيع، ويعتمد التحميل في إجهاد الثبات على التشويه الدائمي للمعدن (اللدن). ويستعمل عادةً التحميل الهيدروستاتيكي في لحام الخزانات الأسطوانية والكروية وفي خزانات الضغط الأسطواني حيث ينتج من التحميل الهيدروستاتيكي جهداً محيطياً ضعف الجهد الطولي تقريباً، لذا فإن إزالة الإجهادات المتبقية المحيطية هي نصف إزالته في جهد اللحام الطولي.

ثالثاً: إزالة الإجهاد الاهتزازي Vibratory Stress- Relief: إن طريقة إزالة الإجهاد الاهتزازي من الطرائق الحديثة، إذ تستعمل الطاقة الميكانيكية على هيأة ترددات عالية أو واطئة في إزالة الإجهاد المتبقي في اللحام. وتُستعمل في هذه الطريقة مولدة موجات تعمل ميكانيكياً إذ يربط إليها الجزء المراد إزالة الإجهاد المتبقي فيه، مما ينتج تشوهاً دائمياً في المواضع المراد إزالة الإجهاد المتبقي منها، وليس من المؤكد إزالة جميع الإجهاد المتبقي بشكل كامل إلا إن تخفيض قيمة الإجهاد المتبقي إلى مستوى أدنى مما يجعل الملحومة آمنة.

ومن ميزات طريقة إزالة الإجهادات المتبقية الاهتزازي:

1. تساعد في زيادة مقاومة الكسر الهش.
2. لا تحدث أي تغيير في البنية الدقيقة في معدن اللحام أو منطقة التأثير الحراري.
3. لا تتأثر الخواص الميكانيكية لعدم حصول تغيير محسوس في هذه المناطق.

7-3-2 عمليات المعالجة ما بعد التشكيل Treatments after Forming

يؤدي التشكيل على البارد إلى تشويه البنية البلورية للأجزاء المعدنية ونتيجة لذلك يختزن جزء من الطاقة داخل المعدن على هيأة جهد داخلي بالإضافة إلى ارتفاع الصلادة وانخفاض المطيلية والقساوة (مقاومة الصدمات)، وغالباً ما يعقب التشكيل على البارد معاملات حرارية أو عمليات الطلاء للتخلص من هذه التأثيرات السلبية.

وتتضمن عمليات المعالجة ما بعد التشكيل كما في المخطط (7-2) الآتي:

- المعاملات الحرارية Thermal Treatments of Weldments
- الطلاء Coating

7-3-2-1 المعاملات الحرارية للمعادن ما بعد التشكيل

Heat Treatments of Metal after Forming

المعاملات الحرارية للفولاذ المدرفل Heat Treatments for Rolled Steel

يشمل الفولاذ المدرفل القضبان ذات المقاطع الدائرية والمربعة والسداسية وغيرها، والأشرطة والشرائح والمقاطع الزاوية والأخاديد وقضبان السكك الحديدية والصفائح السميكة والرقيقة والأنابيب والأسلاك، وتنتج كافة بالدرفلة على الساخن. ويُسمى الفولاذ الذي تتم درفلته وهو ساخن ومن دون أن يتعرض إلى أي تشكيل على البارد لاحقاً، بالفولاذ المدرفل على الساخن في حين أن منتوجات أخرى مثل القضبان والأشرطة والأنابيب والأسلاك تشكل تشكيلاً إضافياً بالسحب على البارد فتُسمى بالفولاذ المسحوب على البارد. كما إن منتوجات أخرى تشكل إضافياً بالدرفلة على البارد بعد درفلتها على الساخن، وتسمى بالفولاذ المدرفل على البارد. تحتاج بعض المنتجات المذكورة آنفاً إلى معاملات حرارية محددة نوجزها بالفقرات الآتية:

المعاملات الحرارية للفولاذ المدرفل على الساخن

لابد من معاملة صفائح الفولاذ المنتجة بالدرفلة على الساخن والمراد تشكيلها بالسحب العميق حرارياً. وتتم معاملة صفائح الفولاذ الواطئ الكربون إما بالتلدين التام أو التطبيع الذي يصغر الحجم الحبيبي. وتعامل صفائح الفولاذ المتوسط الكربون بالتلدين لتكوير السمنتايت (أو البيرلايت) وخاصة الصفائح السميكة، في حين تعامل الصفائح الرقيقة بالتلدين لتصغير الحجم الحبيبي. تعامل صفائح الفولاذ المستعملة للأغراض الكهربائية كالمحولات بالتلدين التام في درجة (850-860°C) لمدد طويلة نسبياً ثم التبريد البطيء. وتحسن هذه المعاملة الخواص المغناطيسية للفولاذ، وتعامل الصفائح والأنابيب من الفولاذ العالي الكربون حرارياً لغرض أساس هو الحصول على بنية تتكون من السمنتايت الكروي (تكوير السمنتايت) والذي يحسن قابلية تشغيل هذه المعدات. وتجري عمليات التلدين المستعملة للفولاذ المدرفل على الساخن كافة بالطريقة نفسها، ويكون الاختلاف في درجة حرارة التسخين وفي مدة البقاء في هذه الدرجة فقط، وكما موضّح في الشكل (7-3).

شكل 7-3 معاملة التلدين للفولاذ المدرفل على الساخن

ويتم تلدين الفولاذ العالي السبائكية في درجة حرارة حوالي(900°C)، وتسمى المعاملة بالتلدين في درجات الحرارة العالية.

المعاملات الحرارية للفولاذ المدرفل والمسحوب على البارد

بخلاف الفولاذ المدرفل على الساخن فإن أنواع الفولاذ المدرفل على البارد كافة تحتاج إلى المعاملة الحرارية والتي تجري عادةً على ثلاث مراحل، وكالآتي:

1. المعاملة الحرارية الأولية قبل عملية الدرفلة أو السحب على البارد.
2. المعاملة الحرارية المرحلية خلال عمليات الدرفلة والسحب.
3. المعاملة الحرارية بعد إنجاز عملية الدرفلة والسحب.

وتشمل المعاملة الحرارية الأولية التلدين في درجات حرارية عالية نوعاً ما، وتجرى المعاملة الحرارية لفولاذ عُدد القطع السريع (HSS) المراد تشكيلها بالسحب كالآتي:

1. التلدين في درجة حرارية (860°C) ثم التبريد البطيء (10-20°C/hr) إلى درجة (760°C).
2. البقاء عند هذه الدرجة لمدة خمس ساعات ثم التبريد البطيء (0-20°C/hr) إلى درجة (680°C).
3. المراجعة بالتسخين بدرجة حرارية (200-400°C) .

المعاملات الحرارية للأسلاك Heat Treatments of Wires

تنتج الأسلاك بالسحب البارد للقضبان الدائرية المقطع والمنتجة بالدرفلة على الساخن، ولا تختلف معاملاتها الحرارية عن تلك المستعملة بالفولاذ المسحوب، وكما مبين في الفقرات السابقة ولعل من المناسب هنا أن نناقش المعاملات الحرارية الخاصة بأسلاك النوابض والمصنعة من الفولاذ العالي الكاربون (0.7- 0.9 %) والمُسماة بتلدين الأسلاك. والغرض من هذه المعاملة الحرارية هو الحصول على بنية من البيرلايت الطبقي رقيق الطبقات والذي يسهل تشكيلهُ بالسحب على البارد، وتتم المعاملة بالتسخين إلى درجة (920°C) ثم التبريد السريع إلى درجة (450-520°C). ويجري هذا التبريد السريع عادة في أحواض الملح أو الرصاص المنصهر بالفولاذ الكربوني، في حين يبرد الفولاذ السبائكي في الهواء وتجري المعاملة آلياً وذلك بإمرار السلك أولاً داخل فرن أنبوبي لغرض التسخين ومن ثم إمراره خلال الحوض الملائم للتبريد. وتمتاز الأسلاك المعاملة بهذه الطريقة والمسحوبة لاحقاً على البارد بمقاومة شد ولدونة عاليتين مما يساعدها على مقاومة عملية اللف على البارد لغرض تشكيلها إلى نوابض.

المعاملات الحرارية للمطروقات Heat Treatments of Forgings

تصنع المطروقات مثل أعمدة الدوران أو المحاور استناداً إلى الحجم والخواص الميكانيكية المطلوبة من أنواع الفولاذ الكربوني والسبائكي. ولا تحتاج المطروقات المصنعة من الفولاذ الكربوني إلى المعاملة الحرارية، في حين أن المطروقات المصنوعة من الفولاذ السبائكي تحتاج إلى معاملة تلدين معينة وذلك لإزالة تأثيرات الانسياب الداخلي المسماة بالقشور. وهذه عبارة عن تشققات شعيرية رقيقة تتكون نتيجة عملية التشكيل باللَي وتظهر على سطح المطروقات، وتسبب هذه القشور انخفاضاً كبيرا في المطيلية، ويكون الهيدروجين هـــو السبب الرئيس فـــي حدوثها. ووجد بأن تبريد المطروقات ببطء (10-20°C/hr) بعد حدادتها مباشرة وخاصة في نطاق درجة الحرارة حوالي (200°C) فما دون يؤدي إلى منع تكوين هذه القشرة. ويبدو أن الهيدروجين يجد الوقت الكافي للانتشار باتجاه السطح والنفاذ إلى الهواء الخارجي لدى إجراء عملية التبريد البطيء. ويمكن الاستعاضة عن هذا التبريد بمعاملة المطروقات بالتلدين في ثابت درجة الحرارة بدرجة حرارية حوالي(600-660°C) وتعتمد مدة البقاء في هذه الدرجة على سمك وحجم المطروقات. وتوضع المطروقات داخل فرن وتســـخن إلـــــى درجة (300-400°C) ثم تسخن إلى درجة (600-650°C) وتترك في هذه الدرجة لمدة (2-4 hr) لمجانسة درجة حرارة المقاطع مختلفة السمك. ثم يستمـــر التسخين إلى درجـــة حرارة التصليد أو التطبيـع (850-880°C) وتترك فيها لمدد زمنية تعتمد أيضاً على سمك المنتج أو المطروقة. وتوضع المطروقات في فرن المراجعة عند درجـــة حراريـــة واطئة نســـــبياً (150-300°C) ثم تسخن إلى درجـــة حـرارة المراجـعة العـالية (600-650°C) بمعدل تسخين يتراوح ما بين (20-80°C/hr). تبلغ مدة البقاء عند درجة حرارة المراجعة (2 mim /mm) من أقصى سمك للمطروقة. تبرد المطروقات بعـد المراجـعة بمعدل (20-50°C/hr) بدرجة حرارة (100-300 °C) ومن ثم تبرد في الهواء. والشكل (4-7) يوضّح مخطط المعاملات الحرارية للمطروقات الفولاذية.

شكل 7-4 المعاملات الحرارية للمطروقات الفولاذية

المعاملات الحرارية للألمُنيوم النقي وسبائكهُ

Heat Treatment of Aluminium and its Alloys

يتميز الألمُنيوم وسبائكه بخفة الوزن وكذلك التوصيل العالي للكهرباء والحرارة وسهولة التشكيل. والعيب الأساس فيه هو انخفاض درجة الانصهار (660°C). يمكن تحسين الخواص الميكانيكية بإضافة عناصر أخرى (عناصر السبك) أو بعمليات التشكيل على البارد ولكنه في كلتا الحالتين يفقد جزءاً من مقاومته للتآكل. العناصر الأساس لسبائك الألمنيوم هي النحاس، المنغنيز، السيليكون، المغنسيوم، والزنك، وقد ازداد الاهتمام بسبائك الألمنيوم حديثاً لاستعمالها كمواد هندسية.

من أهم المعاملات الحرارية التي تجرى على الألمُنيوم النقي:

1- التلدين لغرض إعادة التبلور

يقبل الألمُنيوم بسهولة التشكيل على البارد مع حدوث تغيرات في خواصه الميكانيكية، ونتيجة لذلك فإن مقاومته قد تتضاعف. لذا يسخن الألمُنيوم النقي جداً (99.99%) لغرض إزالة الجهود لدرجات حرارية (300-380°C)، أما الألمُنيوم النقي تجارياً فيسخن إلى درجات حرارية (170-250°C). ويفضل التلدين في درجات أوطأ كلما زادت نقاوة الألمنيوم. وتجرى هذه المعاملة للتليين، إذ أن خواص الصلادة والمقاومة تنخفض بشكل ملحوظ. ويؤدي التلدين في درجات الحرارة الواطئة، وخاصة إذا كان مقدار التشكيل البارد المسبق طفيفاً، إلى نمو بالغ في الحجم الحبيبي، علماً بأن نسبة التشكيل البارد الحرجة فيما يخص هذا المعدن تقل عن (10%) ويحدث النمو الحبيبي أثناء التلدين حتى إذا تجاوز مقدار التشكيل البارد نسبة (10%)، وخاصة لدى التلدين في درجات عالية ولفترات زمنية طويلة. لذا يفضل أن يكون مقدار التشكيل على البارد حوالي (20 -50%) إن أمكن لغرض الحصول على حجم حبيبي صغير بعد التلدين.

2- التخمير لغرض التشكيل على الساخن

يسخن الألمُنيوم لهذا الغرض في درجة (400°C)، ويجب أن تتجاوز أدنى درجة حرارة لغرض التشكيل على الساخن درجة حرارة إعادة تبلور المعدن، وتبلغ هذه الدرجة في الألمُنيوم المنخفض النقاوة حوالي (300°C).

المعاملات الحرارية لسبائك الألمّنيوم

إصلاد عدد من سبائك الألمُنيوم بمعاملة الترسيب، في حين أن هناك سبائك لا يمكن إصلادها بهذه المعاملة مثل سبائك الأُلمنيوم مع المغنيسيوم أو المنغنيز والسبائك مع المغنيسيوم والمنغنيز. أما السبائك الممكن إصلادها بهذه المعاملة فهي سبائك الأُلمنيوم – النحاس – المغنيسيوم، وسبائك الأُلمنيوم – المغنيسيوم – السيلكون، وسبائك الأُلمنيوم – الزنك – المغنيسيوم، وسبائك الأُلمنيوم – الخارصين – المغنيسيوم –النحاس، كافة هذه السبائك هي سبائك مشكلة. كذلك يمكن إصلاد عدد من سبائك الأُلمنيوم المسبوكة مثل سبائك الأُلمنيوم – المغنيسيوم – المنغنيز، في حين أن سبائك الأُلمنيوم – السيلكون المسبوكة لا يمكن إصلادها بالترسيب. بالإمكان إجراء معاملة الإصلاد بالترسيب في درجة حرارة الغرفة أو في درجات حرارة أعلى. وتتصلد بعض السبائك المسبوكة في القوالب المعدنية مباشرة بعد الصب ومن دون الحاجة إلى معاملة المجانسة وتسمى هذه الظاهرة بالتصليد الذاتي بالترسيب، ولكن تكون الصلادة الناتجة عادةً أقل من الناتجة من الإصلاد بالترسيب الاعتيادي. والجدول (7-1) يوضّح المعاملات الحرارية لسبائك الألمنيوم.

جدول (7-1) المعاملات الحرارية لسبائك الألمنيوم

السبيكة	درجة حرارة التلدين (°C)	درجة حرارة المجانسة (°C)	فترة البقاء (min)	درجة الحرارة (°C)	فترة البقاء (min)
الألمنيوم – المغنيسيوم (5xxx)	340 – 380	–	–	–	–
الألمنيوم – المنغنيز (3xxx)	360 – 420	–	–	–	–
الألمنيوم- المغنسيوم – السيلكون (6xxx)	340 – 400	510 - 540	10 - 30	150 – 175	5 – 15
الألمنيوم – الزنك (7xxx)	350 – 380	495 - 510	10 - 30	20	–
الألمنيوم – النحاس (2xxx)	340 – 380	450 - 480	10 - 40	120 - 140	20 -50

ومن المعاملات الحرارية التي تجرى للألمنيوم وسبائكه هي:

1- التلدين لغرض إعادة التبلور

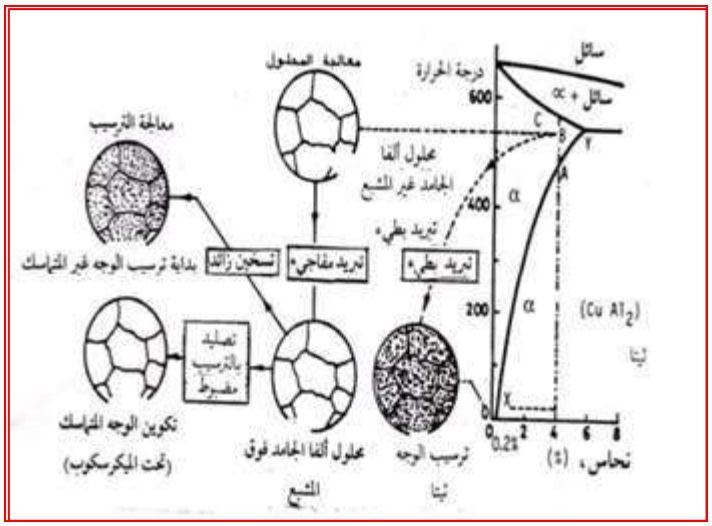
تزال الإجهادات من سبائك الألمُنيوم بالتسخين في درجات (200 – 220°C) استنادا إلى نوع السبيكة، في حين أن إعادة التبلور والتلدين يتم بالتسخين في درجات (300 – 500°C).

2- التلدين لغرض المجانسة

تجري المعاملة فيما يخص السبائك المشكلة في درجات (450 – 500°C)، وكما في الجدول (7-1)، يتجسد الغرض الأساس من المجانسة في تسخين السبائك في درجات حرارية تكون فيها قابلية ذوبان عناصر السبك في الألمُنيوم في حدها الأقصى وللحصول على سبيكة موزعة فيها عناصر السبك بانتظام على طول المقطع العرضي.

3- التصليد الازماني Age Hardening

يمكن دراسة عملية التصليد الازماني (التعتيق) فيما يخص السبيكة المحتوية على 4% نحاس والتي لها التركيب الكيميائي الأساس للسبائك المسماة (الديورالومين). الشكل (7-5) يبين الجزء الغني بالألمنيوم لمخطط التوازن الحراري الألمُنيوم - النحاس، إذ أن ذوبان النحاس في الألمنيوم هو إلى حد 0.5% في درجة حرارة الغرفة ثم تزداد قابلية الذوبان هذه بارتفاع درجة الحرارة، حتى تصل إلى حدها الأقصى وهي 5.7% في درجة حرارة (548°C).



شكل 7-5 الجزء الغني بالألمُنيوم في مخطط الاتزان الحراري للألمنيوم- نحاس

ولو بردت السبيكة المحتوية على (4%) نحاس ببطء من منطقة طور(α) عندئذ تترسب جسيمات خشنة من المركب ($CuAl_2$)، وذلك بسبب نقصان قابلية ذوبان النحاس في الألمنيوم حينما تنخفض درجات الحرارة، وفي هذه الحالة تكون السبيكة ضعيفة وهشة نوعاً ما. ولكنه يمكن تحسين الخواص الميكانيكية وذلك بإجراء التصليد الازماني والذي يتضمن الخطوات الثلاث الآتية:

1- تسخين إلى درجة حرارية أعلى من خط الذوبان وهي (500°C) وذلك كي يذوب النحاس والعناصر السبائكية الأخرى كافة.

2- تبرد السبيكة من تلك الدرجة الحرارية حتى درجة حرارة الغرفة، تبريداً سريعاً وذلك بإخمادها بالماء لتحافظ على الطور(α) في درجة حرارة الغرفة أي لمنع ترسب الطور ($CuAl_2$) والذي يتكون بالتبريد البطيء لهذه السبيكة. وسيكون طور (α) عبارة عن محلول فوق الإشباع.

وتسمى الخطوتان السابقتان بـ (المعالجة المحلولية)

3- إذا تركت هذه السبيكة بعد إجراء المعالجة المحلولية، في درجة حرارة الغرفة عندئذ، تبدأ صلادتها بالازدياد بمرور الزمن حتى تصل إلى أعلى قيمة لها وذلك بعد مرور أربعة أيام (فيما يخص الديورالومين) وتسمى طريقة التصليد هذه (الأزمان الطبيعي) (Natural-Aging) أو تسمى (التصليد الازماني) (Age-Hardening)، ومن الممكن تعجيل هذا التصليد وذلك بإعادة تسخين السبيكة بعد إتمام المعالجة المحلولية إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الغرفة (150-170°C) فيما يخص هذه السبيكة ولعدة ساعات وتسمى هذه الطريقة عندئذ "بالإزمان الاصطناعي" (Artificial-Aging) أو "التصليد بالترسيب" (Precipitation hardening).

4- التلدين لغرض التشكيل على الساخن

تسخن سبائك الألمُنيوم لغرض التشكيل على الساخن في درجات (400 – 550°C)، ويجب أن لا تنخفض درجات الحرارة أثناء التشكيل إلى ما دون (330 – 400°C) استنادا إلى نوع السبائك.

المعاملات الحرارية لسبائك النحاس

يُعد النحاس من المعادن ذات التوصيل الجيد للكهرباء وذات مقاومة عالية للتآكل، من أشهر سبائكه هي سبائك البراص وهي سبائك من النحاس والخارصين ولها استعمالات كثيرة مثل العملات المعدنية. البرونز هو أحد السبائك الشهيرة الأخرى ويحتوي البرونز بالإضافة إلى النحاس على القصدير والألمُنيوم والسليكون والنيكل. البرونز أقوى من سبائك البراص ويحتفظ بخاصية مقاومة التآكل. هنالك سبائك حديثة من النحاس أشهرها سبائك النحاس والبريليوم وتتميز بقوة عالية جداً وتوصيل عالٍ للكهرباء ومقاومة تآكل جيدة. وتُعد عملية التشكيل على البارد أحد الطرائق الرئيسة لمنح سبائك النحاس صلادة وزيادة قصافتها. وتتم عملية التلدين لإرجاع بعض من مطيلية النحاس وسبائكه، وتجرى عند درجات حرارة (760-980°C) وبعد ذلك يبرد سريعاً بالماء.

4-7 الطلاء Coating

1-4-7 طلاء الملحومات Coating for Weldments

إن عملية الطلاء المعدني إحدى طرائق معالجة الملحومات ويمكن تصنيفها إلى الآتي:

الطلاء الانتشاري Diffusion Coating

تستعمل عملية الطلاء الانتشاري بصورة واسعة وتُعد من أفضل طرائق الطلاء وتتضمن عمليات انتشار أو تفاعل أو ذوبان لمعدن ما، ويتم تسخين سطح المادة وجعلها ملائمة للاستعمال، ومن الأمثلة على العمليات الانتشارية هي الكربنة، إذ يتم فيها الحصول على صلادة سطحية عالية للفولاذ المنخفض الكربون، بينما تستعمل عمليات الألمنة لأغراض مقاومة الأكسدة في درجات الحرارة العالية التي تحصل في السبائك الفولاذية الفائقة وكذلك لمقاومة التآكل. ويحصل في هذا النوع من الطلاء متغيرات كيمياوية في مقطع طلائها نتيجة انتشارها مع مادة معدنية أو غير معدنية في عمليات السبك بين المعدن الأساس ومعدن الطلاء. وهنالك طرائق أخرى لا يتسع المجال لشرحها كالنتردة (بالنتروجين) وغيرها.

الطلاء بتكوين غطاء على السطح Overlay Coating

ويشمل الطرائق التي تنتج طبقة طلاء مع أقل ما يمكن من التفاعل مع المعدن الأساس، وتكون فيها سبيكة الطلاء أو مادة الطلاء ذات مقاومة تآكل أعلى من المعدن الأساس.

2-4-7 طلاء المعادن ما بعد التشكيل Coating of Metals after Forming

إن عملية الطلاء المعدني هي إحدى طرائق معالجة المعادن بعد التشكيل ومن أهم طرائقها:

الطلاء بالقصدير

القصدير فلز أبيض فضي اللون، ليّن، وذو لمعة زرقاء يمكن طرقه فيتحول إلى صفائح رقيقة جداً. كما يمكن طرقه وسحبه بدرجات الحرارة الاعتيادية ولكنه يتفتت إذا ما سخن إلى درجة (200°C) وينصهر في درجة (231°C). ويستعمل القصدير لطلاء الأواني الحديدية والنحاسية لأنه لا يتأثر بالهواء ولا بالحوامض العضوية وتمنع عملية الطلاء هذه تآكل هذه الفلزات بفعل الماء.

عملية القصدرة والغرض منها

وتتم عملية القصدرة بوضع قطعة رقيقة من معدن القصدير، على سطح قطعة من معدن آخر، والغرض من إجراء هذه العملية هو وقاية أسطح المعادن من التآكل، ويشكل القصدير طبقة رقيقة فوق سطح المعدن المقصدر تمنع أكسدته، كما تجري عملية القصدرة أيضاً لتحضير القطع لعملية اللحام. وعند إجراء الطلاء بالقصدير، يجب رفع درجة حرارة القطعة المراد قصدرتها وقصدير اللحام إلى الدرجة الحرارية اللازمة التي تكفي لانصهار وإسالة القصدير، وبالتالي الالتصاق بسطح القطعة المعدنية، وبعد إجراء عملية القصدرة يمكن إزالة القصدير الزائد. وللحصول على طلاء جيد هناك شروط يجب التقيد بها مهما اختلفت طرائق القصدرة ، وهذه الشروط :

1. يجب أن يكون سطح القطعة المراد طلائها نظيفاً خالياً من الأكاسيد.
2. استعمال مساعدات الصهر(Flux) لمنع الأكسدة أثناء عملية الطلاء.
3. الاهتمام بدرجة حرارة القطعة المراد قصدرتها، ودرجة قصدير الطلاء بحيث ترفعان إلى الدرجة الحرارية اللازمة لعملية الطلاء.

هناك طرائق مختلفة لعملية الطلاء بالقصدرة، ومن بين هذه الطرائق :

1. الطلاء بالقصدير بواسطة اللهب.
2. الطلاء بالقصدير بواسطة كاوية اللحام.
3. الطلاء بالقصدير في حوض القصدير.

أولاً: الطلاء بالقصدير بواسطة اللهب

يتوقف اختيار المصدر الحراري لإجراء عملية الطلاء بالقصدير، بواسطة اللهب على حجم القطعة المعدنية وشكلها ونوعها بحيث يولد المصدر الحراري الدرجة الحرارية الملائمة لإجراء عملية الطلاء أو اللحام بالقصدير. وتصلح هذه الطريقة من طرائق القصدرة لطلاء القطع المصنوعة من الفولاذ والنحاس والرصاص وما شابه ذلك من المعادن. والشكل (7-6) يوضّح طريقة الطلاء بالقصدير بوساطة اللهب، وعند الطلاء تنظف السطوح جيداً من الأوساخ والأكاسيد الموجودة ثم مسحها بمواد مساعدة (Flux) لمنع حدوث طبقة جديدة من الأوكسيد ثم توضع قطعة صغيرة من القصدير، الذي ينصهر نتيجة الحرارة ويسيل على سطح القطعة بوساطة قضيب من الخشب أو البرونز على أن يغطس طرفه قبل ذلك في المادة المساعدة للصهر.

الشكل7-6 طريقة الطلاء بالقصدير بواسطة اللهب المكشوف

ثانياً: الطلاء بالقصدير بوساطة كاوية اللحام

تستعمل هذه الطريقة في حالة القطع الصغيرة كالصفائح والأسلاك وفيها تكون كاوية اللحام مصدر الحرارة، كما يجب أن تكون الكاوية ملائمة لأحجام القطع المراد قصدرتها. وفي حالة كون القطعة المراد طلاؤها طويلة فتحرك كاوية اللحام تدريجياً على طول القطعة مع المحافظة على درجات الحرارة اللازمة ثم التسخين. ولمنع تسرب الحرارة من القطعة توضع قطعة من الخشب عند إجراء العملية، كما يمكن استخدام طريقة الطلاء بالقصدير بوساطة كاوية اللحام لطلاء الأسلاك ونهايات الأشرطة، وتختلف العملية التحضيرية عن السابقة بتسخين القطعة من الأسفل بوساطة الكاوية ويضاف قصدير اللحام والمادة المنقية من الأعلى ويمكن إزالة القصدير الزائد بهذه الطريقة بوساطة تحريك الكاوية حتى طرف السلك، وكما يمكن لحام أطراف الأسلاك الرفيعة عن طريق نقل قصدير اللحام بوساطة كاوية اللحام نفسها، على أن يتم وضع المادة المنقية على موضع اللحام قبل إضافة القصدير.

ثالثاً: الطلاء بالقصدير في حوض منصهر القصدير

تجري عملية الطلاء في حوض منصهر القصدير للقطع بتغطيسها في الحوض المحتوي على قصدير منصهر وكما يأتي:

1. يستعمل التيار الكهربائي أو اللهب المكشوف كمصدر حراري لتسخين الحوض الذي يجب أن تكون درجه حرارته تقارب (50°C) من درجة انصهار اللحام، لان درجة الحرارة تنخفض كثيراً عند تغطيس القطعة الباردة في حوض القصدير.
2. تتم عملية الطلاء الجزئي للقطع بتنظيف سطوحها جيداً.
3. تغطيسها في مادة منقية.
4. تغطس في حوض القصدير.
5. يزال القصدير الزائد بعد الانتهاء من عملية الطلاء.
6. تكرر الخطوات السابقة نفسها للقطع الصغيرة وبأعداد كبيرة وفي هذه الحالة يمكن استعمال جهاز دوار خاص يعمل بالقوة الطاردة وتترك القطع المقصدرة على حوامل مهتزة خاصة حتى تبرد ويلاحظ إن ارتداد القطع تمنع من التصاقها مع بعضها.
7. يؤدي ترك القطعة مغطسة لمدة طويلة في حوض القصدير إلى تلوث القصدير المنصهر بسبب انحلال المعدن.

ويوضّح الشكل (7-7) الطلاء في حوض منصهر القصدير.

شكل 7-7 الطلاء في حوض منصهر القصدير

أسئلة الفصل السابع

س1) املأ الفراغات الآتية:

1. أنواع المعاملات الحرارية بالاعتماد على درجة الحرارة هي: ..... ، ..... ، ..... ، .....
2. يمكن تقسيم مراحل التلدين إلى ..... و..... و.....
3. من طرائق المعالجة ما بعد اللحام ..... ، ..... ، ..... ، .....
4. من أهم طرائق الطلاء الانتشاري ..... ، .....
5. ..... و..... من أهم طرائق المعاملات الحرارية للملحومات.
6. أنواع الإصلاد الازماني (التعتيق) هي ..... و ..... .
7. المعاملات الميكانيكية للملحومة هي:.....، ..... ، .....
8. تقسم المعاملات الحرارية ما بعد التشكيل إلى ..... و..... و.....

س2) عرّف المعاملة الحرارية.

س3) ما هي المراحل الرئيسة للمعاملة الحرارية؟

س4) ما هي أهداف عملية التلدين؟

س5) عرّف الطلاء الانتشاري.

س6) ما هي طرائق المعالجة للمعادن ما بعد اللحام؟

س7) عدد عمليات المعالجة ما بعد التشكيل.

س8) اشرح طريقة إزالة الإجهادات المتبقية بالاهتزاز.

س9) ما هي مراحل عملية التلدين؟ اشرح واحدة منها فقط.

س10) اشرح المعاملة الحرارية للفولاذ المدرفل على الساخن، ثم وضّح المنحني الخاص لذلك.

س11) وضح المعاملات الحرارية للفولاذ المدرفل والمسحوب على البارد.

س12) ما هي أهم المعاملات الحرارية التي تجرى على الألمُنيوم وسبائكه؟ عددها فقط.

س13) عدد طرائق الطلاء بالقصدير (القصدرة).