

HIAST

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم الفيزياء

ماجستير علوم وهندسة المواد – اختصاص تعدين ٢٠١٤-٢٠١٦

أعدت الأطروحة لنيل درجة الماجستير في هندسة علوم المواد – اختصاص تعدين

دراسة تأثير رطوبة البودرة (Flux) على عملية اللحام بالقوس المغمور

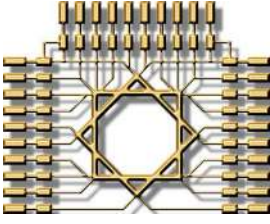
إعداد

م. فداء صقر

إشراف

د. أحمد الرصيص د. فواز جلعود

٢٠١٦



HIAST

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم الفيزياء

ماجستير علوم وهندسة المواد – اختصاص تعدين ٢٠١٤ - ٢٠١٦

دراسة تأثير رطوبة البودرة (Flux) على عملية اللحام بالقوس المغمور

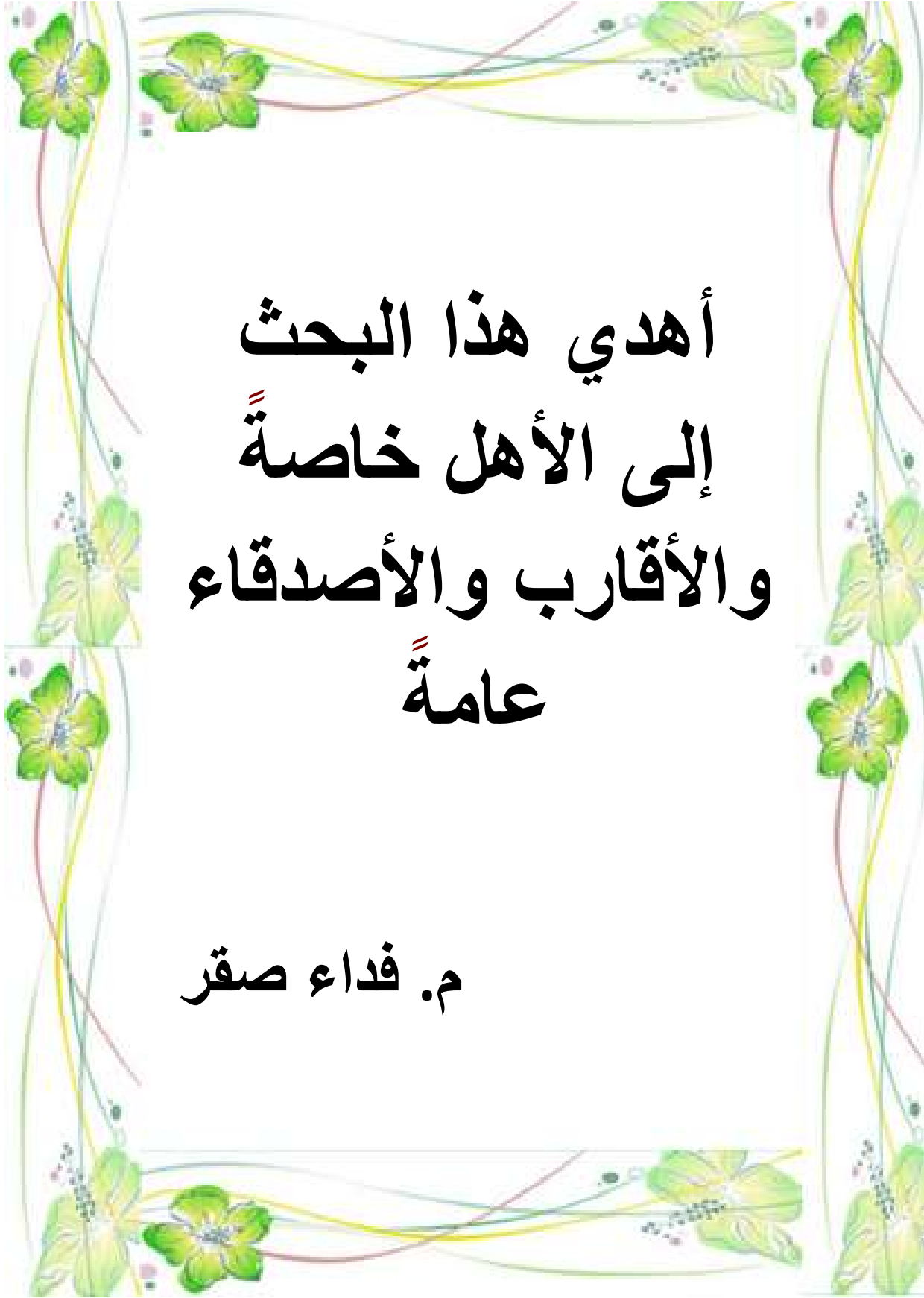
لجنة التحكيم:

رئيساً الاستاذ الدكتور المهندس محمد علي سلامة: كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية ، جامعة دمشق.

عضواً الاستاذ الدكتور المهندس رفيع جبرة: المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.

مشرفاً وعضواً الاستاذ الدكتور المهندس أحمد الرصيص: المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.

مشرفاً وعضواً الاستاذ الدكتور المهندس فواز جلعود: المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.



أهدي هذا البحث
إلى الأهل خاصةً
والأقارب والأصدقاء
عامّةً

م. فداء صقر

كلمة شكر

أبدأ بحمد الله وشكره على فضله في تيسير أمرنا لإتمام الماجستير في هذه الظروف بالغة الصعوبة والإستثنائية.

أتوجه بالشكر الجزيل إلى الدكتور المشرف أحمد الرصيص، رئيس مركز تقانات اللحام في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا على المساعدة الكبيرة التي قدمها لإنجاز هذا البحث ضمن الوقت المحدد مع تحقيق الهدف المطلوب منه، فقد كان محفزاً نشطاً ومتابعاً دقيقاً في كل ما يتعلق بالعمل.

كما أتوجه بالشكر إلى الدكتور المشرف فواز جلعود، في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، على متابعته وإرشاداته الدائمة.

أتوجه بالشكر أيضاً إلى الدكتور خالد المصري رئيس قسم الفيزياء في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا لتجاوبه السريع والإيجابي مع المتطلبات الخاصة بموضوع ومستلزمات البحث.

أود أن أشكر أيضاً المهندسين صارم يونس وفراس المحمد لما قدماه من مساعدة قيمة في إنجاز هذا العمل.

كما أشكر المخبري علي الجفاص لتعاونه الجدي والإيجابي في إنجاز التجارب المخبرية.

الشكر موصول إلى كل من ساعد وساهم بإنجاز العمل ولو بكلمة.

فداء صقر

رقم الصفحة	المحتويات
١	قائمة الأشكال
٤	قائمة الجداول
٥	الاختصارات
٦	المصطلحات العلمية
٨	مقدمة عامة
٩	القسم الأول: الدراسة المرجعية
١٠	الفصل الأول: طريقة اللحام بالقوس المغمور (SAW)
١٠	1.1 المقدمة
١١	1.2 المعدات المستخدمة في عملية اللحام
١٣	1.3 متحولات عملية اللحام بالقوس المغمور
١٣	١.٣.١ جهد قوس اللحام
١٤	١.٣.٢ تيار اللحام
١٥	١.٣.٣ سرعة اللحام
١٥	1.3.4 قطر الإلكترود
١٦	1.3.5 المسافة stic-out
١٨	١.٤ عيوب اللحام بالقوس المغمور
١٨	1.4.1 المسامية
١٩	1.4.2 التتلم
١٩	1.4.3 التشققات الطولية
٢٠	1.4.4 التشققات العرضية
٢٠	1.4.5 المنظر السيء للحام

٢١	1.4.6 مضمنات الخبث
٢١	1.4.7 نقص التغلغل
٢٢	1.4.8 ثقب على سطح اللحم
٢٣	الفصل الثاني: دراسة البودرة (Flux) المستخدمة في اللحم
٢٣	2.1 المقدمة
٢٤	2.2 وظائف البودرة
٢٤	2.3 أنواع البودرة
٢٤	٢.٣.١ البودرة المنصهرة
٢٤	٢.٣.٢ البودرة المترسبة (الملبدة)
٢٤	2.3.3 البودرة المتكتلة
٢٥	2.4 مكونات البودرة
٢٥	2.5 قاعدية البودرة
٢٦	2.6 تصنيف البودرة كيميائياً
٢٦	2.6.1 البودرة الحامضية والمحايدة
٢٧	2.6.2 البودرة الأساسية
٢٨	2.6.3 البودرة عالية الأساسية
٢٩	2.6.4 البودرة الخاصة
٣٠	2.7 تأثير مكونات البودرة على سلوك اللحم
٣٠	2.7.1 اللزوجة
٣٠	2.7.2 الاستهلاك
٣١	2.7.3 حجم الحبيبات
٣١	2.8 تصنيع البودرة

٣١	2.8.1 تصنيع البودرة المتكتلة
٣٢	2.8.2 تصنيع البودرة المنصهرة
٣٣	2.9 إعادة تدوير البودرة
٣٣	2.9.1 إعادة التدوير
٣٣	2.9.2 التخزين
٣٣	2.9.3 التجفيف
٣٥	الفصل الثالث: الهيدروجين المنتشر في الوصلات اللحامية
٣٥	3.1 مقدمة
٣٥	3.2 التشققات على البارد في الوصلات الملحومة
٣٦	٣.٢.١ آلية التشقق على البارد (HAC) في اللحامات
٣٧	3.2.1.1 البنية الميتالورجيا الحساسة
٣٨	3.2.1.2 تأثير الهيدروجين على (HAC)
٤٠	3.2.1.3 إجهادات الشد في الوصلات الملحومة
٤٢	٣.٣ مصادر الهيدروجين أثناء اللحام
٤٢	3.3.1 المصادر الرئيسية
٤٢	3.3.2 المصادر الثانوية
٤٤	3.4 سلوك الهيدروجين في الوصلات الملحومة
٤٤	3.4.1 انحلال الهيدروجين في الوصلات الملحومة
٤٨	3.4.2 الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة
٤٨	3.4.3 الهيدروجين المحتبس في الوصلات الملحومة
٤٩	3.5 السيطرة على الهيدروجين المنتشر في المواد الأولية المستخدمة في اللحام

٥١	القسم الثاني: الدراسة التجريبية
٥٢	الفصل الرابع: الأجهزة والأدوات المستخدمة
٥٢	4.1 آلة اللحام
٥٢	4.1.1 آلة اللحام بالقوس المغمور starmatic 650 DC
٥٣	4.1.2 مواصفات آلة اللحام STARMATIC 650 DC
٥٣	4.2 عربة اللحام ولوحة التحكم ووحدة تزويد البودرة (FLUX)
٥٤	4.3 خلاط بودرة اللحام (Agitator Type PWB)
٥٥	4.4 جهاز التجفيف باستخدام الأشعة تحت الحمراء PIT
٥٦	4.5 الميزان SARTORIUS
٥٧	4.6 أنبوب اختباري مدرج
٥٨	4.7 جهاز الشدذ والتلميع
٥٨	4.8 المجهر الضوئي
٦٠	الفصل الخامس: تصميم وتنفيذ جهاز لقياس رطوبة البودرة
٦٠	5.1 مكونات الجهاز
٦١	5.2 مبدأ عمل الجهاز
٦٣	5.3 ضبط الجهاز
٧١	الفصل السادس: تنفيذ التجارب وتسجيل النتائج
٧١	6.1 المعاملات التجريبية
٧٣	6.2 خطة العمل
٧٣	6.3 اجراء التجارب
٧٥	6.4 قياس حجم الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة
٧٨	6.5 تسجيل النتائج

٨١	6.6 الدراسة الميتالوجرافية لعينات اللحام
٨٧	الفصل السابع: مناقشة النتائج والاستنتاجات
٨٧	7.1 مناقشة النتائج
٨٩	7.2 الاستنتاجات
٩٠	7.3 الخاتمة
٩٠	7.4 الآفاق المستقبلية
٩١	المراجع

رقم الصفحة

قائمة الأشكال

- الشكل (1-1) تطبيقات اللحام بالقوس المغمور ١٠
- الشكل (1-2) مكونات اللحام بالقوس المغمور ١٢
- الشكل (1-3) آلية اللحام بالقوس المغمور ١٢
- الشكل (1-4) تأثير تغيرات الجهد على شكل الوصلة الملحومة ١٣
- الشكل (1-5) تأثير الجهد على عرض الوصلة الملحومة ١٤
- الشكل (1-6) تأثير التيار على عمق التغلغل ١٤
- الشكل (1-7) تأثير تغيرات سرعة اللحام على الوصلة الملحومة ١٥
- الشكل (1-8) تأثير تغيرات قطر الالكترود عند تيار ثابت. ١٥
- الشكل (1-9) تأثير زاوية ميول الالكترود ١٦
- الشكل (1-10) المسافة stic-out ١٦
- الشكل (1-11) يوضح تأثير المسافة (stick – out) على عمق التغلغل ومعدل الترسيب ١٧
- الشكل (1-12) المسامية ١٨
- الشكل (1-13) التثلم ١٩
- الشكل (1-14) التشققات الطولية ٢٠
- الشكل (1-15) التشققات العرضية ٢٠
- الشكل (1-16) المنظر السيئ للحام ٢١
- الشكل (1-17) مضمنات الخبث ٢١
- الشكل (1-18) نقص التغلغل ٢٢
- الشكل (1-19) ثقوب على سطح اللحام ٢٢
- الشكل (2-1) طريقة إنتاج البودرة المتكثلة ٣١
- الشكل (2-2) طريقة إنتاج البودرة المنصهرة ٣٢

- الشكل (3-1) العوامل المؤثرة على التشقق على البارد ٣٦
- الشكل (3-2) درجة الحرارة والمستوي المحلي للهيدروجين والضغط أثناء التبريد ٣٧
- الشكل (3-3) الهيدروجين المنتشر ضمن الوصلة الملحومة ٣٩
- الشكل (3-4) اختلاف محتوى الهيدروجين بين معدن اللحام والمنطقة المتضررة حرارياً ٤٠
- الشكل (3-5) النماذج الواقعية للتشققات على البارد ٤١
- الشكل (3-6) امتصاص الهيدروجين في الوصلة الملحومة ٤٦
- الشكل (4-1) آلة اللحام STARMATIC 650BDC ٥٢
- الشكل (4-2) عربة اللحام ولوحة التحكم ووحدة تزويد البودرة ٥٤
- الشكل (4-3) الخلاط ٥٥
- الشكل (4-4) المجفف ٥٦
- الشكل (4-5) الميزان SARTORIUS GP5202-OCE ٥٧
- الشكل (4-6) الأنبوب الإختباري ٥٧
- الشكل (4-7) جهاز الشدز والتلميع ٥٨
- الشكل (4-8)المجهر الضوئي ٥٩
- الشكل (5-1) جهاز قياس الرطوبة ٦٠
- الشكل (5-2) شكل توضيحي للدارة الالكترونية ٦١
- الشكل (5-3) شكل تمثيلي يبين مبدأ العمل ٦٢
- الشكل (5-4) العلاقة بين تغير الرطوبة وتغير التيار ٦٥
- الشكل (5-5) تغير التيار بتغير الرطوبة في معادلة من الدرجة الرابعة ٦٦
- الشكل (5-6) تغير التيار بتغير الرطوبة في معادلة من الدرجة الخامسة ٦٧
- الشكل (5-7) تغير التيار بتغير الرطوبة في معادلة من الدرجة التاسعة ٦٩
- الشكل (6-1) وضعية اللحام ٧٢

٧٣	الشكل (6-2) عينات اللحم المنفذة (١)
٧٤	الشكل (6-3) عينات اللحم المنفذة (٢)
٧٤	الشكل (6-4) عينات اللحم المنفذة (٣)
٧٦	الشكل (6-5) أنابيب قياس محتوى الهيدروجين المنتشر
٧٧	الشكل (6-6) محتوى الهيدروجين المنتشر في الانبوب الاختباري
٧٩	الشكل (6-7) العلاقة بين رطوبة البودرة والهيدروجين المنتشر
٨٠	الشكل (6-8) مخطط الهيدروجين المنتشر
٨١	الشكل (6-9) العينة التي رطوبتها ١%
٨٢	الشكل (6-10) العينة التي رطوبتها ٢%
٨٢	الشكل (6-11) العينة التي رطوبتها ٣%
٨٣	الشكل (6-12) العينة التي رطوبتها ٤%
٨٣	الشكل (6-13) العينة التي رطوبتها ٥%
٨٤	الشكل (6-14) العينة التي رطوبتها ٦%
٨٤	الشكل (6-15) العينة التي رطوبتها ٧%
٨٥	الشكل (6-16) العينة التي رطوبتها ٨%
٨٥	الشكل (6-17) العينة التي رطوبتها ٩%
٨٦	الشكل (6-18) العينة التي رطوبتها ١٠%

رقم
الصفحة

قائمة الجداول

- الجدول (1-1) القيم المثالية لمتغيرات اللحام عند استخدام رأس واحد ١٧
- الجدول (1-2) القيم المثالية لمتغيرات اللحام عند استخدام رأس واحد ووضعية أفقية ١٧
- الجدول (1-3) القيم المثالية لمتغيرات اللحام عند استخدام رأسي لحام ١٨
- الجدول (1-4) القيم المثالية لمتغيرات اللحام عند استخدام رأسي لحام وتيار (AC) ١٨
- الجدول (1-5) أسباب تشكل المسامية وطرق علاجها ١٩
- الجدول (2-1) فوائد وعيوب أنواع البودرة ٢٥
- الجدول (2-2) تأثير نوع البودرة على مختلف خصائص اللحام والجودة ٣٠
- الجدول (3-1) محتوى الرطوبة في بعض المواد المستهلكة والمستخدم في صناعة مواد اللحام ٤٣
- الجدول (3-2) أنواع فجوات الهيدروجين وطاقة الارتباط ودرجة الحرارة اللازمة لتحرير الهيدروجين ٤٩
- الجدول (4-1) مواصفات آلة اللحام STARMATIC 650 DC ٥٣
- الجدول (5-1) تغيير قيم التيار بتغيير الرطوبة ٦٣
- الجدول (5-2) قيم الارتياح النسبي ٦٨
- الجدول (6-1) متحولات عملية اللحام ومحتوى الهيدروجين المنتشر في كل وصلة ملحومة ٧٨

الاختصارات

SAW	Submerged Arc Welding
V	Welding Voltage (volt)
S	Welding Speed (cm/min)
F	Feed Rate (m/min)
I	Welding Current (A)
<i>d</i>	Wire Diameter (mm)
HAZ	Heat Affected Zone
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
GTAW	Gas- Tungsten Arc Welding
FCAW	Flux Cored Arc Welding
B	Flux Basicity
HAC	Hydrogen Assisted Cracking
CE	Carbon Equivalent
	Diffusible Hydrogen (ml/100g)
AWS	American Welding Society

المصطلحات العلمية

Submerged Arc Welding	اللحام بالقوس المغمور
Welddefectc	عيوب اللحام
Porosity	المسامية
Undercutting	التنلم
Longitudinal cracks	التشققات الطولية
Transverse cracks	التشققات العرضية
Poor weld appearance	المنظر السيء للحام
Slag inclusions	مضمنات الخبث
Lack of penetration	نقص التغلغل
Pock marks	ثقوب على سطح اللحام
Flux	البودرة
Fused flux	البودرة المنصهرة
Sintered fluxes	البودرة المترسبة
Agglomerated flux	البودرة المتكتلة
Acidic and neutral fluxes	البودرة الحمضية
Basic fluxes	البودرة الأساسية (القاعدية)
High-basic fluxes	البودرة عالية الأساسية
Special fluxes	البودرة الخاصة
Susceptible microstructure	البنية الميتالورجية الحساسة
Residuel stress	إجهاد الشد المتبقي
Source of hydrogen	مصادر الهيدروجين
Moisture	الرطوبة
Hydrogen trapping	الهيدروجين المحتبس
Trapping effeects	التأثيرات الداخلية المحتبسة

Surface effects	التأثيرات السطحية
Liquid state effects	تأثيرات الحالة السائلة
Flux hopper	خزان البودرة
Slag	الخبث
Weld bead	الدرزة الملحومة
Flux bed	غطاء البودرة قبل عملية اللحام
Hydrogen assisted cracking	التشقق على البارد
diffusible hydrogen	الهيدروجين المنتشر

مقدمة عامة

- تستخدم عملية اللحام بالقوس المغمور بشكل واسع في الصناعة وخاصة في لحام الصفائح ذات السماكات الكبيرة والأنابيب المستخدمة في الانشاءات المعدنية والخزانات، انتشر استخدام هذه التقنية في السنوات القليلة قبل الأزمة بشكل كبير في الصناعات المحلية.
- تتأثر جودة الملحومات بهذه الطريقة برطوبة بودرة اللحام (Flux) المستخدمة. استهدف البحث دراسة تأثير رطوبة البودرة على عملية اللحام بالقوس المغمور. يسعى بحثنا للتركيز على العيوب الناتجة عن رطوبة البودرة ومعرفة الحدود المسموحة للرطوبة خلال عمليات اللحام.

لتحقيق هدف البحث تم انجاز:

- ❖ دراسة مرجعية شاملة تضمنت بشكل خاص التعريف بطريقة اللحام بالقوس المغمور ومعاملات اللحام وعيوب هذه الطريقة، كذلك شملت دراسة بودرة اللحام المستخدمة في عمليات اللحام بالقوس المغمور (مكوناتها - أنواعها - تركيبها ...) وكون رطوبة البودرة تعد المصدر الرئيسي للهيدروجين ضمن الوصلة الملحومة كان لابد من التطرق إلى موضوع الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة.

❖ دراسة تجريبية:

- أ- تم تصميم وتصنيع جهاز لقياس رطوبة البودرة واجريت مجموعة من التجارب لضبط الجهاز وقد تم استخدام برنامج الماتلاب لنمذجة التجارب المنفذة وبالتالي الوصول إلى نموذج رياضي تم برمجة الجهاز على أساسه.

- ب- تم اجراء تجارب قياس محتوى الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة وفق معيارية ISO-3690-2000 واجريت دراسة ميتالوغرافية لعينات اللحام المنفذة، وقد أظهرت الدراسة نسب الرطوبة التي يبدأ عندها ظهور التشققات ضمن الوصلة الملحومة.

القسم الأول: الدراسة المرجعية

- ❖ الفصل الأول: طريقة اللحام بالقوس المغمور.
- ❖ الفصل الثاني: دراسة البودرة (FLUX) المستخدمة في اللحام.
- ❖ الفصل الثالث: انتشار الهيدروجين في الوصلات الملحومة.

الفصل الأول

اللحام بالقوس المغمور (SAW)

١.١ مقدمة:

ابتكرت طريقة اللحام بالقوس المغمور عام ١٩٣٠ واستخدمت بشكل كبير خلال مرحلة الحرب العالمية الثانية في صناعة وبناء السفن، وهي من أوائل الطرق التي استخدمت في اللحام المؤتمت [2]، وتسمى أحياناً في الصناعة باللحام بالقوس المخبأ أو بالقوس الغاطس، وتعد أحد أساليب اللحام بالقوس الكهربائي التي تستخدم فيها الحرارة الشديدة التي يولدها قوس كهربائي (أو أقواس كهربائية) بين الكترود (أو الكترودات) معدني عاري وفي بعض الأحيان يكون مغلفاً بطبقة رقيقة من النحاس، وبين المشغولة وتحجب مساحة اللحام بمادة حبيبية قابلة للصح (FLUX) تتساقط على المشغولة [1].

يستعمل أسلوب اللحام بالقوس المغمور على نطاق واسع في لحام الأنابيب والمراجل والأوعية المعرضة للضغط وعربات السكك الحديدية وأجزاء من السيارات والأفران الدوارة وهياكل وأجزاء المكنات وغير ذلك من منتجات أخرى كثيرة، كما تستخدم هذه الطريقة أيضاً في إكساء السطوح المتآكلة وزيادة مقاومة التآكل، يوضح الشكل (1-1) بعض تطبيقات هذه الطريقة في الصناعة [1].



لحام الأنابيب



لحام المراجل



لحام الأنابيب المعرضة للضغط



لحام السكك الحديدية

الشكل (1-1) تطبيقات اللحام بالقوس المغمور

مزايا الطريقة: يمتاز اللحام بهذه الطريقة بأنه ذو تعبئة عالية، كما أن الوصلة محمية من أكسدة الهواء الجوي، ويؤمن حماية أكبر لفني اللحام لأن حجب القوس يقي العامل من أضرار وهج القوس الشديد والأشعة فوق البنفسجية الصادرة عنه، بالإضافة إلى عدم تناثر الشرر والشظي المألوف في القوس المكشوف. تتيح هذه الطريقة إمكانية استخدامها بصورة متصلة غير متقطعة، كما تتميز بإمكانية استخدام شدة تيار مرتفعة مما يتيح الحصول على عمق تغلغل كبير للحام في مسار واحد، ويكون مظهر سطح الدرزة أملس منتظم خال من التجعدات.

كان لابتكار تقنية اللحام بالقوس المغمور وحجب معدن الدرزة من العوامل الجوية المحيطة أهمية كبيرة وذلك لأن لحام القطع السميكة بالقوس الكهربائي المكشوف وبالكتروودات مغلقة يتطلب أن تتم العملية بخطوط لحام متتالية ومتعددة لملء فجوة الوصلة وهو أمر مكلف يحتاج إلى مجهود إضافي في إزالة بقايا الخبث المتجمد وتنظيف موضع اللحام بعد كل شوط من أشواط اللحام كما أنه من المتعذر رفع مقدار شدة التيار الكهربائي للتمكن من ترسيب كمية كبيرة من معدن الالكترود بغرض التقليل من أشواط اللحام[2].

مثالب الطريقة: تعاني عملية اللحام بالقوس المغمور من التكاليف العالية، وأسلوب لحام الوضع المحدد الذي يعمل عادة في الوضع الأفقي تفادياً لهدر بودرة اللحام، كما أن عملية التفقيش أثناء اللحام غير ممكنة لأن القوس مخبأ (محجوب بالبودرة) وإنما يتم الكشف ومعالجة العيب بعد إنتهاء عملية اللحام، كذلك إن اللحام تحت البودرة ميال لجذب الرطوبة من الجو، مما يؤدي إلى تشكل المسامية وعيوب أخرى.

١.٢ المعدات المستخدمة في عملية اللحام:

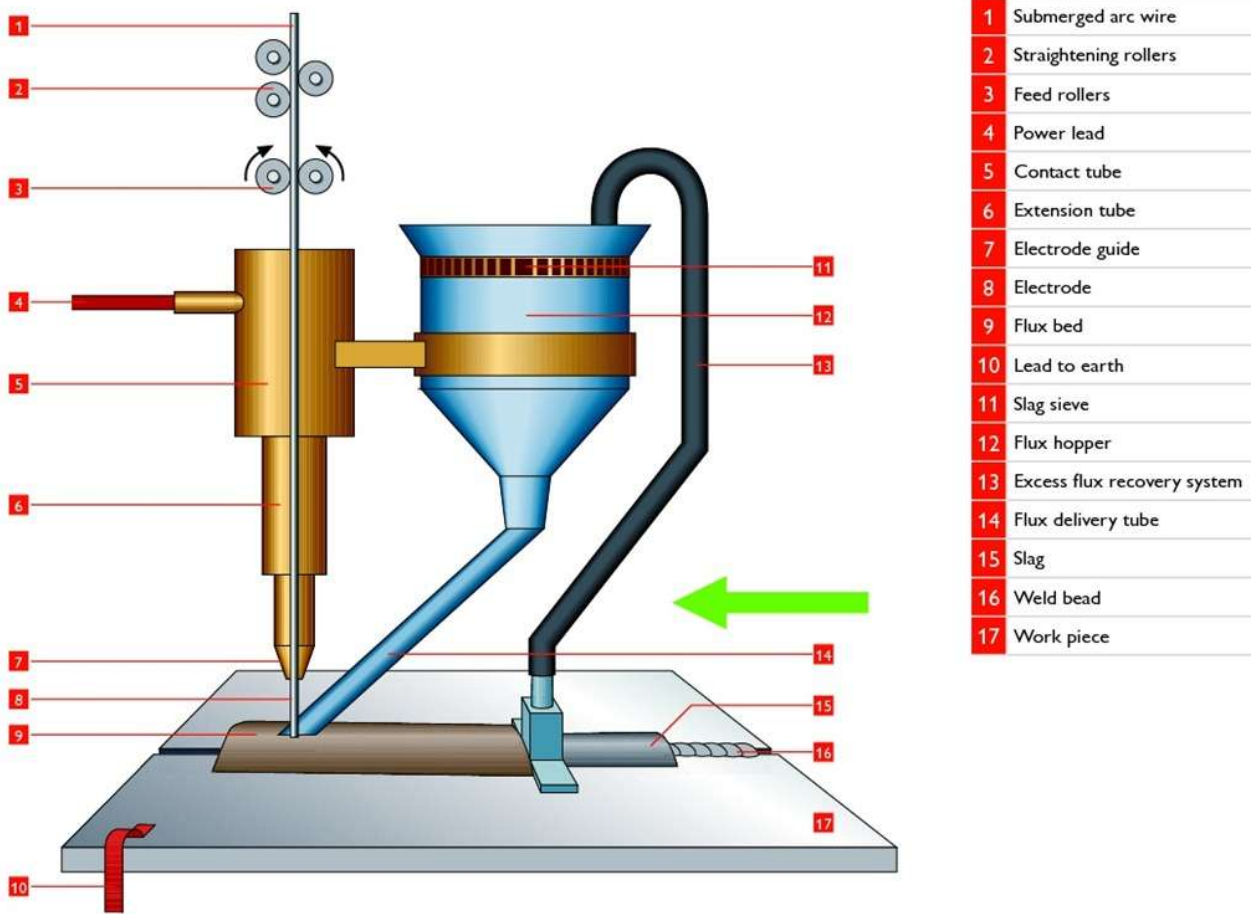
١- مصدر الطاقة.

٢- وحدة التحكم مع العربية ووحدة تزويد البودرة.

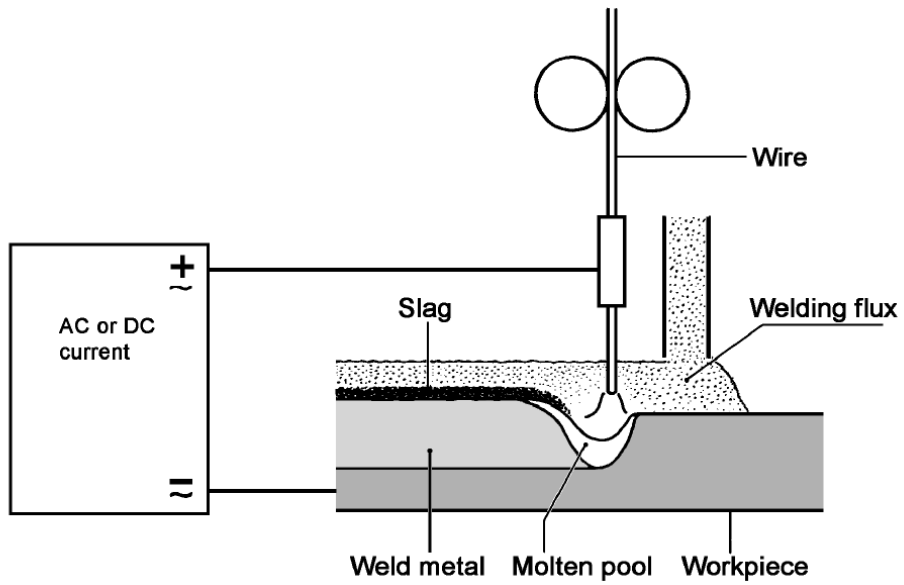
٣- وحدة تغذية السلك.

وسيتناول هذه المعدات بالتفصيل في الفصل الرابع.

يوضح الشكلان (1-2) و(1-3) مكونات وطريقة اللحام بالقوس المغمور.



الشكل (١-٢) مكونات اللحام بالقوس المغمور



الشكل (١-٣) آلية عمل القوس المغمور [3]

١.٣ متحولات عملية اللحام بالقوس المغمور:

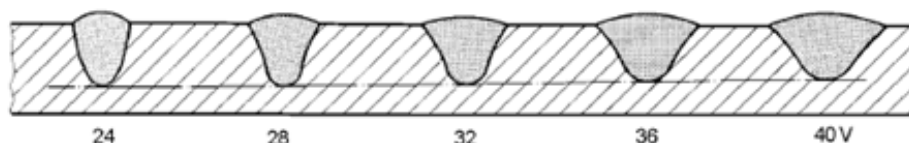
يعد اختيار متحولات (بارامترات) اللحام (سرعة اللحام - جهد القوس - تيار اللحام) أمراً في غاية الأهمية، ويعتمد بشكل أساسي على حجم العمل المراد تنفيذه، ويجب أن تحقق عملية الاختيار هذه التغلغل الجيد للحام والشكل الصحيح للوصلة الملحومة، وانطلاقاً من هذه الشروط يتم اختيار متحولات اللحام المناسبة للحصول على وصلة جيدة.

تعطي الجداول من (١-١) حتى (١-4) المبادئ الأساسية لاختيار هذه المتحولات بالشكل الصحيح.

١.٣.١ جهد قوس اللحام (V)[3]:

يتراوح جهد القوس في لحام القوس المغمور عادةً بين (16-40 V)، ويعتبر الجهد العامل الأساسي في تحديد شكل وعرض الوصلة الملحومة. يؤدي استخدام جهد قوس عالي في وصلة ملحومة على شكل حرف (I) إلى الحصول على درزة ملحومة عريضة في حين أنه في وصلة على شكل حرف (V) أو على شكل (X) سيؤدي إلى الحصول على وصلة مقعرة ويمكن أن يشكل انخفاض (انخفاض) فيصعب إزالة الخبث، بينما استخدام جهد قوس منخفض في وصلة على شكل حرف (I) يمكن أن يؤدي إلى ارتفاع شكل الدرزة (bead) أمافي وصلة على شكل حرف (V) أو على شكل (X) سيؤدي إلى وصلة محدبة وبهذه الحالة تكون إزالة الخبث صعبة أيضاً.

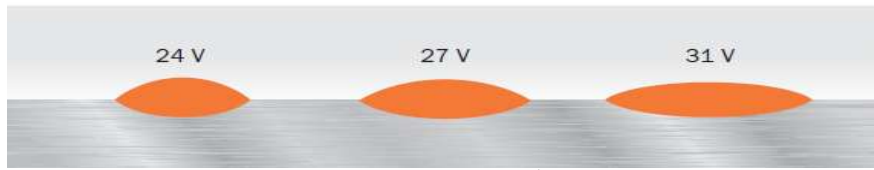
يوضح الشكلان (1-4) و (1-5) تأثير تغير الجهد على الوصلة الملحومة، حيث يلاحظ تزايد عرض الدرزة الملحومة بزيادة جهد القوس.



الشكل (1-4) تأثير تغير الجهد على شكل الوصلة الملحومة [3]

يتلخص تأثير زيادة الجهد على عملية اللحام بمايلي:

- ١- تأثير كبير على شكل وعرض خط اللحام.
- ٢- أثر قليل جداً (شبه معدوم) على التغلغل.
- ٣- زيادة استهلاك البودرة.
- ٤- ارتفاع درجة حرارة المنطقة المتأثرة حرارياً.

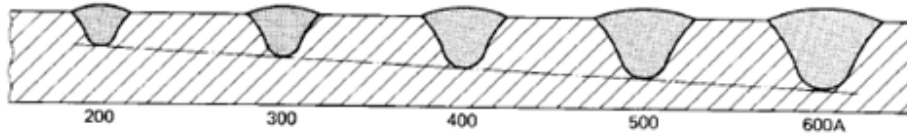


الشكل (1-5) تأثير الجهد على عرض الوصلة [4]

١.٣.٢ تيار اللحام (I) :

يتميز تيار اللحام لهذه الطريقة بارتفاع شدته بالمقارنة مع طرق اللحام الأخرى، ويمكن أن تصل شدة التيار إلى (1200 A). يؤثر التيار كما هو موضح بالشكل (1-6) على عمق التغلغل بشكل أساسي بينما ليس له أي تأثير على شكل وعرض الدرزة الملحومة، يؤدي استخدام تيارات عالية جداً إلى حرق الوصلة بينما استخدام تيارات منخفضة جداً يؤدي إلى عدم كفاية التغلغل مما يسبب عيوب بالوصلة الملحومة.

تعتمد عملية ضبط التيار على ثخانة المعدن المراد لحامه ونوع الوصلة المنفذة، ويتناسب التيار طردياً مع معدل تغذية السلك الذي يؤثر بدوره على معدل الترسيب (كمية الإلكترونات المذابة بوحدة الزمن). تؤدي زيادة التيار إلى زيادة عمق التغلغل وهذا يتطلب زيادة معدل تغذية السلك [3].



الشكل (1-6) تأثير التيار على عمق التغلغل [3]

تسبب زيادة شدة التيار:

- ١- معدلات ترسيب أعلى.
- ٢- تأثير أكبر على المنطقة المتأثرة حرارياً.
- ٣- زيادة عمق التغلغل.
- ٤- زيادة ارتفاع درزة اللحام.

١.٣.٣ سرعة اللحام (S) :

تعرف سرعة اللحام بأنها السرعة الخطية على طول خط اللحام، وهي من العوامل المؤثرة على عمق التغلغل، فإذا زادت سرعة اللحام عن السرعة المثالية المطلوبة ينخفض عمق التغلغل ويكون خط اللحام

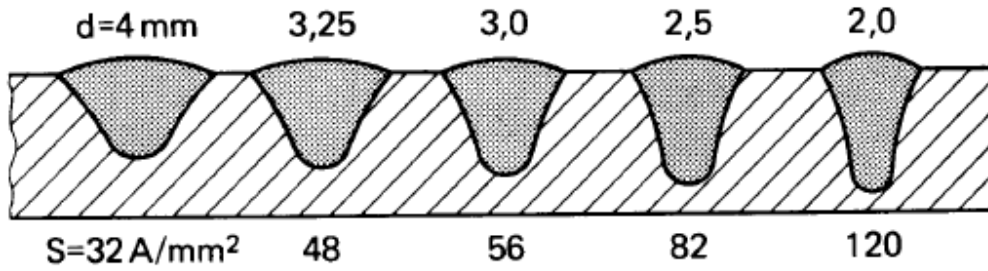
ضيقاً، وبالتالي يمكن الحد من عمق التغلغل من خلال زيادة سرعة اللحام [3]، يوضح الشكل (1-7) تأثير سرعة اللحام على الوصلة.



الشكل (1-7) تأثير تغيرات سرعة اللحام على الوصلة الملحومة [4]

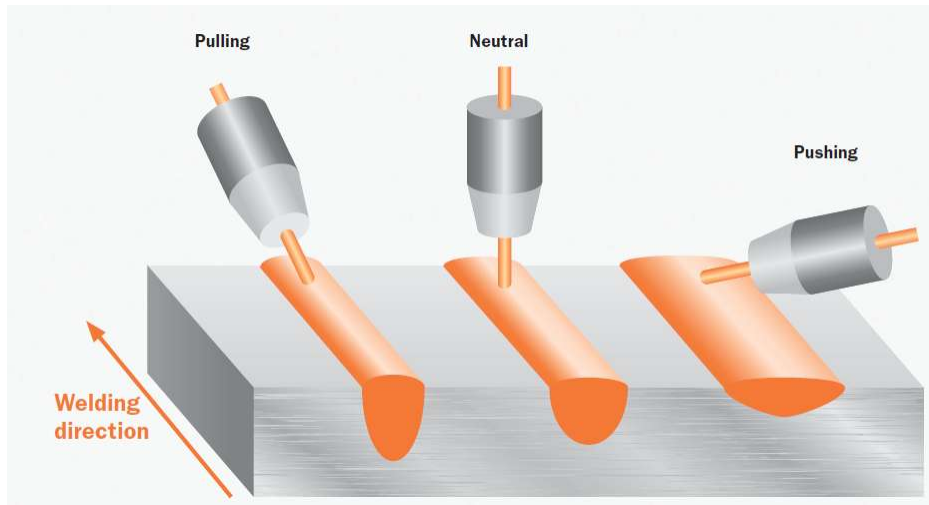
٣.٤ قطر السلك (d):

يؤدي تغير قطر السلك إلى تغير في كثافة التيار وذلك من أجل تيار ثابت، أي إن استخدام سلك ذو قطر أكبر سيؤدي بالنتيجة إلى الحد من عمق الاختراق (التغلغل) وزيادة معدل ترسب اللحام، كلما زاد قطر السلك عند تيار لحام ثابت تقل كثافة التيار والعكس بالعكس كما هو موضح في الشكل (1-8) [3].



الشكل (1-8) تأثير تغيرات قطر الالكترود عند تيار لحام ثابت [3]

تلعب زاوية ميل الالكترود على سطح المشغولة دوراً كبيراً في تحديد عمق وشكل الوصلة الملحومة وذلك نظراً لتأثيرها على عمق التغلغل وترسيب اللحام والتشقق على الساخن كما يوضح الشكل (1-9).

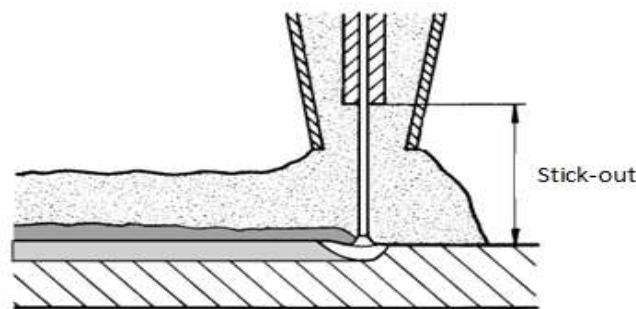


الشكل (1-9) تأثير زاوية ميل الالكترود [4]

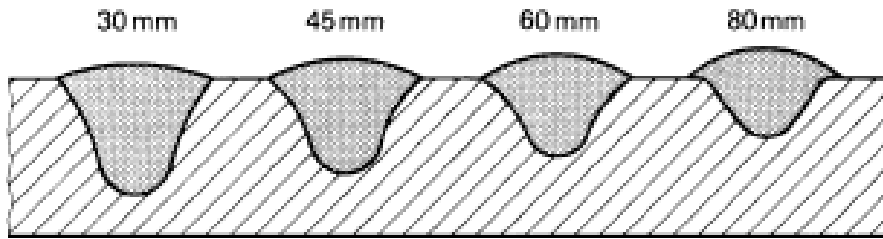
فلاحظ في حالة الحام بوضعية السحب (pulling) أن التغلغل عميق ومعدل الترسيب قليل، بينما في حالة اللحام بالوضعية العامودية للالكترود (Neutral) يكون عمق التغلغل متوسط ومعدل الترسيب متوسط، أما في الحالة الثالثة أي في لحام الدفع (pushing) نرى أن التغلغل قليل والترسيب كبير.

١.٣.٥ تأثير المسافة بين الفالة و سطح القطعة (stick-out):

تؤثر المسافة الفاصلة بين الفالة و سطح القطعة (stick-out) بشكل كبير على عمق التغلغل ومعدل ترسيب اللحام، تعد هذه المسافة من العوامل الهامة التي تؤثر على المقاومة الحرارية لرأس سلك اللحام، فإذا كانت هذه المسافة قصيرة يتشكل حرارة على سلك اللحام يؤدي إلى تغلغل كبير بينما إذا كانت المسافة كبيرة يزداد انتقال الحرارة إلى الرأس السلويقل التغلغل بينما سيزداد معدل الترسيب. يوضح الشكلان (1-10) و (1-11) المسافة (stick-out) وتأثيرها على الوصلة الملحومة [3].



الشكل (1-10) يوضح المسافة stic-out



الشكل (1-11) يوضح تأثير المسافة (stick - out) على عمق التغلغل ومعدل الترسيب [3]

توضح الجداول التالية القيم النصوح بهالمتحولات اللحام [3]:

الجدول (1-1) القيم المثالية لمتغيرات اللحام عند استخدام رأس لحام واحد:

سماكة المشغولة (mm)	قطر الالكترود (mm)	عمق التغلغل (mm)	جهد القوس (v)	تيار اللحام (A)	سرعة اللحام (Cm/min)
6	3	3	28-26	450	75
8	4	4	30-28	575	70
10	4	5	30-28	650	60

الجدول (1-2) القيم المثالية لمتغيرات اللحام عند استخدام رأس لحام واحد ووضعية لحام أفقية:

سماكة المشغولة (mm)	قطر الالكترود (mm)	عمق التغلغل (mm)	جهد القوس (v)	تيار اللحام (A)	سرعة اللحام (Cm/min)
8	5-4	4	34-32	800-750	83
12	5	6	34-32	850	60
15	6-5	7	35-33	875-850	45-42

الجدول (1-3) القيم المثالية لمتغيرات اللحام عند استخدام رأسي لحام:

سماكة المشغولة (mm)	قطر الالكترود (mm)	عمق التغلغل (mm)	جهد القوس (v)	تيار اللحام (A)	سرعة اللحام (Cm/min)
-	2.5x2	4	28-26	800	110
-	2.5x2	5	28-26	800	75

الجدول (1-4) القيم المثالية لمتغيرات اللحام عند استخدام رأسي لحام وتيار (AC):

سرعة اللحام (Cm/min)	تيار اللحام (A)	جهد القوس (v)	عمق التغلغل (mm)	قطر الألكترود (mm)	سماكة المشغولة (mm)
١٢٥	٥٥٠	٢٩+	٤	٤	-
	٦٣٠	٣٤~			
١٢٠	٥٥٠	٢٩+	٥	٤	-
	٦٣٠	٣٤~			

١.٤ عيوب اللحام بالقوس المغمور:

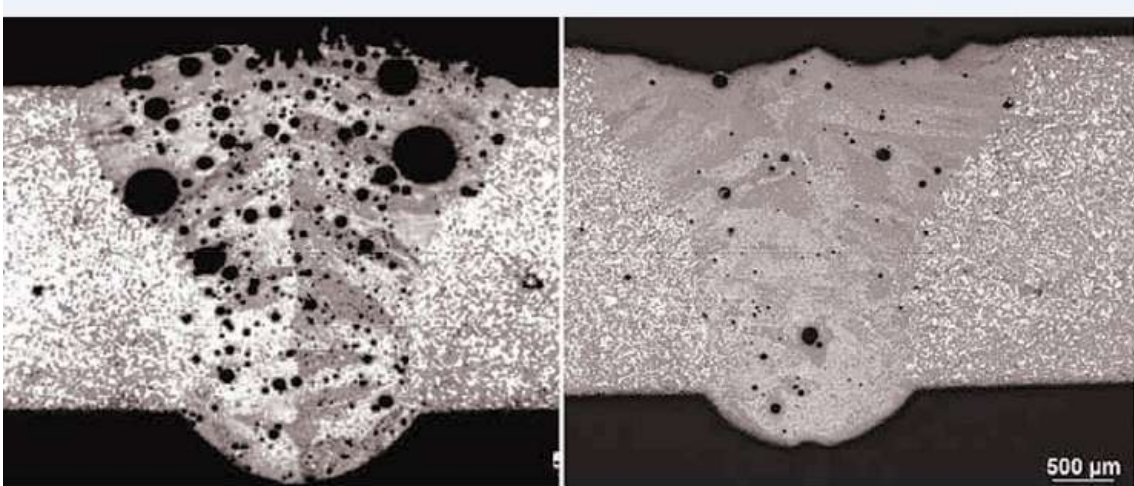
تعاني الوصلات الملحومة المنفذة باستخدام طريقة القوس المغمور من صعوبة الكشف عن العيب إلا بعد الإنتهاء من اللحام لأن قوس اللحام يكون محجوب بالبودرة، لذلك تعتبر عملية الكشف عن عيوب اللحام للقوس المغمور أحد مساوى هذه الطريقة، الأمر الذي يفرض التعرف على هذه العيوب.

1.4.1 المسامية:

يوضح الشكل (1-12) نوعين للمسامية:

النوع الأول: مسامية داخلية موجودة ضمن معدن الدرزة الملحومة.

النوع الثاني: مسامية سطحية يمكن ملاحظتها بالعين المجردة.



المسامية السطحية

المسامية الداخلية

الشكل (1-12) المسامية

الجدول (5-1) أسباب تشكل المسامية وطرق علاجها:

أسباب تشكل المسامية	طرق العلاج للتخلص أو التخفيف من المسامية
وجود طبقة من الصدأ أو طبقة من الشحم والزيت على سطح المشغولة	تنظيف سطح المشغولة من الصدأ أو الزيت أو الشحم قبل عملية اللحام
رطوبة سطح المشغولة	تجفيف سطح المشغولة
رطوبة البودرة (flux)	تجفيف البودرة بشكل جيد قبل الاستخدام
اللحام التحضيرى (التلقيط المسبق على سطح المشغولة)	إزالة اللحام المسبق ونقاط التثبيت عن سطح المشغولة
طبقة بودرة قليلة وغير كافية	زيادة سماكة طبقة البودرة
وصل الكبل الأرضي إلى المشغولة (في مكان تنفيذ اللحام)	عدم وصل كبل الأرضي إلى المكان المراد تنفيذ اللحام فيه

١.٤.٢ التلثم [3]: الشكل (1-13)

يحدث عيب التلثم نتيجة:

- ١- سرعة لحام عالية.
- ٢- جهد تغذية كبير.



الشكل (1-13) التلثم [4]

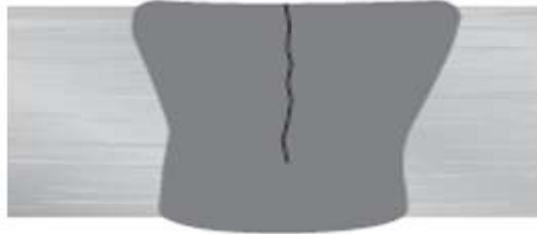
يمكن التخلص من هذا العيب من خلال ضبط سرعة اللحام بشكل مناسب وضبط متغيرات اللحام بحيث تكون متناسبة فيما بينها.

١.٤.٣ التشققات الطولية:

أسباب تشكل التشققات الطولية:

- ١- عندما تكون نسبة عمق التغلغل إلى عرض الدرزة أكبر من الواحد.
- ٢- الطول المفرط لحوض (بركة) اللحام.
- ٣- رطوبة المشغولة.

يمكن الحد من هذا العيب من خلال ضبط المتحولات بحيث تحقق (عمق تغلغل / عرض اللحام > ١) والتسخين الأولي للمشغولة للتخلص من الرطوبة [3]. يوضح الشكل (1-14) التشققات الطولية.



الشكل (1-14) التشققات الطولية [4]

١.٤.٤ التشققات العرضية:

تتشكل التشققات العرضية المبينة بالشكل (1-15) نتيجة:

- ١- رطوبة البودرة.
- ٢- معدل تبريد مرتفع جداً.

ويمكن التخلص أو الحد من هذا العيب من خلال تجفيف البودرة والتسخين الأولي للمشغولة [3].



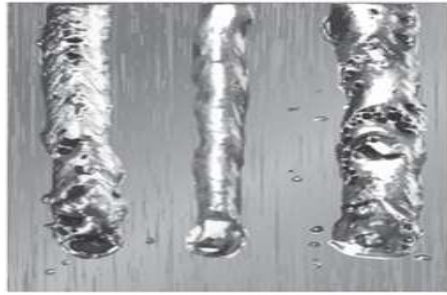
الشكل (1-15) التشققات العرضية [4]

1.4.5 المنظر السيء للحام:

يتشكل المنظر السيء للوصلة الملحومة نتيجة استخدام جهد تغذية عالٍ أو شدة تيار عالية أو سرعة لحام كبيرة.

ويجب ضبط المتحولات بشكل مناسب للتخلص من المنظر السيء للحام [3].

يوضح الشكل (1-16) عيب المنظر السيء للوصلة اللحامية.



الشكل (1-16) المنظر السيء للحام [4]

1.4.6 مضمنات الخبث:

إن عيوب مضمنات الخبث المبينة بالشكل (1-17) ليست شائعة كثيراً ولكن تحدث غالباً عندما تنفذ الوصلة الملحومة بأكثر من شوط ويحدث ذلك في لحام القطع السمكية، كما يسبب تسرب البودرة غير المنصهرة إلى داخل الوصلة هذا العيب.

وللتخلص من هذا العيب يجب إزالة كل آثار الخبث قبل كل شوط للحام بشكل جيد [3].



الشكل (1-17) مضمنات الخبث [4]

1.4.7 نقص التغلغل:

إن التغلغل الصحيح للحام في الوصلة عامل بالغ الأهمية لأنه يلعب دوراً هاماً في تحديد متانة وقوة الوصلة الملحومة. يظهر نقص التغلغل في مقطع عرضي من وصلة ملحومة بحواف على شكل خطوط مستقيمة تشكل زاوية حادة.

يحصل عيب نقص التغلغل في حالة اللحام من الجانبين نتيجة لأحد الأسباب التالية:

- عدم تقابل اللحام من الجانبين.
- استخدام تيار لحام منخفض.
- سرعة اللحام كبيرة جداً.

لذلك لابد من ضبط شدة التيار وسرعة اللحام بشكل جيد للحد من هذا العيب [3][4].

يوضح الشكل (1-18) عيب نقص التغلغل.



الشكل (1-18) نقص التغلغل [4]

١.٤.٨ ثقب على سطح اللحام:

تتشكل الثقوب على سطح اللحام الشكل (1-19) نتيجة انطلاق غاز الهيدروجين خلال عملية تجمد المعدن أي خلال التبلور الأولي، ويشكل الغاز الغير قادر على الخروج من المعدن أثناء اللحام فجوة ويتصلب المعدن حولها.

أهم الأسباب التي تساهم في تشكل الثقوب هي:

- ١- الإفراط في سماكة طبقة البودرة.
 - ٢- تلوث الالكترود.
 - ٣- رطوبة البودرة.
 - ٤- تلوث المشغولة بالزيت أو الشحم أو وجود طبقة من الصدأ.
- يمكن الحد من هذا العيب من خلال تفادي الأسباب التي أدت إلى تشكله.



الشكل (1-19) ثقب على سطح اللحام [4]

الفصل الثاني

بودرة اللحام (FLUX)

يتناول هذا الفصل دراسة بودرة اللحام المستخدمة في عمليات اللحام بالقوس المغمور من حيث مكوناتها، وظائفها، أنواعها، تصنيفها وتصنيعها.

٢.١ مقدمة:

تُعرف بودرة اللحام وفقاً للجمعية الأمريكية للحام (AWS) بأنها المادة المستخدمة لمنع انحلال الأكاسيد والمواد غير المرغوب بها في الوصلة، وتسمى بودرة الحماية وهي عبارة عن حبيبات صغيرة تستخدم أثناء عملية اللحام لحجب قوس اللحام، وبالتالي فهي تحمي القوس من تلوث الوسط المحيط. يؤثر نوع وتركيب البودرة إلى حد كبير على إنتاجية عملية اللحام واقتصاديتها إضافة لدورها في التأثير على الخصائص التشغيلية واستقرار القوس وموضع اللحام والتغلغل والخواص الميكانيكية والبنية الميكروية فكل مكون من مكونات البودرة له تأثير على جودة اللحام.

يتم تقييم جودة اللحام من خلال عدة خصائص مثل التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية وشكل الوصلة والبنية الميكروية وقد بينت الدراسات أن هذه الخصائص تتأثر بالتركيب الكيميائي للبودرة ولهذا من الضروري اختيار النوع الصحيح والنسب الصحيحة لمكونات البودرة المختلفة لتحقيق جودة عالية في اللحام. لم يتم التوصل حتى الآن إلى نوع محدد من بودرة اللحام مناسب لجميع التطبيقات وجميع أنواع اللحامات، فعلى سبيل المثال البودرة التي تم تطويرها للحصول على خصائص ميكانيكية جيدة للوصلة عانت من ضعف في بعض الخصائص الأخرى، لذا فإن الشركات تعمل على صناعة مجموعات مختلطة ومختلفة من البودرة والتي يمكن استخدامها بشكل واسع للحصول على الخصائص المطلوبة [5].

يتم تحسين التركيب الكيميائي للوصلة الملحومة من خلال تحسين البودرة بالتوافق مع أسلاك الملمى للحصول على الخصائص المطلوبة للوصلة.

تتكون البودرة بشكل عام من الكالسيوم وأكسيد الكالسيوم والمغنيزيوم والسلكون والألمنيوم والمنغنيز، كذلك يمكن إضافة عناصر خلأطية لها مثل الكروم والنيكل وذلك حسب الطلب والإستخدام.

٢.٢ وظائف البودرة:

١. إزالة الشوائب من المعدن المنصهر.
 ٢. تعمل أثناء التبريد كغطاء واقٍ من الملوثات الجوية.
 ٣. تشكل سبيكة تضاف إلى معدن اللحم وتساعد في الحفاظ على القوس وصقل معدن اللحم والتحكم في درزة اللحم وتقلل من تناثر المعدن والتحكم في لزوجة الخبث [6].
- تمثل التكلفة العالية للبودرة نصف التكلفة الكلية لعملية لحام القوس المغمور وتشير التقديرات بشكل عام أن كل واحد كغ من البودرة تستهلك من قبل واحد كغ من المعادن الملحومة ويزداد استهلاك البودرة مع زيادة جهد القوس.

٢.٣ أنواع البودرة:

تصنف بودرة اللحم إلى ثلاثة أصناف رئيسية وهي [3][2]:

٢.٣.١ البودرة المنصهرة:

هي بودرة متجانسة تذوب المواد الداخلة في تركيبها معاً لتشكل مادة تشبه الزجاج ثم يتم طحنها وسحقها وتدويرها حتى يتم تشكيلها على شكل حبيبات صغيرة بالحجوم المناسبة.

تتميز البودرة المنصهرة بما يلي:

١. تجانس التركيب الكيميائي.
٢. غير ماصة للرطوبة وبالتالي سهولة في التعامل والتخزين.
٣. سهولة إعادة التدوير.

بينما تعاني البودرة المنصهرة من السلبيات التالية:

١. تفاعل الأكاسيد مع الخلائط الحديدية.
 ٢. الإنصهار عند درجات الحرارة العالية.
- بما أن البودرة المنصهرة غير ماصة للرطوبة فهي مناسبة لعمليات اللحام التي تجري في الهواء الطلق أو اللحامات التي تجري في مناطق ذات معدلات الرطوبة المرتفعة.

٢.٣.٢ البودرة المترسبة (الملبدة):

تنتج هذه البودرة من خلال تليد المكونات المختلفة للبودرة على شكل كتل ثم يتم طحنها وتشكيلها كحبيبات صغيرة.

٢.٣.٣ البودرة المتكتلة:

يتم تشكيل الحبيبات في البودرة المتكتلة عن طريق الدرفلة للعناصر المختلفة للحصول على أشكال اسطوانية أو مخروطية ويتم إضافة مادة ماءات الزجاج إليها، بعد ذلك يتم تجفيفها في فرن دوار عند درجة حرارة (٨٠٠-٩٠٠ درجة مئوية) بعد التجفيف يتم تشكيلها على شكل حبيبات بحجم حبيبات البودرة المنصهرة تقريباً [3].

تميل البودرة المتكتلة إلى امتصاص الرطوبة بشكل كبير لذلك ينبغي العناية بها وتخزينها بشكل جيد. يوضح الجدول (1-2) فوائد وعيوب استخدام الأنواع الثلاثة:

الجدول (1-2) فوائد وعيوب أنواع البودرة [3]:

نوع البودرة	فوائد الاستخدام	العيوب
البودرة المنصهرة	- غير ماصة للرطوبة - حبيبات ذات متانة عالية	- لا يمكن ادراج عناصر المزج مثل الكروم والنيكل في البودرة. - كثافة نوعية عالية (1.6 kg/L)
البودرة الملبدة (المترسبة)	- امتصاصها للرطوبة منخفض - كثافة نوعية منخفضة نسبياً (1.3 Kg/L)	لا يمكن ادراج عناصر المزج مثل الكروم والنيكل في البودرة. - متانة الحبيبات منخفضة.
البودرة المتكتلة	- يمكن ادراج عناصر المزج مثل الكروم والنيكل في البودرة. - كثافة نوعية منخفضة (0.8 Kg/L)	- ماصة للرطوبة. - متانة الحبيبات منخفضة.

٢.٤ مكونات البودرة:

تتضمن البودرة المنصهرة والبودرة المتكتلة عادة عدة أنواع من الهاليدات والأكاسيد مثل MnO , SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , TiO_2 , FeO , CaF_2 وسيليكات الصوديوم والبوتاسيوم [7]. تستخدم الهاليدات من أجل الحصول على وصلة عالية المتانة للفولاذ الخاضع لحمولات عالية والمستخدم في التطبيقات الهامة أما الأكاسيد تستخدم من أجل الوصلات المستخدمة في التطبيقات غير الهامة. تتصف الأكاسيد الداخلة في تركيب البودرة بأنها ذات طبيعة قلوية، CaO , MgO , BaO , CaF_2 , Na_2O ، ويعرف دليل القلوية بأنه النسبة K_2O , MnO وقليل منها ذات طبيعة حمضية SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 ، ويعرف دليل القلوية بأنه النسبة الوزنية المئوية لمجموع الأكاسيد القلوية إلى مجموع الأكاسيد الحامضية والذي يحدد قدرة فصل الخبث والخصائص الميكانيكية والناقلية الكهربائية [7].

٢.٥ قاعدية البودرة:

تحسب قاعدية البودرة من مكوناتها الكيميائية بشكل مستقل عن السلك حيث تعطي القاعدية الأعلى جودة أعلى ولكنها تقلل من السمات الأخرى مثل سرعة اللحام وامتداد درزة اللحام لذلك من المفيد اختيار أدنى قاعدية ممكنة للبودرة من أجل المتانة المطلوبة، وتعطي القاعدية بالعلاقة (1-2) [8]:

$$B = \frac{CaO + M}{...}$$

٢.٦ تصنيف البودرة كيميائياً:

يمكن تصنيف البودرة من وجهة نظر كيميائية على النحو التالي[3]:

١- البودرة الحمضية و المحايدة (مؤشر القاعدية $B \leq 1.2$)

٢- البودرة الأساسية ($B=1.2-2$)

٣- البودرة عالية الأساسية ($B > 2$)

٤- البودرة الخاصة

١.٦.٢ البودرة الحمضية والمحايدة (Acidic and neutral fluxes):

تتميز هذه المجموعة من البودرة بمايلي:

- خصائص لحام ممتازة.
- الخصائص الميكانيكية جيدة.
- تستخدم مع أسلاك ملء غير مختلطة التركيب.
- مناسبة للاستخدام مع التيار المتناوب والمستمر.
- أهم الأنواع المدرجة ضمن هذه المجموعة [8][3]:

١- البودرة (AWS) F7AZ-EL12 أو (OK Flux 10.81):

لهذا النوع مؤشر قاعدية حوالي (0.5) ويمكن تصنيفها كيميائياً من نوع الألومينا، أهم ما يميزها:

- القدرة الجيدة على التخلص من الخبث.
- سرعة لحام عالية وانخفاض مخاطر تشكل المسامية.

تحظى هذه البودرة بانتشار واسع نتيجة المواصفات الجيدة وخاصة في لحام الوصلات والمفاصل الأفقية والرأسية سواء باللحام برأس واحد أو برأسين.

٢- البودرة (AWS) F7A2-EL12 أو (OK Flux 10.80):

لهذا النوع من البودرة مؤشر قاعدية يصل إلى (١.١) وتصنف كيميائياً من السيليكات كونها مكونة من الكالسيوم والمغنيزيوم، تنتمي هذه البودرة إلى الجيل القديم ولكن لا تزال تستخدم على نطاق واسع وخاصة في لحام السماكات الكبيرة كما في لحام وبناء السفن.

تتميز هذه البودرة باستخدامها عند تيارات اللحام العالية وهذا يسمح بتجمع كبير للحام ويعود السبب في ذلك ارتفاع نسبة (SiO_2) في الخبث.

العيب الأساسي لهذه البودرة أن صلاحيتها محدودة نسبياً ويعود ذلك لامتناسها للرطوبة.

٣- البودرة (AWS) F6A0-EL12 أو (OK Flux 10.40):

وهي بودرة منصهرة قليلة القاعدية مؤشر القاعدية لها (0.7) تستخدم عند سرعات اللحام العالية من أجل أسلاك صغيرة أو كبيرة.

لا تمتص حبيبات البودرة لهذا النوع الرطوبة لذلك تستخدم دون إعادة تجفيف حتى مع الفولاذ الحساس للتشققات الهيدروجينية، وتساهم هذه البودرة بزيادة معدل السيليكون والمغنيز في معدن اللحام بنسب عالية مما يسمح باستخدامها في اللحام الزاوي والتناكبي [8][3].

٤- البودرة (AWS)F6A2-EL12 أو (OK Flux 10.45):

مؤشر القاعدية لها (0.85) وتستخدم في عمليات اللحام بسرعات عالية جداً تصل إلى (300 cm / min) مع سلك صغير الأبعاد من أجل الصفائح الرقيقة، لا تمتص الحبيبات الرطوبة نظراً للعمليات التصنيعية الخاصة وهينزود معدن اللحام بالمنغنيز.

تستخدم في عمليات اللحام التناكبيوالتراكيبي والزواوي وتعمل بشكل جيد مع التيار المستمر والمتناوب، وتستخدم في لحام اللوحات الإعلانية المضيئة مع سلك قطره (1.6 mm)، سرعة لحام (300 cm / min) كما تستخدم في لحام خزانات الماء [8][3].

٢.٦.٢ البودرة الأساسية:

يتراوح مؤشر القاعدية لهذه المجموعة بين (١.٢) إلى (2) وتتميز بمايلي:

- خصائص لحام جيدة.
- خصائص ميكانيكية جيدة.
- البودرة مختلطة وبالتالي تستخدم أسلاك ملء غير خلائطية مثل (Ok Autrod 12.10)، كما يمكن استخدام أسلاك ملء مخلوطة مثل (Ok Autrod 12.24).
- أهم أنواع البودرة الأساسية [8][3]:

١- البودرة (AWS)F7A4-EL12 أو (OK Flux 10.70):

يصل مؤشر القاعدية لهذا النوع إلى (1.7) وتعتبر كيميائياً من الألومينات الأساسية، وهي من النوع المختلط ويمكن استخدامها مع التيار المستمر والمتناوب، وتتميز بالموصفات التالية:

- القدرة على التخلص من الخبث.
- انخفاض خطر تشكل المسامية.
- إمكانية استخدامها مع التيارات الكبيرة.
- فترة صلاحيتها جيدة.

٢- البودرة (AWS)F6A4-EL12 أو (OK Flux 10.71):

يصل مؤشر القاعدية لهذا النوع من البودرة إلى (1.6) وكما في البودرة (F7A4-EL12) تعتبر كيميائياً من الألومينات الأساسية ومع ذلك تختلف عنها بأن نسبة العناصر الخلائطية فيها أقل لذلك تستخدم معها أسلاك ملء خلائطية.

تتطابق خصائص اللحام العامة لهذه البودرة مع خصائص البودرة (F7A4-EL12) والفرق الوحيد أنها أكثر ملائمة للحام المواد السميكة.

٣- البودرة (EN) S3T0ZS1 أو (OK Flux 10.٣٠):

- مؤشر القاعدية لهذه البودرة (1.6)، وتحتوي ٣٥% بودرة حديد لذلك تعطي ملحومات عالية الجودة، صممت هذه البودرة بشكل أساسي من أجل اللحام أحادي الجانب في الفولاذ المستخدم في صناعة السفن التي تخضع لحمولات متوسطة وعالية.
-تحتوي البودرة على السيليكون كما تزود معدن اللحام بالمولبيديوم.
٤- البودرة (AWS) F6A4-EM12 أو (OK Flux 10.47):

وهي بودرة منصهرة مؤشر القاعدية لها (1.3) وتملك قدرة هائلة على إزالة الخبث في الوصلات الضيقة على شكل (v) وتوفر سرعة لحام عالية إضافة إلى قدرتها العالية على نقل التيار، يمكن استخدامها دون إعادة تجفيف حتى عندما يكون الفولاذ حساس للتشققات الهيدروجينية. تستخدم مع سلك مفرد أو متعدد من أجل اللحام التناكبي والزواوي وتعمل مع التيار المستمر والمتناوب.

إن القدرة على نزع الخبث وإعطاء عناصر خلأطية من المنغنيز والسيليكون تجعل منها بودرة جيدة من أجل اللحام متعدد الأشواط ولحام المقاطع السمكية، وقد أوجدت هذه البودرة حلول للعديد من مشاكل اللحام وهي تملك ميزات أفضل من جميع أنواع البودرة الأخرى، هذه البودرة مفضلة جداً في لحام التطبيقات البحرية دون الحاجة لإعادة التجفيف وفي المقاطع السمكية الحساسة لتشققات الهيدروجين.

٢.٦.٣ البودرة عالية الأساسية:

يتراوح مؤشر القاعدية لهذه المجموعة بين (2- 3.5) وتتميز بالخصائص التالية:

- مواصفات لحام مقبولة (لا تستخدم عادةً إلا مع تيار (DC)).
- الخصائص الميكانيكية ممتازة.
- البودرة غير خلأطية لذلك تستخدم أسلاك ملء خلأطية.

أنواع البودرة عالية الأساسية [8][3]:

١- البودرة (AWS) F7A6-EH12K أو (OK Flux 10.61):

وهي بودرة حبيبية عالية القاعدية يصل مؤشر القاعدية لهذا النوع إلى (2.8) وتعتبر كيميائياً من النوع الأساسي، تستخدم من أجل اللحام التناكبي وحيد أو متعدد الأشواط عندما تكون المتانة العالية مطلوبة وهي أفضل من أنواع البودرة الأخرى عندما يتم اللحام بسلك مفرد DC+.

يساعد استخدام بودرة من هذا النوع على التخلص من الخبث وتشكيل لحام جيد والتخلص من خطر المسامية وإمكانية اللحام بتيارات كبيرة تكون أفضل عند استخدام بودرة من هذا النوع.

تعطي هذه البودرة نسبة قليلة جداً من المنغنيز والسيليكون لمعدن اللحام، وتستخدم من أجل لحام الإنشاءات العامة ولحام الأوعية المعرضة للضغط.

٢- البودرة (AWS) F8P6-EA4-A4 أو (OK Flux 10.62):

وهي بودرة حبيبية عالية القاعدية مؤشر القاعدية لهذا النوع أعلى مؤشر قاعدية ويصل إلى (3.4) وخصائص اللحام لهذه البودرة جيدة، تستخدم مع التيار المستمر والمتناوب من أجل اللحام متعدد الأشواط للمواد ذات المقاطع السميكة وذلك عندما تكون المتانة العالية عند درجات حرارة منخفضة مطلوبة وهي تحوي على السيليكون والمنغنيز، كما تستخدم للحام التناكبي والزواوي ويعد لحام الفجوات الضيقة أحد أهم تطبيقاتها بسبب القدرة الجيدة على فصل الخبث ونعومة جدار الوصلة.

أهم مجالات الاستخدام في لحام الصناعات البحرية، الحفارات، وفي لحام الأوعية المعرضة للضغط والمستخدمة في الصناعات النووية.

٣- البودرة (AWS) F8P8-EB3R-B3R أو (OK FLUX 10.63):

وهي بودرة حبيبية عالية القاعدية مؤشر القاعدية لها (٣.٢) تستخدم من أجل اللحام متعدد الأشواط للفولاذ الخلائط كذلك عندما تكون المتانة العالية مطلوبة حتى بعد المعالجة الحرارية، يمكن أن تستخدم مع سلك مفرد أو متعدد الأسلاك من أجل اللحام التناكبي والزواوي وتعمل مع التيار المستمر والمتناوب.

تحوي البودرة كمية معتدلة من المنغنيز والسيليكون لذا فهي ممتازة في اللحام متعدد الطبقات، كما تستخدم من أجل لحام الفجوات الضيقة نظراً للقدرة على فصل الخبث ونعومة جدار اللحام، وتعمل في مجال منخفض من جهد التغذية.

تستخدم في لحامات الصناعات البتروكيميائية والكيميائية، وفي لحامات الأوعية المعرضة للضغط وفي لحام الفولاذ عالي المتانة.

٢.٦.٤ البودرة الخاصة:

تكتسب هذه التسمية من تطبيقاتها الخاصة مثل لحام الفولاذ المقاوم للصدأ ولا علاقة للتركيب الكيميائي بالتسمية، أهم نوعين من هذه البودرة هما OK Flux 10.91 and OK Flux 10.92. كلاً النوعين من البودرة الحامضية ومؤشر القاعدية لهما حوالي (0.8) ولا يوجد ما يقابلها وفق (AWS) وقد تم تصنيعهما من شركة (ESAB)، ويستخدمان في تطبيقات لحام التغطية السطحية باستخدام الفولاذ المقاوم للصدأ والتي تتطلب خصائص لحام ممتازة، ويتميز النوعان بحتوائها على الكروم الذي يعمل على تعويض خسارة الكروم أثناء اللحام.

تستخدم البودرة (OK Flux 10.91) مع اسلاك ملء مثل (OK Autrod 16.10 and 16.30) بينما تستخدم البودرة (Ok Flux 10.92) مع الفولاذ المقاوم للصدأ (stripelectrodes).

يوضح الجدول (2-2) تأثير نوع البودرة على مختلف خصائص اللحام والجودة.

الجدول (2-2) يوضح تأثير نوع البودرة على مختلف خصائص اللحام والجودة [3]:

F8P6- EA4-A4	F7A6- EH12K	F6A4 -EL12	F7AZ- EL12	F7A2- EL12	F7A0- EL12	المميزات
X	X	XX	XX	XXX	XXX	استخدام تيارات عالية
XXX	X	XXX	XX	XX	XX	لحام بتيار AC
XX	XX	XX	XX	XX	XXX	الأمان من المسامية
X	X	XX	XXX	XX	X	خصائص اللحام الزاوي
XX	XX	XX	XXX	XXX	X	التخلص من الخبث
X	X	XX	XXX	XX	XX	سرعة اللحام
XXX	X	XX	XXX	XXX	XXX	مظهر اللحام
XXX	XXX	XX	X	X	X	الامان من التشقق
XXX	XXX	XXX	X	X	X	الخصائص الميكانيكية

حيث X مقبول، XX جيد، XXX جيد جداً.

٢.٧ تأثير مكونات البودرة على سلوك اللحام:

تؤثر الخصائص الفيزيائية للبودرة (مثل حجم الخليطة والكثافة الظاهرية وسيولتها ورطوبتها ونقطة انصهارها وسرعة انصهارها وناقليتها الكهربائية) بشكل كبير على سلوك اللحام، ولإنتاج وصلة ملحومة قوية بطريقة اللحام بالقوس المغمور يجب أخذ الخواص السابقة بعين الاعتبار. يمكن تلخيص تأثير المكونات على سلوك اللحام بمايلي:

٢.٧.١ اللزوجة:

يجب أن تكون البودرة لزجة بما فيه الكفاية لتغطية منطقة اللحام وفي نفس الوقت يجب أن تكون اللزوجة منخفضة لمنع انحلال الغازات المحبوسة بين البودرة المنصهرة والمعدن.

تتناقص لزوجة البودرة بزيادة محتوى البودرة من أكاسيد الحديد والكالسيوم والمغنزيوم والحديد وفلوريد الكالسيوم، فيما تزداد لزوجة البودرة بوجود أكسيد الألمنيوم والسيليكون والتي تدخل في تركيب أغلب أنواع البودرة.

٢.٧.٢ الاستهلاك:

يؤثر استهلاك البودرة بشكل مباشر على إنتاجية اللحام بالقوس المغمور، ويتأثر استهلاك البودرة بمتحولات عملية اللحام كما يلي:

١- يزداد الاستهلاك بزيادة جهد القوس ويزداد بشكل صغير جداً بزيادة التيار.

٢- يتناقص الاستهلاك بزيادة سرعة اللحام.

وكمعدل وسطي يبلغ معدل استهلاك البودرة (1 Kg) لكل (1 Kg) من معدن اللحام في لحام القوس المغمور.

٢.٧.٣ حجم الحبيبات:

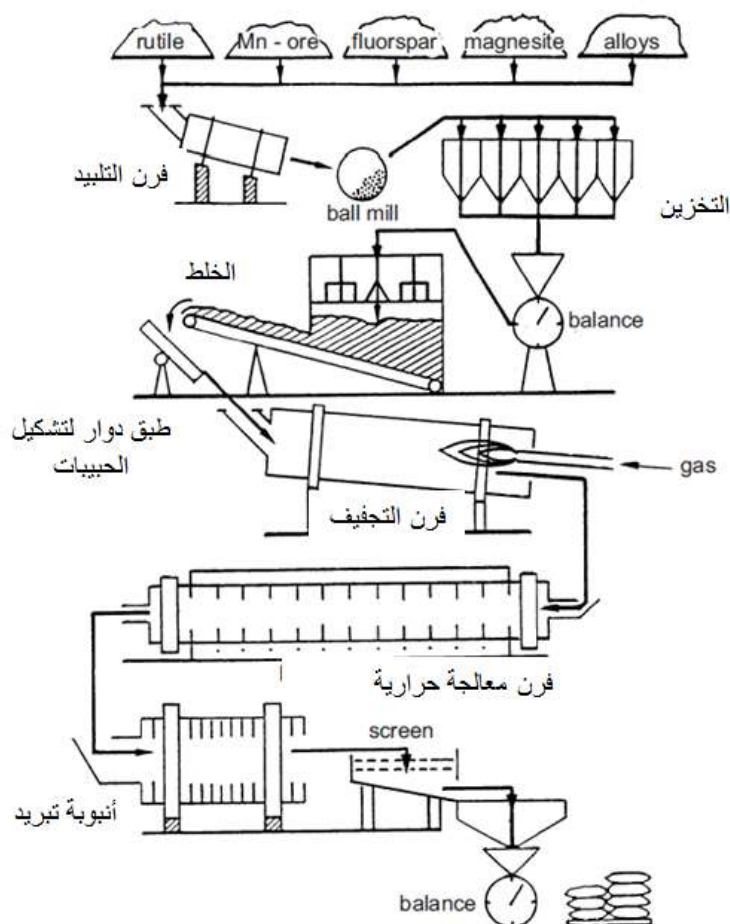
يجب أن تكون الحبيبات ذات حجم تسمح لها بالتدفق (الإنسياب) بحرية أثناء التغذية.

لتحقيق خصائص جيدة يستخدم مسحوق سيليكات البوتاسيوم ولكنها مكلفة لذلك يمكن الإستعاضة عنها بمواد أقل تكلفةً هي سيليكات الصوديوم ولكن يجب إضافة كربونات الكالسيوم لتعطي فعالية جيدة.

٢.٨ تصنيع البودرة:

٢.٨.١ طريقة تصنيع البودرة المتكتلة:

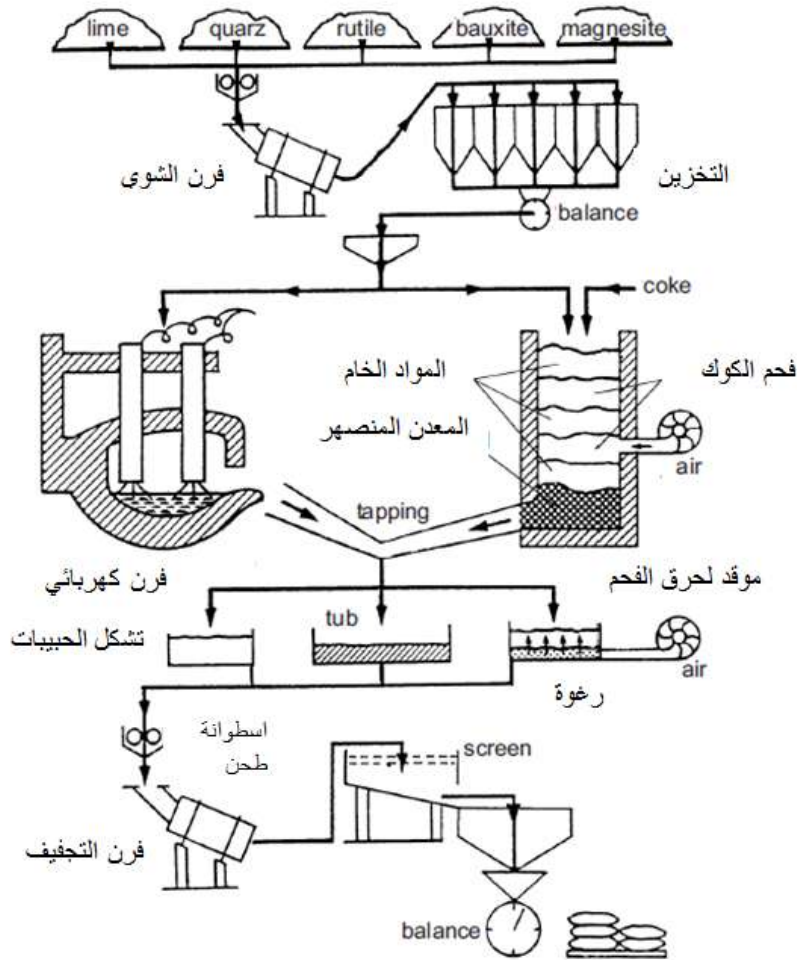
يتم تصنيع البودرة المتكتلة من حبيبات ناعمة جداً يتم وزنها ثم خلطها مع مواد رابطة (مئات الزجاج) ثم تنقل إلى طبق دوار حيث يتم تكسيدها وطحنها حتى تصل إلى الحجم المطلوب وتتجانس الحبيبات بعدها، يتم تبخير الماء في فرن التجفيف وتتصلب الحبيبات وتنقل بعد ذلك إلى فرن التلدين ليتم إزالة الماء المتبقي في وقت لاحق عند درجات حرارة تتراوح بين ٥٠٠ - ٩٠٠ م.د [9].



الشكل (2-1) طريقة إنتاج البودرة المتكتلة [9]

٢.٨.٢ طريقة تصنيع البودة المنصهرة:

تتميز البودة المنصهرة عن البودة المتكتلة بأن حبيباتها أكثر تجانساً وأقل امتصاص للرطوبة ويتم تصنيع البودة المنصهرة من خلال طحن المواد الأولية وتمريها في فرن للشوي ثم يتم تمريرها أما عبر فرن كهربائي أو موقد لفحم الكوك حيث يتم صهر المواد الأولية ويوضع بعدها المصهور في أنبوب ويزال منه الرغوة بتعريضه للهواء وتشكل بعدها الحبيبات يتم تمرير هذه الحبيبات عبر اسطوانات لطحنها بحيث تصبح متجانسة فيما بينها وتوضع في فرن التجفيف لازالة الرطوبة منها بشكل نهائي وتحفظ في أكياس خاصة كما يبين الشكل (2-2).



الشكل (2-2) طريقة تصنيع البودة المنصهرة [9]

٢.٩ إعادة تدوير وتجفيف البودرة:

2.9.1 إعادة التدوير:

يتم تدوير البودرة لإعادة استخدامها من جديد ويجب إزالة الرطوبة والزيوت بشكل نهائي قبل عملية إعادة التدوير وذلك باستخدام الهواء المضغوط، كما يتم إزالة الشوائب المعدنية مثل نثرات الخبث وغيرها من خلال الغربلة، إن المعالجة المناسبة وفق المتطلبات المعيارية للخبث تمكننا من إعادة تدوير البودرة واستخدامها كبديل موثوق عن البودرة الجديدة مما يؤدي إلى توفير ٥٠% من التكلفة الإجمالية.

إن بودرة سيليكات الكالسيوم المنصهرة هي الأكثر قابلية لإعادة التدوير لأنها لا تتأثر بإعادة التسخين ومكوناتها لا تتأكسد بسهولة.

عادةً يتم استخدام مزيج من البودرة الجديدة والبودرة المدورة في كثير من الحالات، وهي طريقة فعالة وتخفض بشكل كبير من التكلفة.

٢.٩.٢ التخزين:

لا بد من القيام بإجراء احترازي من أجل التقليل من نسبة الرطوبة والحفاظ على البودرة جافة.

يجب أن يتم تخزين أكياس البودرة غير المفتوحة والحفاظ عليها بظروف التخزين التالية:

- ١- درجة الحرارة ٢٥ درجة مئوية (± ٥).
- ٢- يجب ألا تتجاوز الرطوبة النسبية للوسط المحيط (60%).
- ٣- يجب ألا تخزن البودرة لأكثر من ٣ سنوات.
- ٤- يجب ألا تبقى البودرة الموجودة في خزان البودرة المفتوح أكثر من ٨ ساعات وإذا بقيت يجب تجفيفها بوضعها في خزان بودرة يتعرض لحرارة (١٥٠) درجة مئوية (± ٢٥) للحفاظ على جفافها.
- ٥- يجب تجفيف البودرة المتبقية في خزان البودرة بعد انتهاء عملية اللحم عند الدرجة (150) درجة مئوية (± 25) قبل إعادة تخزينها [19].

٢.٩.٣ التجفيف:

يمكن استخدام البودرة مباشرة دون إعادة تجفيف إذا تم تخزينها ومعالجتها وفق الشروط المذكورة أعلاه، أما إذا التقطت البودرة الرطوبة فيجب تجفيفها على النحو التالي :

البودرة المتكتلة: تجفف عند الدرجة ((٣٠٠ \pm ٢٥)) درجة مئوية لمدة ٢-٤ ساعات.

البودرة المنصهرة: عند الدرجة ((٢٠٠ \pm ٥٠)) درجة مئوية لمدة ٢٤ ساعة.

يجب أن تتم عملية إعادة التجفيف إما في المعدات التي تحوي البودرة والتي تسمح للرطوبة أن تتبخر بسهولة أو في الفرن بحيث توضع البودرة في الفرن على ألا يتجاوز ارتفاعها (5 cm).

لا تستخدم البودرة المعاد تجفيفها على الفور بل يجب حفظها بدرجة حرارة $(150 \pm 25)^\circ\text{C}$ ولمدة تتراوح من ٢ إلى ٤ ساعات قبل الاستخدام [19].

الفصل الثالث

الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة

يتناول هذا الفصل دراسة الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة وتأثيره على عملية التشقق على البارد، كما يتناول مصادر وسلوك الهيدروجين في الوصلة الملحومة.

٣.١ مقدمة:

تعرف الآثار الضارة للهيدروجين في الفولاذ باسم قصفة الفولاذ نتيجة وجود الهيدروجين (Hydrogen embrittlement in steel) [10].

تعد قصفة الفولاذ الناتج عن وجود الهيدروجين قضية بالغة الأهمية فيما يتعلق بالسلامة الهيكلية للفولاذ، ويعتبر التشقق على البارد ((hydrogen assisted cracking (HAC)) في الوصلات الملحومة أحد مظاهر هذه القصفة.

حاز التشقق على البارد (HAC) اهتماماً كبيراً في الدراسات والأبحاث نظراً لانتشاره الكبير في الوصلات الملحومة، ولكن بغض النظر عن الدراسات والأبحاث واسعة النطاق فهو لا يزال يدرس بشكل منتظم من قبل المصنعين والشركات وخاصة عند لحام الفولاذ الإنشائي.

لا يقتصر حدوث التشقق على البارد (HAC) على اللحامات فقط، وإنما يحدث أيضاً في الفولاذ أثناء التصنيع أو أثناء الخدمة، لذلك تتحمل الشركات المصنعة مسؤوليات كبيرة لوضع الضمانات المناسبة في إجراءات اللحام لمنع تشكل الـ (HAC)، وتهدف الجهات المصنعة إلى السيطرة على محتوى الهيدروجين ومتانة الفولاذ تبعاً لتكوين الفولاذ.

تطبق عدة طرق للسيطرة على محتوى الهيدروجين في الوصلة والمحافظة على متانة الفولاذ أبرزها التسخين المسبق والتحكم بدرجة حرارة التسخين، تتطلب معرفة درجة حرارة التسخين الأمانة معرفة محتوى الهيدروجين في الوصلات الملحومة، ويتم عادةً تصنيف المواد المستخدمة في اللحام على أساس محتواها من الهيدروجين [10].

٣.٢ التشققات على البارد في الوصلات الملحومة:

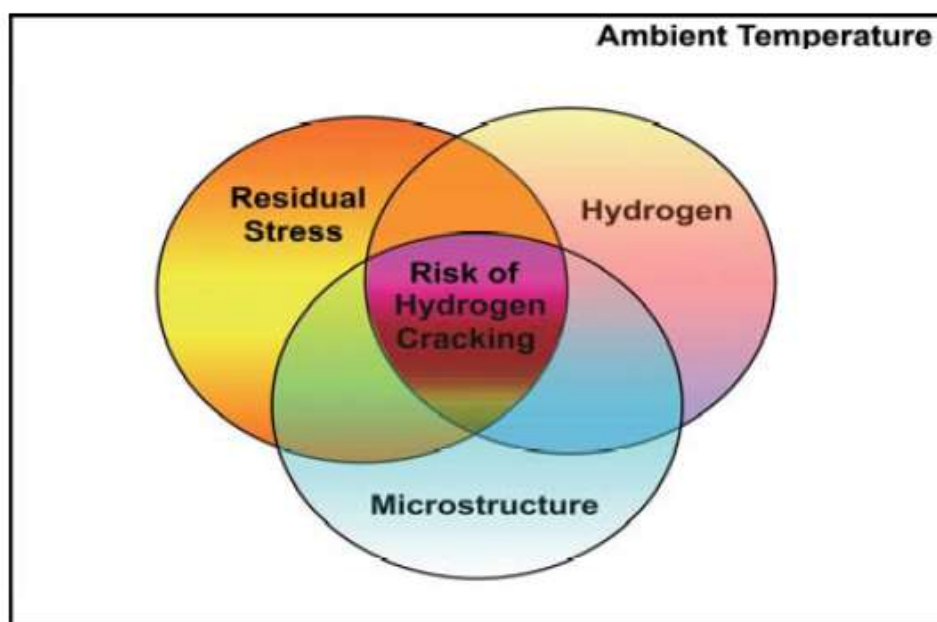
تحدث التشققات على البارد بعد انتهاء اللحام وانخفاض درجة حرارة الوصلة إلى درجة حرارة الوسط المحيط (درجة حرارة الغرفة) وقد يتأخر ظهورها إلى عدة ساعات أو أيام بعد تنفيذ اللحام، ولذلك تدعى بالتشققات المتأخرة وكذلك تدعى بالتشققات الهيدروجينية في إشارة لدور الهيدروجين الأساسي في نشوئها، ويمكن لهذه التشققات أن تصيب منطقة المعدن المصهور أو المنطقة المتأثرة حرارياً.

تظهر التشققات في المنطقة المتأثرة حرارياً بين الحبيبات الكبيرة أو الخشنة وتتوسع عبر حدود الحبيبات كما في أنواع الفولاذ مرتفع الكربون والفولاذ منخفض الخلائطية، أو عبر الحبيبات كما في أنواع الفولاذ المنغنيزي وقد يكون توسعها مزيجاً من الحالتين.

يعد التشقق على البارد (HAC) أو التشقق المتأخر أحد أكثر المشاكل التي تواجه لحام الفولاذ، ومن المعروف أنه يساهم في خفض الخواص الميكانيكية مثل اللدونة والمتانة في الوصلات الملحومة.

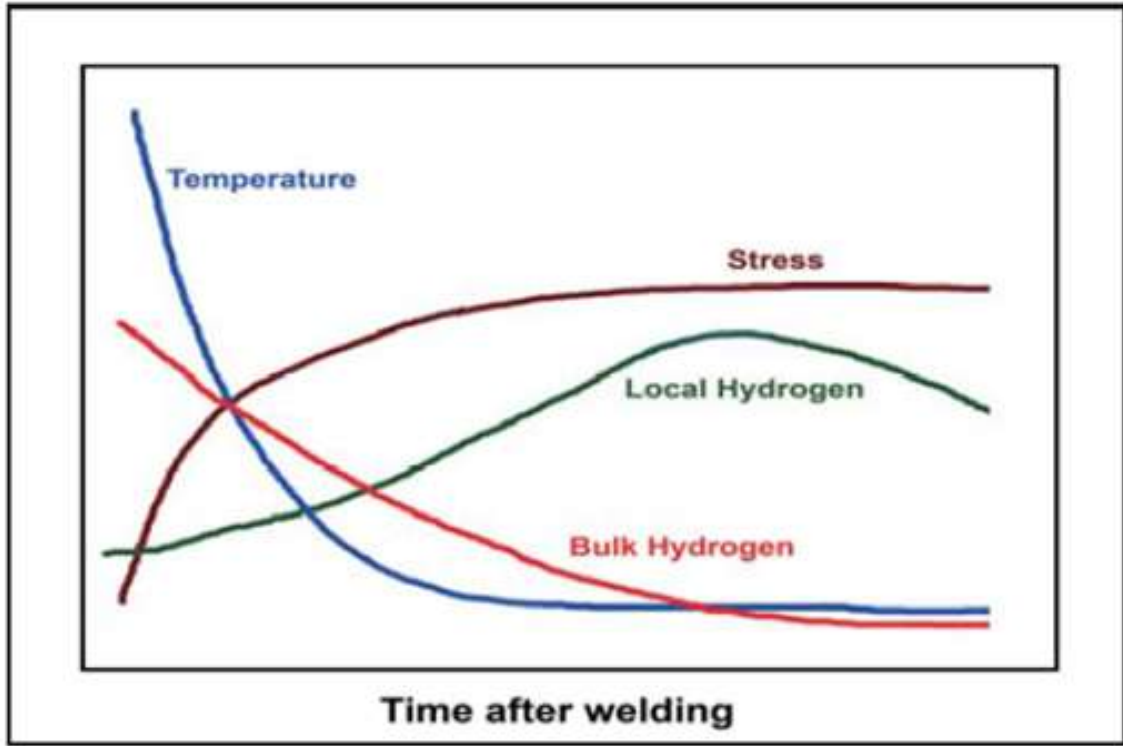
٣.٢.١ آلية تشكل التشقق على البارد (HAC) في اللحامات:

تتشكل التشققات على البارد نتيجة وجود وتضافر ثلاثة عوامل حرجة كما هو موضح بالشكل (3-1) وهي البنية الميتالورجية الحساسة والهيدروجين واجهادات الشد المتبقية حيث ينتشر الهيدروجين باتجاه المناطق القصيفة الأكثر إجهاداً ضمن الوصلة الملحومة.



الشكل (3-1) العوامل المؤثرة على التشقق على البارد [13][10]

تزداد إمكانية حدوث الـ (HAC) مع زيادة مستويات الهيدروجين وزيادة الضغط الناتج عن إجهادات الشد المتبقية خلال عملية التبريد، ويصبح التشقق أكثر انتشاراً مع اقتراب درجة حرارة التبريد من درجة حرارة الغرفة كما هو مبين بالشكل (3-2).



الشكل (2-3) درجة الحرارة والمستوى المحلي للهيدروجين والضغط أثناء التبريد [11]

٣.٢.١.١ البنية الميتالورجية الحساسة:

إن البنية الأكثر حساسية أو قابلية للتشقق على البارد هي البنية ذات الطبيعة البيانيتية أو المارتنسييتية التي تتصف بالقصافة والصلادة العالية، ويتطلب ظهور هذه البنية أن تكون قابلية تصليد الفولاذ كبيرة، وأن يكون معدل التبريد مرتفعاً، وعند لحام قطع من الفولاذ المنغيزي أو الفولاذ منخفض الخلائطية مثلاً فإنه يوجد تنوع واسع من البنى التي تظهر في المنطقة المتأثرة حرارياً ويتوقف ذلك على التركيب الكيميائي للمعدن الأساس وعلى معدل التبريد [12].

أ - التركيب الكيميائي:

تعتمد قابلية التصليد على محتوى الكربون، ولما كان معدن الملى يحوي الكربون بنسبة أقل من المعدن الأساس فإن احتمال تشكل البنية الحساسة للتشققات على البارد يكون كبيراً في المنطقة المتأثرة حرارياً، تتعرض المنطقة المتأثرة حرارياً خلال اللحام لدرجات حرارة عالية قريبة من درجة حرارة الانصهار وتكون بنيتها أوستنيتية لا تلبث أن تتحول إلى بيانيت أو مارتنسييت بفعل التبريد السريع وقد تتشكل حبيبات خشنة إذا ما كانت دجة الحرارة عالية بشكل كافٍ مما يجعل هذه المنطقة أكثر قابلية للتصليد وأقل مطيلية أو أقل قابلية للسحب مقارنة مع المناطق البعيدة عن حدود الانصهار، لذا يكون خطر التشققات الهيدروجينية أعظماً في المنطقة المتأثرة حرارياً.

من جهة أخرى فإن العديد من العناصر السبائكية ذات تأثيرات متفاوتة على زيادة قابلية الفولاذ للتصلد والتشقق ويقدر تأثير هذه العناصر كنسبة من تأثير الكربون وذلك باستخدام تعبير المكافئ الكربوني الذي يمكن تمثيله في العديد من العلاقات والعلاقة (3-1) أحدها [12]:

$$CE = C\%$$

نلاحظ من العلاقة السابقة أن زيادة نسبة العناصر الخلائطية تزيد قيمة المكافئ الكربوني، وبالتالي تكون قابلية الفولاذ للتصلد والتشقق كبيرة وتظهر البنية ذات الطبيعة المارتنسيكية حتى عندما يكون معدل التبريد منخفضاً. وكقاعدة عامة ينصح باستخدام أسلاك لحام منخفضة الكربون عندما تبلغ قيمة المكافئ الكربوني ٠.٤١ % و/أو ثخانة المشغولة (30mm).

ب- معدل التبريد:

تتأثر درجة صلادة المنطقة المتأثرة حرارياً ضمن وصلة ملحومة لأحد أنواع الفولاذ بمعدل التبريد، وتصبح أكثر صلادة وأكثر قابلية للتشقق كلما ارتفع معدل تبريدها والذي يستدل عليه غالباً بقياس الزمن اللازم لإنخفاض درجة الحرارة من ٨٠٠ إلى ٥٠٠ درجة مئوية.

تسهم مجموعة من العوامل في ارتفاع معدل التبريد أبرزها انخفاض درجة الحرارة البدائية للقطع المراد لحامها كون ازدياد ثخانتها أو ازدياد الثخانة الإجمالية (مجموع ثخانة المواد المتلاقية عند خط الوصلة) وهو ما يفسر كون معدل التبريد في حالة وصلة زاوية أكبر منه في حالة وصلة تناكبية بالرغم من أن ثخانة الصفائح الملحومة في الحالتين متساوية.

تجدر الإشارة إلى أن مستوى القساوة الحرج الذي يوافق ظهور التشققات ليس ثابتاً بل يتبع محتوى الهيدروجين في الدرزة، فعلى سبيل المثال بالنسبة لأنواع الفولاذ الإنشائي تعتبر أي منطقة خطيرة عندما تصل قساوتها إلى (350HV) إذا كان محتوى الهيدروجين مرتفعاً، بينما يمكن السماح بقساوة تصل قيمتها إلى (450HV) عندما يكون محتوى الهيدروجين منخفضاً [12].

3.2.1.2 تأثير الهيدروجين على الـ (HAC):

تستخدم تقانة اللحام بالقوس المغمور في لحام الفولاذ عالي المتانة حيث تكون درجة حرارة القوس خلال اللحام عالية جداً ويتم استخدام البودرة في اللحام لمنع المعدن المنصهر من الأكسدة أثناء اللحام.

تحتوي البودرة العديد من المكونات التي يمكنها كيميائياً أن تجذب الماء أو تحوي الماء في تركيبها وينتج عن عملية فصل الماء أثناء اللحام الهيدروجين، حيث يزداد انحلال الهيدروجين في الفولاذ مع ارتفاع درجات الحرارة وتتركز كميات كبيرة من الهيدروجين المذاب في معدن اللحام المنصهر، تنخفض قابلية انحلال الهيدروجين أثناء تبريد معدن اللحام المنصهر ويحاول الخروج، إلا أن التبريد السريع لا يتيح الوقت

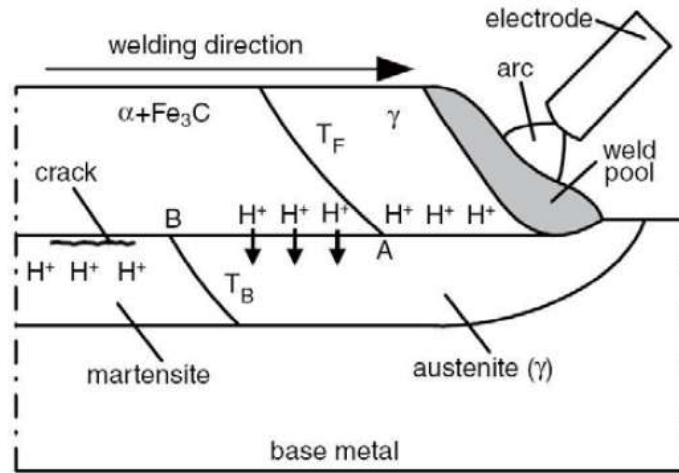
الكافي للهيدروجين المذاب للخروج من معدن اللحام لذا يبقى الهيدروجين محتجزاً داخل الوصلة الملحومة، يميل الهيدروجين المحتجز للخروج والانتشار خارج الوصلة الملحومة.

يؤدي تواجد كمية ضئيلة من الهيدروجين ضمن الوصلة الملحومة لإحدى خلائط الفولاذ إلى انخفاض مقاومتها للتشققات عند تعرضها للإجهاد.

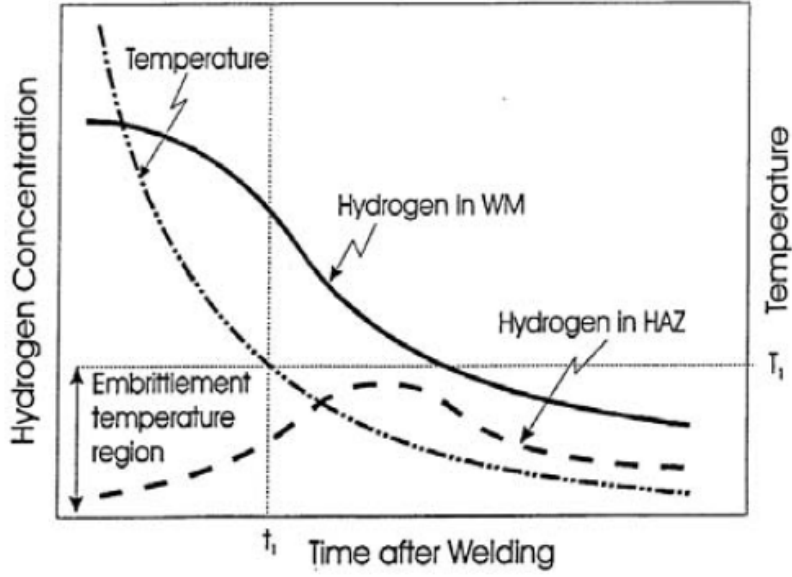
يظهر الشكل (3-3) الهيدروجين المنتشر ضمن الوصلة الملحومة وأنواع البنى المتشكلة أثناء تقدم اللحام ضمن منطقة المعدن المصهور وضمن المنطقة المتأثرة بالحرارة، كما يبين الشكل (3-4) اختلاف محتوى الهيدروجين في الدرزة الملحومة أو في المنطقة المتأثرة حرارياً بعد مضي زمن على انتهاء عملية اللحام حيث يوجد حالتين للهيدروجين المنتشر والذبيوثثر على مكان ظهور الشق [12]:

أ- الحالة الأولى: معدن الدرزة أطرى من المعدن الأساس، وهي الحالة الأكثر شيوعاً حيث تكون نسبة الكربون في منطقة المعدن المصهور أقل منها في المعدن الأساس، ويُلاحظ أثناء تجمد معدن الدرزة المنصهر في هذه الحالة أن الهيدروجين ينتشر من منطقة الدرزة ذات البنية (α) المشبعة بالهيدروجين باتجاه المنطقة المتأثرة حرارياً ذات البنية الأوستنيتية، ومع استمرار التبريد تتحول بنية المعدن في المنطقة المتأثرة حرارياً إلى البنية المارتنيتية ولا تملك ذرات الهيدروجين الوقت الكافي للهروب فتبقى محتجزة فيها مسببة ضغطاً داخلياً شديداً مما يولد تشققات ضمن هذه المنطقة [12].

ب- الحالة الثانية: معدن الدرزة أفسى من المعدن في المنطقة المتأثرة حرارياً، في هذه الحالة لا يوجد ما يدفع الهيدروجين للهجرة من معدن الدرزة إلى المنطقة المتأثرة حرارياً، فيبقى الهيدروجين محتجزاً ضمن البنية المارتنيتية لمعدن الدرزة وتظهر التشققات فيها.



الشكل (3-3) الهيدروجين المنتشر ضمن الوصلة الملحومة (حالة معدن الدرزة أطرى من المعدن الأساس) [13][10]



الشكل (3-4) اختلاف محتوى الهيدروجين في معدن اللحام (WM) والمنطقة المتضررة حرارياً (HAZ) بعد اللحام [10].

3.2.1.3 إجهادات الشد في الوصلات الملحومة:

لا يظهر أي نوع من التشققات في حال غياب الإجهادات، ولكن مع ازدياد الإجهادات المؤثرة يمكن أن تظهر التشققات إذا كانت لدونة (مطيلية) المادة التي تعرضت للتصلد غير كافية لتتلاءم مع الإنفعالات الناتجة، تعد الإجهادات المتبقية بنوعها المباشرة وغير المباشرة بالإضافة إلى الإجهادات الناتجة عن الحمولات الخارجية أهم العوامل الواجب أخذها بعين الاعتبار لدى دراسة التشققات على البارد.

من الملاحظ أن التشققات تظهر مباشرة بعد حدوث التحول المارتنسي في عندما يكون مقدار الهيدروجين المنحل في حوض الانصهار كبيراً وفي هذه الحالة فإن الإجهادات المتبقية المباشرة كافية وحدها لحدوث ذلك. أما عندما يكون مقدار الهيدروجين المنحل في حوض الانصهار ضئيلاً تُصبح كمية الهيدروجين المنتشرة باتجاه المنطقة المتأثرة حرارياً في لحظة التحول المارتنسي غير كافية لتحريض الهشاشة التي تقود لنشوء التشقق، وفي هذه الحالة تحدث التشققات في الساعات التي تلي عملية اللحام وغالباً بعد أن تكون الوصلة قد بردت تماماً، ويتطلب نشؤها مستوى أعلى من الإجهادات بنوعها المتبقية والخارجية.

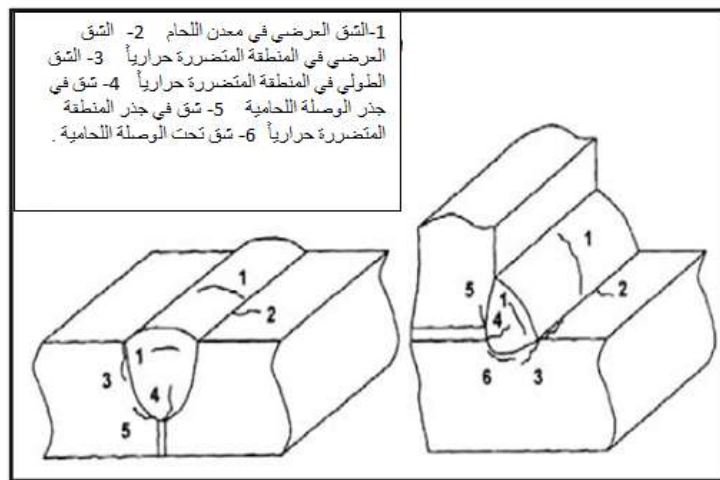
يسهم وجود حزوز أو تغيرات حادة في المقطع ضمن الوصلة الملحومة في ظهور مناطق لتركيز الإجهادات وهي في الغالب مواقع ملائمة لنشوء التشققات، التمدد والإنكماش الحراري خلال عملية اللحام يؤديان إلى إجهادات شد متبقية في الوصلة فيتركز الضغط في جذور اللحام وكذلك في الشقوق التي شكلتها الشوائب وعيوب اللحام الأخرى، وتستكمل الضغوط المحلية بأي ضغط خارجي يطبق بعد اللحام.

يزداد التشقق على البارد مع تناقص معدل الإجهاد، حيث ينقص معدل الإجهاد خلال المراحل النهائية للتبريد بينما يزداد التشقق على البارد خلال المراحل النهائية للتبريد.

يتضح مما سبق أن تشكل التشقق على البارد في اللحامات قد يستغرق وقتاً يتراوح من عدة ساعات إلى عدة أيام ليظهر ويتوافق ذلك بوجود كمية كافية من الهيدروجين وإجهادات شد متبقية ضمن الوصلة بالإضافة إلى البنية الميتالورجية الحساسة، ومع ذلك لا توجد آلية تفسر بشكل واضح هذه التشققات ولا تزال هناك خلافات واسعة بشأن ذلك، ويمكن أن تلخص الأسباب المؤدية إلى تشكل التشققات الهيدروجينية بمايلي:

- ١- رطوبة الجو المحيط بقوس اللحام والتي تساهم في إنتاج جزيئات وذرات وايونات الهيدروجين، والتي تتحلل في بركة اللحام.
- ٢- تصبح الوصلة مشبعة بالهيدروجين أثناء التبريد وتجمد (تصلب) المعدن.
- ٣- يميل الهيدروجين الموجود في معدن اللحام للهجرة إلى المنطقة المتأثرة حرارياً، فإذا كانت هذه المنطقة أوستنيتية البنية فإن الهيدروجين ينتشر إليها من معدن اللحام عبر خط الانصهار لأن الهيدروجين ينحل بشكل أكبر في البنية الأوستنيتية أما إذا كان معدن اللحام أوستنيتياً فإن الهيدروجين يبقى في الوصلة ولا يغادر إلى المنطقة المتأثرة حرارياً.
- ٤- يتحول الأوستنيت أثناء التبريد السريع إلى مارتنيسيت أو بيانيت، وبالتالي يبقى الهيدروجين المذاب بالأوستنيت ضمن المارتنيسيت أو البيانيت ويحافظ على طاقته العالية.
- ٥- يسعى الهيدروجين ذو الطاقة العالية لتشكيل عيوب وثغرات في الوصلة عند انتشاره وتراكمه، تسمى الفجوات التي يتراكم فيها الهيدروجين بـ (traps).
- ٦- تساعد كل من إجهادات الشد المتبقية في اللحامات الناتجة عن التغير بالحجم والقوى والأفعال الخارجية المطبقة على توسيع الثغور وإحداث التشققات ضمن الوصلة، ويسرع الهيدروجين المتراكم عملية التشقق لأنه يخفض تماسك الشبكة المعدنية مما يؤدي إلى تشكيل تصدعات تنمو وتزداد باستمرار.
- ٧- ينمو الشق أو التصدع بعيداً عن نقطة تركيز الهيدروجين وبعدها ينتشر الهيدروجين مجدداً ضمن منطقة نمو الشق لتحدث تشققات وتصدعات جديدة تنمو من جديد.

يبين الشكل (3-5) النماذج الواقعية للتشققات في الوصلات اللحامية:



الشكل (3-5) النماذج الواقعية للتشققات على البارد [10] [11].

لقد تبين أن الهيدروجين هو أحد العوامل الثلاثة الأساسية المسؤولة عن ظهور التشققات على البارد لذا من الضروري إزالة أو تقليل دخول الهيدروجين إلى اللحام، علماً أنه ليس كل الهيدروجين الذي يدخل إلى الوصلة الملحومة ينتشر، فتنبعاً لدرجة الحرارة هناك جزء من الهيدروجين يمتص ويبقى محتجزاً داخل الفجوات (traps) ولا ينتشر ابداً يعرف بالهيدروجين المتبقي، يختلف محتوى الهيدروجين المتبقي مع كثافة الفجوات التي ترتبط بدرجة الحرارة، ولكن الأهم أن الهيدروجين المتبقي لا يساهم في تشكل التشقق على البارد ويسمى أيضاً الهيدروجين اللال انتشاري.

أما الجزء الآخر من الهيدروجين الممتص والذي يعد المسؤول عن تشكل التشقق على البارد (HAC) يسمى بالهيدروجين المنتشر (H_D).

٣.٣ مصادر الهيدروجين أثناء اللحام:

من المعروف أن البودرة المستخدمة في عمليات لحام القوس المغمور تساهم في إدخال الهيدروجين إلى الوصلة الملحومة، إلا أن هذه مصادر تختلف من عملية إلى أخرى ويمكن تصنيف مصادر الهيدروجين إلى فئتين أساسيتين هما:

مصادر الهيدروجين الرئيسية (majorsources) ومصادر ثانوية (minorsources) وقد تم اعتماد هذا التصنيف استناداً إلى كمية الهيدروجين المساهمة في محتوى الهيدروجين الكلي الموجود في معدن اللحام [10].

٣.٣.١ المصادر الرئيسية:

المصدر الرئيسي للهيدروجين في اللحام هو رطوبة البودرة، حيث تعد رطوبة بودرة اللحام المصدر الرئيسي للهيدروجين في لحام القوس المغمور، أما في لحامات (GTAW and GMAW) فمصدر الهيدروجين هو غازات الحماية (shielding gas).

يعتمد محتوى الرطوبة في بودرة اللحام على محتوى الرطوبة الفردية للمواد المستخدمة في صناعتها كما هو موضح في الجدول (3-1).

٣.٣.٢ المصادر الثانوية للهيدروجين:

تتمثل المصادر الثانوية للهيدروجين في اللحام بالأكاسيد والملوثات الهيدروكربونية كالنفط والدهان والشحوم وغيرها من الملوثات المتبقية على سطح المعدن الأساس نتيجة عدم تنظيف سطح المعدن قبل اللحام.

يمكن التقليل من الهيدروجين الناتج عن هذه المصادر من خلال التسخين الأولي للبودرة بين درجتي حرارة (١٠٠-٣٥٠) درجة مئوية والتنظيف الجيد للمعدن المراد لحامه بإزالة الشحوم والزيوت وطبقات الدهان.

الجدول (3-1) محتوى الرطوبة في بعض المواد المستهلكة والمستخدم في صناعة مواد اللحام [10]:

Material	Moisture (%)	Material	Moisture (%)
Coarse limestone	0.09	Silica Sand	0.04
Fine limestone	0.09	Fine silica	0.12
Whiting	0.16	Rutile	0.01
Calcite	0.17	Fine rutile	0.02
Dolemite	0.18	Anatase	0.18
Feldspar	0.44	Fluorspar	0.09
Coarse feldspar	2.26	Coarse fluorspar	0.09
Fine feldspar	0.54	Bentonite	2.16
Mica	3.77	Albion clay	4.65
Fine mica	3.34	China clay	2.64

٣.٤ سلوك الهيدروجين في الوصلات الملحومة:

إن الهيدروجين المنتشر من معدن اللحام إلى المنطقة المتأثرة حرارياً وتشكل التصدعات وتطورها إلى شقوق يعتمد على كمية الهيدروجين التي يمتصها قوس اللحام من الجو وانحلال الهيدروجين في البنية البلورية وعلى كمية الهيدروجين المنتشر ضمن المعدن.

٣.٤.١ انحلال الهيدروجين في الوصلات الملحومة:

يُمتص الهيدروجين خلال اللحام من الغلاف الجوي المحيط بقوس اللحام، وبشكل عام يوصف انحلال الغازات ثنائية الذرة في المعدن السائل وفق قانون سيفرت، ومع ذلك اقترح Gedeon وباحثون آخرون نموذج مختلف لذوبان الهيدروجين في الفولاذ أثناء اللحام.

وتتمثل النماذج المقترحة التي تنطبق على موضوع انحلال الهيدروجين بمايلي:

أولاً: تطبيق قانون سيفرت في التنبؤ بانحلال الهيدروجين في الوصلات الملحومة:

يتناسب الهيدروجين في الفولاذ السائل مع الجذر التربيعي للضغط الجزئي للغاز ثنائي الذرة وذلك في شروط نظام مغلق ومعزول وتوازن تركيز غاز الهيدروجين في المعدن المصهور [10]:

$$H_2(g) = 2 [H]$$

والمعادلة المقابلة لتوازن تركيز الهيدروجين في الفولاذ:

$$[H] = K_S \sqrt{P_{H_2}}$$

حيث :

[H]: تركيز التوازن للهيدروجين المذاب في المعدن المصهور.

P_{H_2} : الضغط الجزئي للهيدروجين.

ΔG_0 : الطاقة الحرة القياسية الناتجة من انحلال الهيدروجين في الفولاذ.

K_S : ثابت التوازن للتفاعل، وهو يتغير أسياً مع انخفاض درجات الحرارة.

R: ثابت الغازات العام.

T: درجة حرارة الوصلة الملحومة.

يعتبر قانون Sievert's جيد لحساب انحلال الهيدروجين ثنائي الذرة، ويمكن استخدام المعادلة (3-3) لحساب حد انحلال H_2 في الوصلات الملحومة المنصهرة.

أظهر التحليل الدقيق للبيانات التجريبية أن قانون سيفرت غير كافٍ لشرح انحلال الهيدروجين في المعدن الصلب خلال عملية اللحام، وذلك لأنه لا يأخذ بعين الاعتبار انحلال الهيدروجين أحادي الذرة وتأمين الهيدروجين في قوس اللحام.

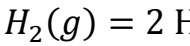
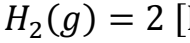
وقد تبين أن ذوبان الغاز ثنائي الذرة في المعدن السائل خلال عمليات اللحام أعلى بكثير من المستوى الذي يتنبأ به قانون Sievert's.

تساعد الحسابات استناداً إلى قانون Sievert's في معرفة درجة حرارة التفاعل. درجة الحرارة على سطح بركة اللحام خلال امتصاص الهيدروجين هي أعلى بكثير من (٢٥٠٠) درجة مئوية.

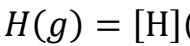
ثانياً: نموذج الذوبان لـ Gedeon:

يستخدم نموذج Gedeon لدراسة تأثير القوس الكهربائي على انحلال الهيدروجين وتفكك الهيدروجين ثنائي الذرة إلى هيدروجين أحادي الذرة وانحلال الهيدروجين في الوصلة الملحومة ويستند هذا النموذج إلى افتراضين [10]:

- درجة حرارة القوس كافية لتسبب تفكك H_2 إلى H .
 - امتصاص الهيدروجين H من قبل المعدن السائل.
- ردود فعل التوازن لانحلال الهيدروجين هي:



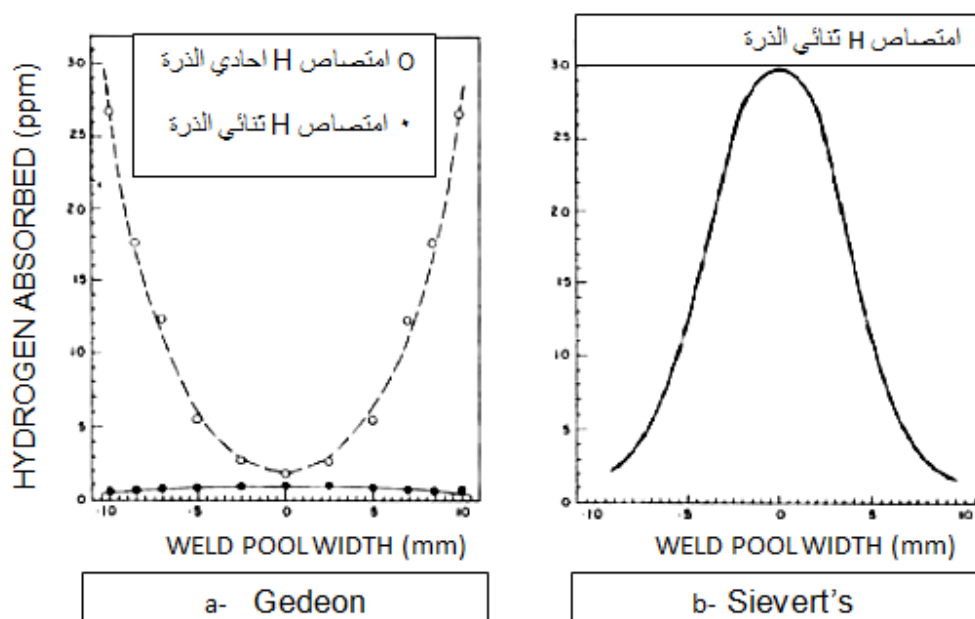
حل المعادلتين (3-2) و (3-4) يعطي الهيدروجين الأحادي:



التغير في الطاقة الحرة المرتبطة برد الفعل في المعادلة (3-5) هو:

$$\Delta G = -44.7$$

يختلف انحلال الهيدروجين أحادي الذرة عن انحلال الهيدروجين ثنائي الذرة، وتبين المعادلة (3-6) بوضوح أن الطاقة الحرة تزداد مع زيادة درجة الحرارة، وبالتالي فإن ذوبان الهيدروجين سوف يقل مع زيادة درجة الحرارة في بركة الانصهار، وهذا يعني أن غالبية الهيدروجين أحادي الذرة يتم امتصاصه من حواف خط الانصهار الأقل حرارة من بركة الانصهار كما هو مبين بالشكل (3-6-a)، وهذا ما يناقض تنبؤات قانون Sievert's الذي يفترض أن امتصاص الهيدروجين يكون في الحد الأقصى في المنطقة الأكثر ارتفاعاً بالحرارة أي في بركة الانصهار كما يبين الشكل (3-6-b).



الشكل (3-6) امتصاص الهيدروجين في الوصلة الملحومة [10][13]

ثالثاً : محتوى الهيدروجين في اللحام:

يمكن التنبؤ بتركيز الهيدروجين في الحالة المستقرة في بركة اللحام المنصهر باستخدام نموذج Hooijmans، يفترض هذا النموذج أن تركيز الهيدروجين في الوصلة الملحومة في أي لحظة من الزمن يعتمد على معدل تدفق الهيدروجين.

يرتبط معدل التدفق بطرف القوس مثل تركيز الهيدروجين في القوس ودرجة حرارة القوس، حيث يتناسب معدل التدفق مع تركيز الهيدروجين في بركة اللحام وبناءً على ذلك فإن تغيير تركيز الهيدروجين في الوصلة يعتمد على الزمن وفق المعادلة التالية [10]:

$$\frac{dH}{dt} = W \left(\frac{dC}{dt} \right)$$

αA : الهيدروجين الممتص في الوصلة الملحومة عبر السطح الخارجي للوصلة.

βBC : الهيدروجين الهارب عن سطح بركة اللحام.

$R_m C_0$: تدفق الهيدروجين الناتج عن ذوبان مواد اللحام.

$\eta R_m C$: معدلات تدفق الهيدروجين الناتجة عن تصلب الوصلة.

H: مقدار الهيدروجين في المعدن السائل (g).

t: الزمن (s).

W: وزن المعدن السائل في الوصلة الملحومة (g).

C: تركيز الهيدروجين في المعدن السائل (wt%).

α : معامل الامتصاص (كمية الهيدروجين الداخلة في الوصلة الملحومة لوحدة مساحة خلال وحدة الزمن $(\frac{g}{m^2s})$).

A: منطقة الوصل بين القوس والمعدن السائل (m^2).

β : عامل التناسب تبعاً لدرجة حرارة الوصلة $(\frac{g}{m^2s})$.

B: مساحة منطقة التماس (التفاعل) بين الوصلة الملحومة وغازات الجو المحط (m^2).

R_m : معدل الذوبان (كمية المعدن الذي يذوب في وحدة الزمن $(\frac{g}{s})$ يكون مساوياً لمعدل التصلب (كمية المعدن الذي يتصلب في وحدة الزمن)).

$$R_m = VS\rho$$

v: سرعة تقدم اللحام $(\frac{m}{s})$.

S: مساحة المقطع العرضي للحام (m^2).

ρ : كثافة المواد $(\frac{g}{m^3})$.

C_0 : تركيز الهيدروجين الأصلي في المواد (wt%).

η : ثابت يمثل جزء من الهيدروجين المجمد أثناء التصلب.

إن حل المعادلة (3-7) يوصلنا إلى المعادلة (3-9) [10]:

$$C(t) = \left(\frac{\alpha A}{\beta B} \right)$$

بعد اللحام لفترة طويلة بما فيه الكفاية يسعى الحد $\exp\left(-\frac{(\beta B + \eta R_m)}{W} t\right)$ إلى الصفر وبالتالي فإن تركيز الهيدروجين المستقر (C_e) تصبح كما يلي:

$$C_e = \left(\frac{\alpha A + \beta B + \dots}{\beta B + \dots} \right)$$

باستبدال $R_m = vsp$ ، و $\eta = 1$ (لا يوجد فقاعة غازية) ، $C_0 = 0$ تصبح المعادلة (10-3) كما يلي:

$$C_e = \left(\frac{\alpha A}{\beta B + \dots} \right)$$

٣.٤.٢ الهيدروجين المنتشر في الوصلة الملحومة:

يميل الهيدروجين المحتبس في معدن اللحام للإنتشار في المنطقة المتأثرة حرارياً (HAZ) أو في الوصلة الملحومة، ويمكن وصف الهيدروجين المنتشر في معدن اللحام عند وجود عيوب شبكية (lattice defects) وفق معادلة الإنتشار التالية:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C$$

C: تركيز الهيدروجين المنتشر في الفولاذ.

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$
 عامل لابلاس ويساوي

D: الهيدروجين المنتشر في البنية الشبكية (Lattice diffusivity of hydrogen) [10].

يعيق الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة احتباسه في الفجوات (traps)، ويوجد عدد من العوامل التي تؤثر على انتشاره في البنية الشبكية، وقد صنف الباحثون هذه العوامل إلى ثلاثة أنواع وهي:

- التأثيرات الداخلية المحتبسة (trapping effects).
- التأثيرات السطحية (surface effects).
- تأثيرات الحالة السائلة (liquid state effects).

٣.٤.٣ الهيدروجين المحتبس في الوصلات الملحومة:

تشكل الفجوات الموجودة في البنية الدقيقة عائقاً أمام الهيدروجين المنتشر وتكون طاقة التنشيط اللازمة للتغلب على هذا العائق أعلى بكثير من طاقة التنشيط الموجودة في البنية الشبكية، ويعتمد ذلك على نوع الهيدروجين (منتشر، غير منتشر) المذاب في الوصلة [10].

ففي حالة الهيدروجين الغير منتشر تكون الطاقة اللازمة لخروج الهيدروجين المحتبس كبيرة ($\Delta E_B \geq 50 \text{ kJ/mol}$)، وبالتالي يجب رفع درجة حرارة التسخين (الإحماء) إلى (٦٠٠) درجة مئوية ليخرج الهيدروجين منها ولا يخرج في درجة حرارة أقل، لذلك لا يساهم في عملية التشقق على البارد.

أما في حالة الهيدروجين المحتبس في الفجوات الضعيفة والتي تصنف بالفجوات العكوسة (في دلالة منها على إمكانية التخلي عن الهيدروجين بسهولة) تكون الطاقة اللازمة لخروج الهيدروجين ($\Delta E_B \leq 30 \text{ kJ/mol}$) وبالتالي يمكن للهيدروجين الهروب من الفجوات والانتشار عند درجات حرارة منخفضة (في حدود ٤٥ درجة مئوية)، ويسمى عندئذٍ بالهيدروجين المنتشر (H_D) وهو المسؤول عن عملية التشقق على البارد.

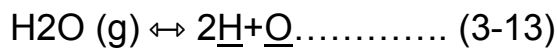
هناك عدة أنواع لفجوات الهيدروجين ويبين الجدول (٢-٣) هذه الأنواع والطاقة اللازمة لتحرير الهيدروجين المقابل لكل نوع ودرجات الحرارة اللازمة:

الجدول (٢-٣) أنواع فجوات الهيدروجين وطاقة الارتباط ودرجة الحرارة اللازمة لتحرير الهيدروجين:

درجة الحرارة اللازمة لتحرير الهيدروجين (°C)	طاقة الارتباط (Binding energy) (KJ/MOL)	فجوات (trap) الهيدروجين
٣٠		فجوات عكوسة جداً وتوجد في: البنية الشبكية الفارغة، الخلع
112 - 270	17 - 36	فجوات ذات وجهين وتوجد في: ذرة (Ti) ذات الموقع التبادلي. حدود الحبيبات، الانخلاعات
305 - 750	37 - 112 129	فجوات غير عكوسة وتوجد في: الفراغات الصغيرة، الشوائب، الجسيمات. مثل: $Fe_2O_3, Fe_3O_4, MnS,$

٣.٥ السيطرة على الهيدروجين المنتشر في المواد الأولية المستخدمة في اللحام:

بشكل عام تتشكل ذرات الهيدروجين عندما تزيد درجة الحرارة أثناء اللحام عن (١٥٠٠) درجة مئوية وذلك وفق التفاعل التالي:



H و O هي تراكيز الهيدروجين والأكسجين في المحلول.

يتضح من المعادلة (3-13) أن الأكسجين الذائب في الفولاذ له تأثير على الهيدروجين المنتشر، ففي الفولاذ المنزوع الأكسجين (deoxidized steel) وعند نفس المحتوى من الرطوبة يكون انحلال الهيدروجين في معدن اللحام أعلى بكثير بالمقارنة مع الفولاذ الحاوي على أكسجين بنسبة عالية.

يكون التفاعل الأساسي كالتالي [10]:



لتوازن التفاعل يستخدم العامل (F) الذي يساعد في التنبؤ بآثار رطوبة الغلاف الجوي على القوس [10]:

$$F = 1 - (P_{\text{H}_2})$$

نجد من المعادلتين السابقتين

أ- $F > 0$ فهذا يعني أن النسبة بين CO/CO_2 عالية أي بزيادة الرطوبة يزداد الضغط الجزئي للهيدروجين والذي من شأنه أن يؤدي إلى زيادة امتصاص الهيدروجين.

ب- $F < 0$ تكون النسبة CO/CO_2 منخفضة وفي هذه الحالة فإن زيادة الرطوبة يقلل من الضغط الجزئي للهيدروجين مما يؤدي إلى انخفاض محتوى الهيدروجين.

ونظراً لارتباط الهيدروجين بعيوب اللحام فقد عملت الشركات المصنعة على تقليل نسبة الهيدروجين في سلك اللحام من خلال استخدام المواد الأولية التي تفتقر إلى الهيدروجين في تركيبها الكيميائي وبهذه الطريقة قللت الشركات من محتوى الرطوبة العالية بشكل نسبي، واستتبع ذلك باستخدام درجات حرارة عالية أثناء تصنيع البودرة لإزالة الرطوبة بشكل جيد، حيث توضع البودرة بعد عملية التصنيع في درجة حرارة تجفيف (١٥٠-٣٧٠) درجة مئوية ، يلغي هذا الإجراء الرطوبة بشكل كامل، ولمنع أي عملية امتصاص للرطوبة من الوسط المحيط يتم تعبئتها في حاويات معدنية مغلقة بإحكام بعد الانتهاء من تعرضها للحرارة مباشرة.

القسم الثاني: الدراسة المخبرية

- ❖ الفصل الرابع: الأجهزة والأدوات المستعملة.
- ❖ الفصل الخامس: تصميم وتصنيع جهاز لقياس رطوبة البودرة (Flux).
- ❖ الفصل السادس: تنفيذ تجارب وتسجيل النتائج.
- ❖ الفصل السابع: مناقشة النتائج والاستنتاجات.

الفصل الرابع

الأجهزة والأدوات المستخدمة

يعرض هذا الفصل الأجهزة والأدوات والتقنيات المستخدمة في التجارب ويحدد مواصفات هذه الآلات وطرق استخدامها وآلية عملها.

٤.١ آلة اللحام:

٤.١.١ آلة اللحام بالقوس المغمور STARMATIC 650 DC:

تعمل الآلة الموضحة بالشكل (4-1) بالتيار المستمر وتتراوح عادة قيمة الجهد بين ١٦ إلى ٤٤ فولط وتكون التيارات المستعملة في هذه الحالات أعلى بكثير من التيارات المستعملة في أساليب لحام القوس الأخرى إذ تصل حتى ٦٥٠ أمبير [14].



الشكل (4-1) آلة اللحام STARMATIC 650 DC

4.1.2 مواصفات آلة اللحام STARMATIC 650 DC:

الجدول (4-1): مواصفات آلة اللحام [14] STARMATIC 650 DC :

النوع	STARMATIC 650 DC/ W 000 315 877
بلد المنشأ	فرنسا
القيمة العظمى للتيار والجهد	650 A -under 44 V
تغير الجهد والتيار	مرتبط
مصدر الطاقة الذي تزود به الآلة	240/400-440 V 50/60 Hz* three-phase
القيمة البدائية للتيار	72 A
الاستطاعة الأعظمية	34.5 Kva
تبريد	AF
وزن الآلة	247 kg

٤.٢ عربة اللحام ولوحة التحكم ووحدة تزويد البودرة:

يتم تثبيت لوحة التحكم ووحدة تزويد البودرة ووحدة تغذية السلك على عربة اللحام الشكل (4-2)، تعمل العربة بشكل نصف آلي حيث يتم إدخال سرعة العربة واتجاهها وسرعة السلك إلى لوحة التحكم قبل بدء عملية اللحام، وتتوقف العربة عند الضغط على زر التوقف الموجود على لوحة التحكم، تستطيع العربة المحافظة على مسار محدد عبر عجالات تعمل كدليل. يمكن بواسطة لوحة التحكم ضبط الإجراءات وتسلسل الحركة من أجل أفضل عمل للقوس المغمور وأفضل ملء لأخدود اللحام. أما وحدة تزويد البودرة فيتم عن طريقها تزويد منطقة اللحام بالبودرة فهي تعتبر خزان البودرة الذي يؤمن البودرة اللازمة لعملية اللحام.



الشكل (2-4) عربة اللحام ولوحة التحكم

٤.٣ خلط بودرة اللحام (Agitator Type PWB):

يستخدم لتحقيق التجانس بين حبيبات البودرة وذلك عندما نريد الحصول على نسبة رطوبة معينة (رطوبة مصطنعة).

توضع البودرة والماء في الخلاط بعد وزنها بشكل دقيق ومن ثم تتم عملية الخلط لتحقيق التجانس بين حبيبات البودرة.

مواصفات الجهاز:

- ١- الشركة المصنعة: George Fisher.
 - ٢- يعمل الخلاط بتيار مستمر أو متناوب.
 - ٣- يُغذى الجهاز بجهد ٢٢٠ فولت.
 - ٤- الاستطاعة: ٦٠ واط.
 - ٥- زمن الخلط:
- أ- إذا كان وزن عينة البودرة بين (٢٠ - ٥٠) غرام يكون زمن الخلط بين (٢ - ٥) دقيقة [16].
- ب- إذا كان وزن عينة البودرة أكبر من (٥٠) غرام يكون زمن الخلط بين (٧ - ١٠) دقيقة.

يوضح الشكل (3-4) الخلاط المستخدم في التجارب [16]:



الشكل (4-3) الخلاط [16]

٤.٤ جهاز التجفيف باستخدام الأشعة تحت الحمراء PIT:

يستخدم لتحديد محتوى الرطوبة في بودرة اللحم من خلال مقارنة وزن العينة قبل وبعد التجفيف وحساب الفاقد في الوزن [17].

مواصفات الجهاز:

- ١- الشركة المصنعة: George Fisher
- ٢- يُغذى الجهاز بجهد ٢٢٠ فولت مستمر أو متناوب.
- ٣- طريقة الاستخدام:

لتحديد محتوى الرطوبة ضمن العينة توزن العينة قبل وبعد التجفيف وتحسب الرطوبة وفق القانون التالي:

$$U \% = \frac{(G_U - G_{Tr})}{G_U} \times 100 \dots \dots \dots (4 - 1)$$

G_U : وزن العينة الرطبة مقدره بالغرام.

G_{Tr} : وزن العينة الجافة مقدره بالغرام.

U: الرطوبة %.

يوجد مع الجهاز وعائي تجفيف ومنخلين كما يوضح الشكل (4-4).



الشكل (4-4)المجفف[17]

يوجد على الطرف الأمامي من اليسار للجهاز مفتاحان لتشغيل المجفف بحيث يمكن تجفيف عينتين بوقت واحد كل مفتاح يتحكم بلمبة أشعة واحدة، كما يوجد مؤقتان زمنيان لضبط عملية التجفيف، بينما توجد على الواجهة الأمامية من الأسفل فجوة كبيرة تتسع لوعائي المجفف.

ولتشغيل الجهاز بشكله الأمثل تؤخذ أوزان محددة من العينات وتتراوح بين (٢٠-٥٠) غرام ويجب أن تكون العينة المدروسة موزعة بانتظام ضمن الوعاء. يتراوح وقت التجفيف بين (٤-٥) دقيقة إذا كانت الرطوبة طبيعية ووزن العينة ٢٠ غرام [17]. أما إذا كان وزن العينة ٥٠ غرام فتحتاج إلى وقت أكبر يتراوح بين (٨-١٠) دقيقة، بعد انتهاء عملية التجفيف تترك العينة حتى تبرد وتحسب الرطوبة بناءً على القانون الموضح بالعلاقة (4-1).

٥.٤ الميزان SARTORIUS:

تم استخدام الميزان المخبري SARTORIUS المبين بالشكل (4-5) لوزن العينات بدقة [18].

مواصفات الميزان:

الشركة المصنعة: SARTORIUS GP5202-OCE ألمانيا.

دقة القراءة: 0.01g5200g X

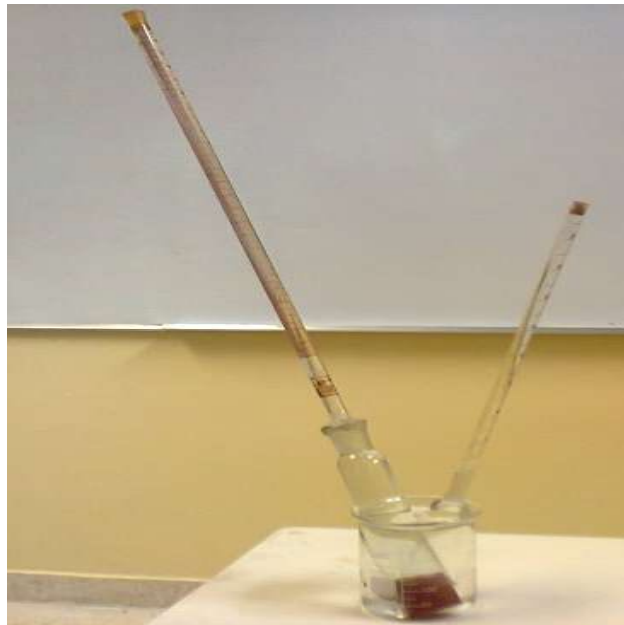
يُغذى الجهاز من خلال: AC/DC ADAPTER: input 100-240V - Output 15 V , 700 mA



الشكل (4-5) الميزان SARTORIUS GP5202-OCE

٤.٦ أنبوب اختباري مدرج: الشكل (4-6)

وهو عبارة عن أنبوب زجاجي مدرج بالملي لتر يستخدم لقياس محتوى الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة.



الشكل (4-6) الأنبوب الاختباري [10].

4-7 جهاز الشد و التلميع:

يتألف الجهاز من وحدتين دوارتين عن طريق محرك كهربائي واحد موصول إليهما حيث يمكن التحكم بسرعة الدوران وتكون هذه السرعة واحدة للقرصين الدوارين. وفي لوحة التحكم يمين الجهاز يوجد ثلاث خانات الأولى للتشغيل والإطفاء والثانية لضخ الماء أو إيقاف الضخ أما الثالثة فهي للتحكم بسرعة دوران القرصين. يتم استبدال أقراص الشد والتلميع بإيقاف الجهاز وإزالة القرص القديم وتركيب القرص الجديد والبدء بالعمل.

بعد تلميع العينات يتم تنميشها باستخدام محلول تنميش مناسب (النيتال5%).



الشكل (4-7) جهاز الشد والتلميع

4-8 المجهر الضوئي OPTICAL MACROSCOP:

النوع: ELVAR

الشركة المصنعة: LEITZ/GERMANY

الرقم التسلسلي: 872818

يستخدم هذا المجهر لدراسة البنية الماكروية macroscopic test للعينات الميتالوغرافية ولعينات الحام ولملاحظة الغلظة و الأسطح المعالجة والعيوب الماكروية.

هذا المجهر مزود بكاميرة تصوير عادية(موديل LEICCA).



الشكل (4-8) المجهر الضوئي

الفصل الخامس

تصميم وتنفيذ جهاز لقياس رطوبة البودرة

لقياس رطوبة بودرة اللحام كان لابد من تصنيع جهاز لهذا الغرض وهو ما يتناوله هذا الفصل.

٥.١ مكونات الجهاز:

يتكون الجهاز من جزئين ميكانيكي والكتروني كما يوضح الشكل (5-1). يتألف الجزء الميكانيكي من اسطوانة مفرغة من الداخل مصنوعة من الألمنيوم، يوجد على طرفيها قطبين نحاسيين معزولين عن الاسطوانة بمادة التفلون، توضع بداخلها بودرة اللحام (Flux) المراد قياس رطوبتها، إضافة إلى حامل للجزء الميكانيكي.

أما الجزء الالكتروني فهو عبارة عن دائرة الكترونية موضوعة ضمن علبة خاصة بها ويوضح الشكل (٥-٢) هذه الدارة.

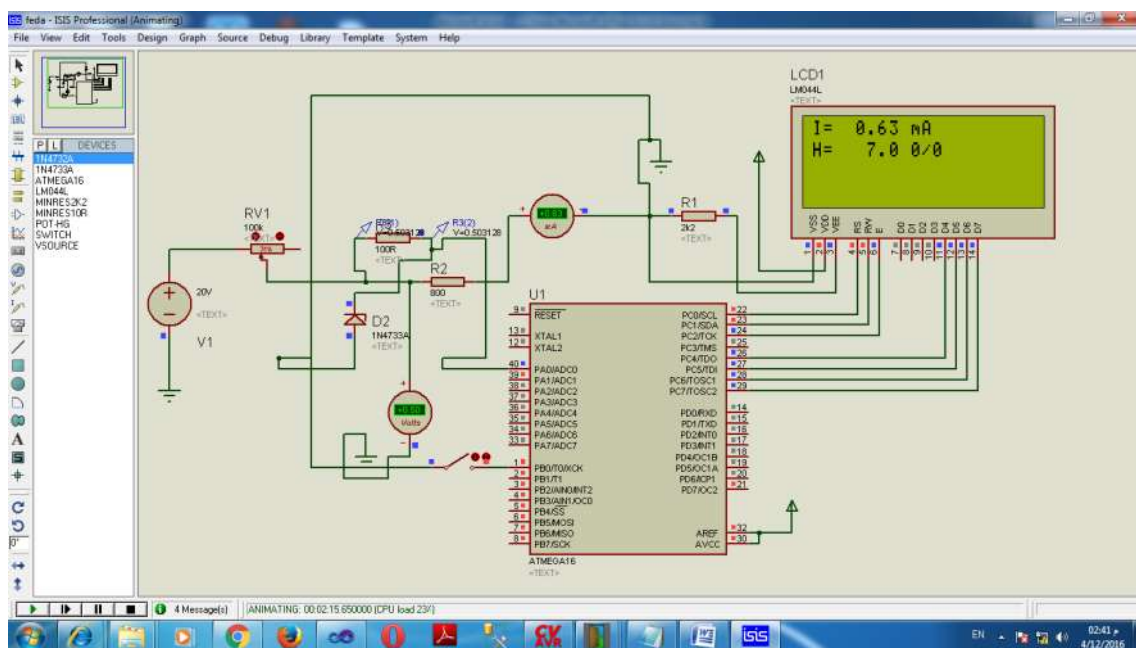
يُغذى الجهاز بجهد ثابت عبر محول طاقة.



الشكل (5-1) جهاز قياس الرطوبة

input = 100-240v AC

output = DC 20v , 1000 mA



الشكل (5-2) رسم توضيحي للدارة الالكترونية

٥.٢ مبدأ عمل الجهاز:

يعتمد مبدأ عمل الجهاز على تغير المقاومة الكهربائية لبودرة اللحام بتغير محتوى الرطوبة فيها، وبالتالي يمكن معرفة محتوى الرطوبة من خلال قياس المقاومة الكهربائية للبودرة، ولهذا الغرض يجب توضيب عينات البودرة بين الكترودين ويطبق عليهما فرق كمون (V) وبقياس شدة التيار المارة بالدارة يمكن حساب المقاومة النوعية (R) للعينة من العلاقة (5-1):

حيث:

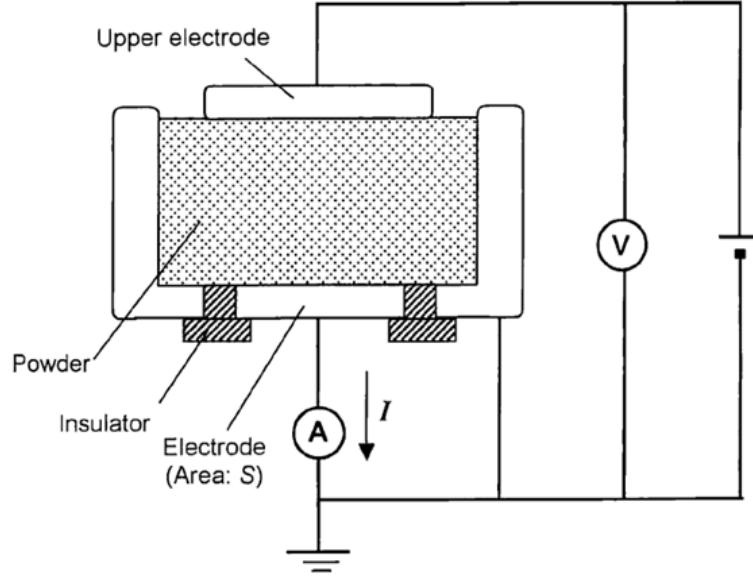
S:مساحة سطح الالكترود (mm^2).

D: المسافة بين الكترودين (mm)

R: المقاومة النوعية التي تتغير بتغير محتوى الرطوبة (h) كالتالي:

$$\log R = -a h$$

حيث a, b ثوابت تعتمد على خصائص مادة البودرة و ظروف العمل (الرطوبة الجوية و درجة الحرارة). وباستخدام المعادلة (5-2) يمكن تحديد محتوى الرطوبة.



الشكل (5-3) شكل تمثيلي يبين مبدأ العمل

يتميز الجهاز:

- سهولة و بساطة دارته الكهربائية.
- سهولة مبدأ القياس.
- قصر مدة العملية.

و مع ذلك يوجد بعض العوائق:

- مقدار التوضيب المطبق على البودرة يؤثر على مقاومتها.
- يمكن حصول أخطاء قياس في حال احتواء البودرة على مواد ناقلة للتيار الكهربائي.

٥.٣ ضبط الجهاز:

قبل استخدام الجهاز لابد من إجراء مجموعة من التجارب الأولية والتي سيتم ضبط الجهاز تبعاً لها وفق مايلي:

١. إجراء عدة تجارب باستخدام البودرة الجافة ومن ثم خلطها بالماء بنسب متفاوتة عند قيم محددة للرطوبة.
٢. قياس شدة التيار المار في العينات ذات الرطوبة المختلفة.
٣. تكرار كل عملية ثلاث مرات وأخذ القيم الوسطية.
٤. نمذجة النتائج لتحديد العلاقة بين رطوبة العينة وشدة التيار المار بها.
٥. إيجاد النموذج الرياضي الأمثل الذي يعبر عن هذه العلاقة ومن ثم تحميله على الجهاز.

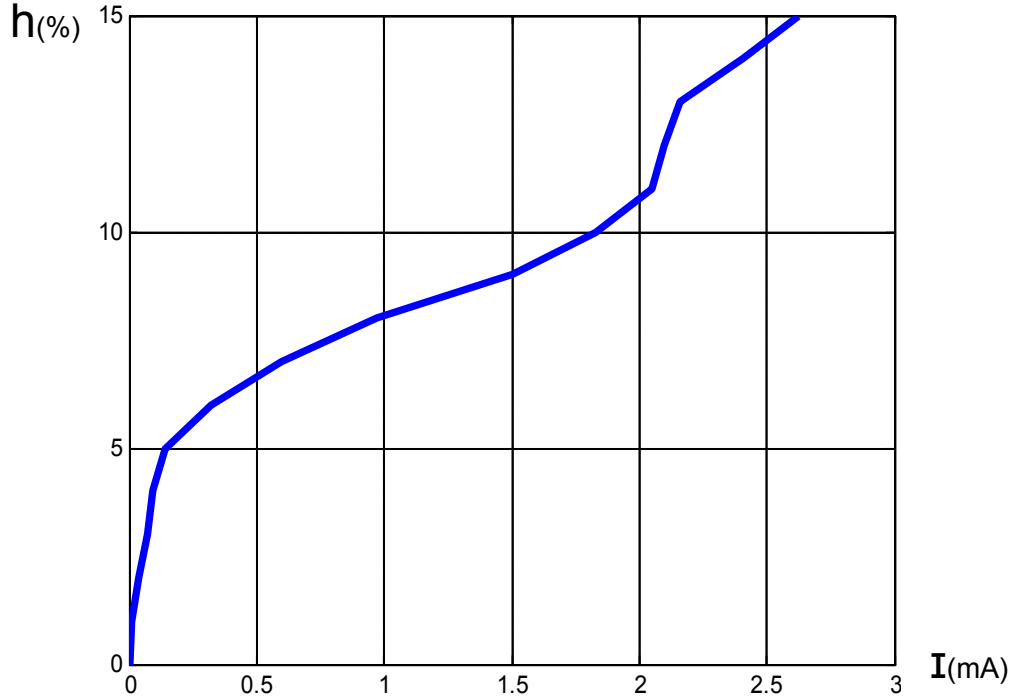
أجريت مجموعة من التجارب بغرض ضبط الجهاز وبرمجته حيث استخدمت وحدة تغذية مخبرية ذات جهد ثابت (20V) كما استخدمت بودرة اللحم الجافة. تم ترطيب البودرة بإضافة الماء لها بنسب محددة ووضعها بالخلط من أجل تجانس الحبيبات وبعد ذلك توضع البودرة الرطبة في اسطوانة جهاز قياس الرطوبة وتوصل إلى وحدة التغذية المخبرية ويتم قياس التيار المار بالبودرة باستخدام جهاز الأفوميتر، ويوضح الجدول (5-1) مجموعة التجارب التي تم تنفيذها وتغير قيم التيار المار بالدارة بتغير قيمة رطوبة البودرة:

الجدول (5-1) تغير قيم التيار بتغير الرطوبة:

القيمة الوسطية للتيار (I(mA))	التيار المار (I(mA))	رطوبة البودرة (h %)
٠	٠	٠
	٠	
	٠	
٠.٠١	٠.٠١	١
	٠.٠١	
	٠.٠١١	
٠.٠٤	٠.٠٣٨	٢
	٠.٠٤	
	٠.٠٤	
٠.٠٧	٠.٠٦٩	٣
	٠.٠٦٩	
	٠.٠٧٢	
٠.٠٩	٠.٠٨٩	٤
	٠.٠٩	
	٠.٠٩١	

القيمة الوسطية للتيار I(mA)	التيار المار I(mA)	رطوبة البودرة (h %)
٠.١٤٣	٠.١٥	٥
	٠.١٤	
	٠.١٤	
٠.٣٢	٠.٣١	٦
	٠.٣٢	
	٠.٣٣	
٠.٥٩	٠.٦	٧
	٠.٥٩	
	٠.٦	
٠.٩٧	٠.٩٨	٨
	٠.٩٨	
	٠.٩٧	
١.٥٠	١.٥١	٩
	١.٥	
	١.٥	
١.٨٣	١.٨٤	١٠
	١.٨٣	
	١.٨٢	
٢.٠٥	٢.٠٧	١١
	٢.٠١	
	٢.٠٥	
٢.١	٢.١١	١٢
	٢	
	٢.٢	
٢.١٦	٢.١٧	١٣
	٢.١٧	
	٢.١٥	
٢.٤٢	٢.٤٣	١٤
	٢.٤٣	
	٢.٤١	
٢.٦٢	٢.٦٤	١٥
	٢.٦٣	
	٢.٦١	

يبين الشكل (5-4) العلاقة بين تغير التيار بتغير رطوبة البودرة:



الشكل (5-4) العلاقة بين تغير الرطوبة وتغير التيار

يستخدم برنامج الماتلاب لتحديد المعادلة التي تربط تغير الرطوبة بتغير التيار.

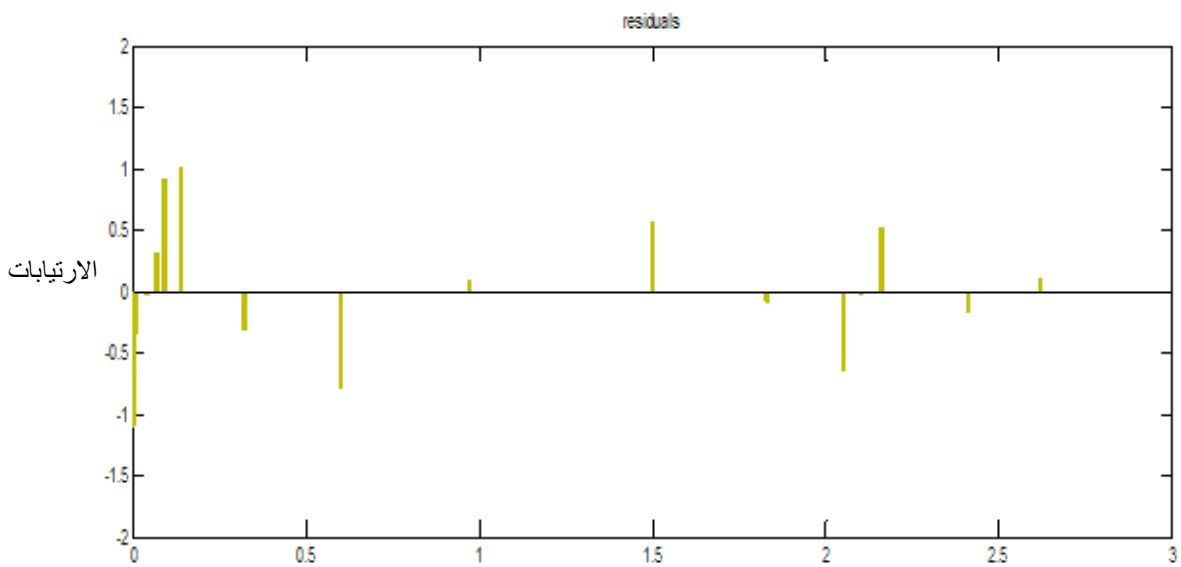
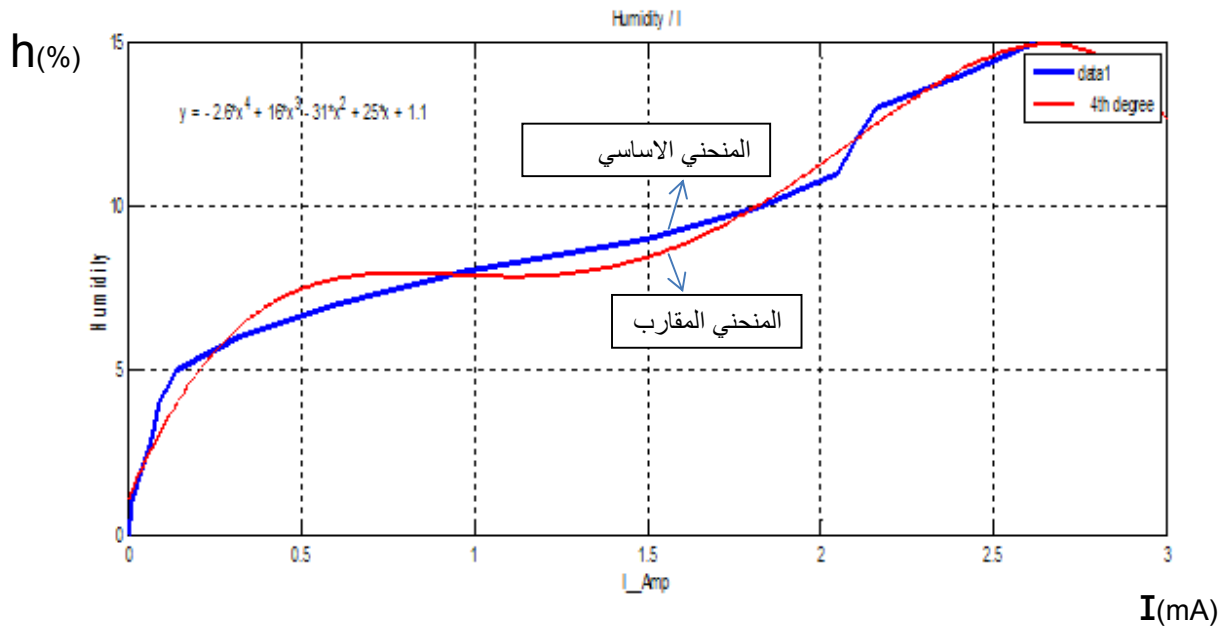
يعتمداختيار المعادلة على قيمة الإرتياب النسبي بين القيم الأسمية عن القيمة الحقيقية للمخطط البياني.

يمكن التعبير عن هذه المعادلة بكثير حدود من الدرجة (n) شكله العام:

$$Y=P_0 + P_1X + P_2 X^2 + P_3 X^3 + \dots + P_n X^m$$

وبالتالي لابد من تحديد درجة كثير الحدود بدايةً ومن ثم تحديد قيمة الثوابت ($P_1, P_2, P_3 \dots P_n$) وننطلق من المنحني البياني لكثير الحدود من الدرجة الرابعة.

يمثل الشكل (5-5)المخطط البياني لتغير التيار بتغير الرطوبة عندما تكون المعادلة من الدرجة الرابعة:



الشكل (٥-٥) تغير التيار بتغير الرطوبة في معادلة من الدرجة الرابعة والارتياحات النسبية لهذه المعادلة

معادلة تغير التيار بتغير الرطوبة عندما تكون المعادلة من الدرجة الرابعة :

$$Y = P_1 X^4 + P_2 X^3 + P_3 X^2 + P_4 X + P_5 \dots \dots \dots (5-1)$$

بحل المعادلة السابقة باستخدام برنامج الماتلاب نحصل على قيم الثوابت:

$$p_1 = -2.6343$$

$$p_2 = 16.037$$

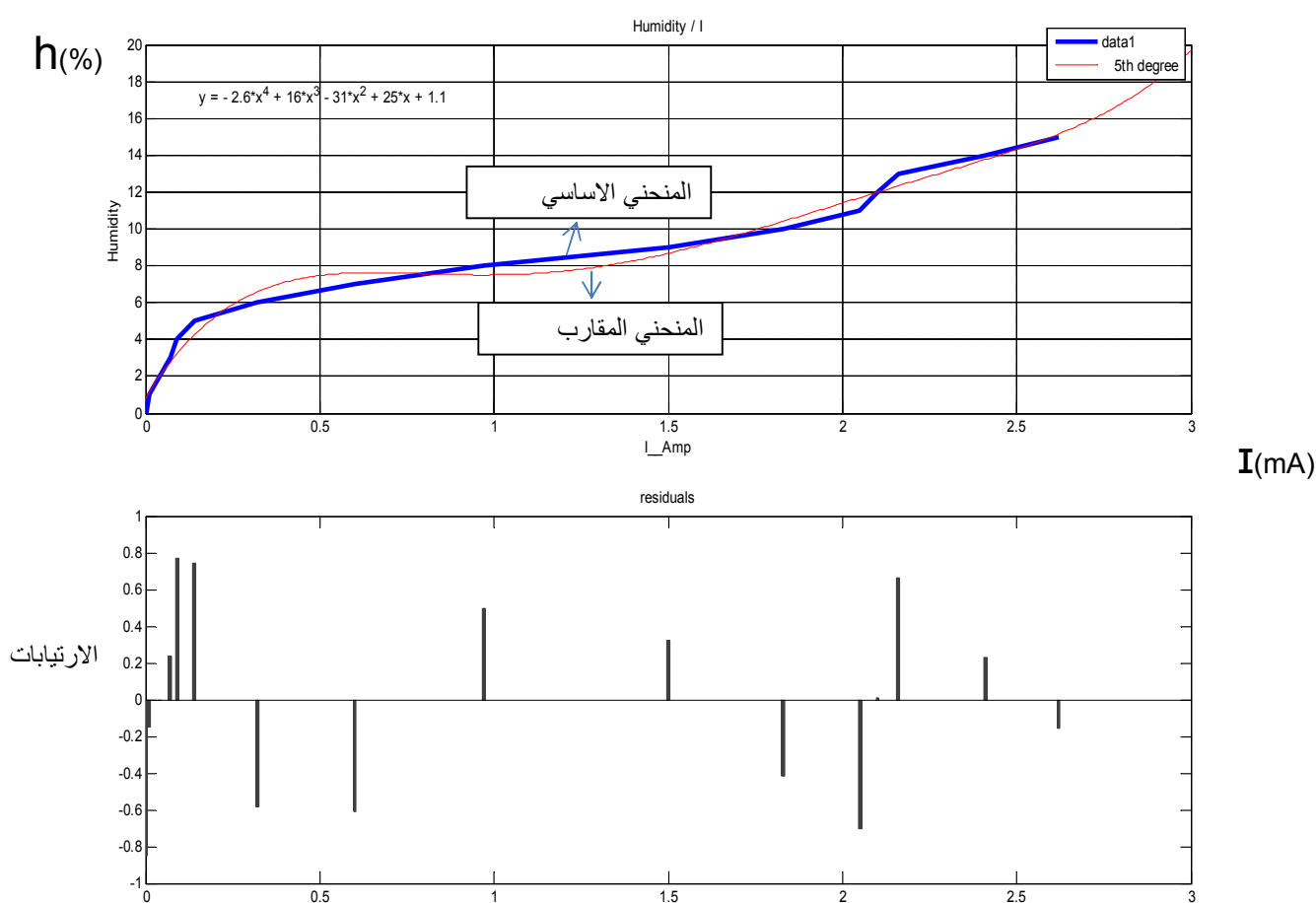
$$p_3 = -31.382$$

$$p_4 = 24.782$$

$$p_5 = 1.0944$$

قيمة الإرتياب النسبي = 2.2462

باستخدام كثير الحدود من الدرجة الخامسة كما يوضح الشكل (5-6) يصبح شكل كثير الحدود كما في المعادلة (5-2).



الشكل (5-6) تغير التيار بتغير الرطوبة في معادلة من الدرجة الخامسة

$$y = P_1X^5 + P_2X^4 + P_3X^3 + P_4X^2 + P_5X + P_6 \dots \dots \dots (5-2)$$

بحل المعادلة السابقة باستخدام برنامج الماتلاب نحصل على قيم الثوابت:

$$p_1 = 1.4599$$

$$p_2 = -12.153$$

$$p_3 = 37.618$$

$$p_4 = -51.062$$

$$p_5 = 30.799$$

$$p_6 = 0.84748$$

قيمة الإرتياب النسبي = 2.0431

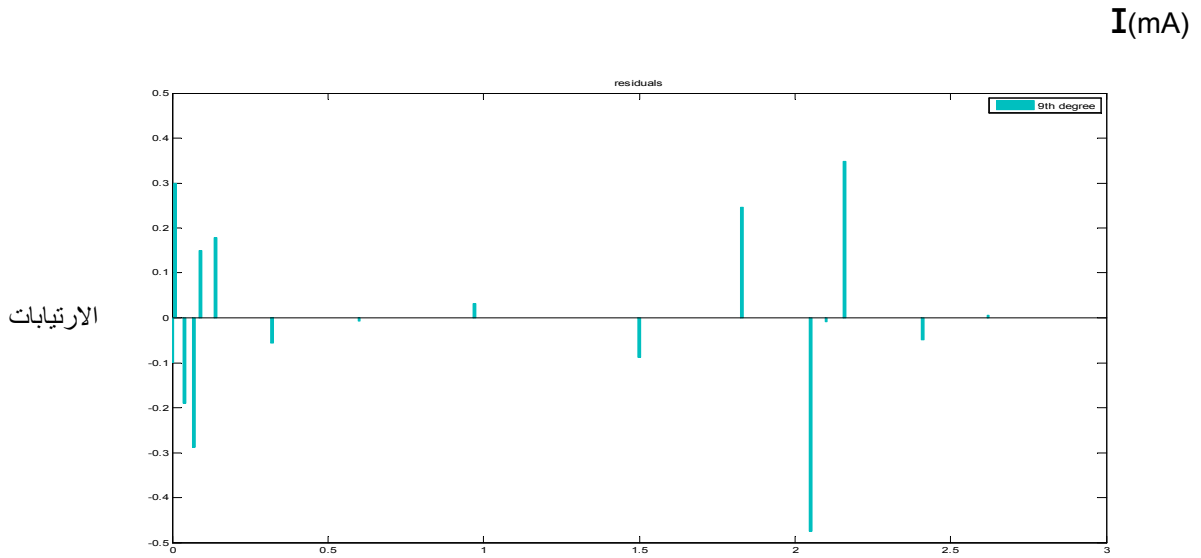
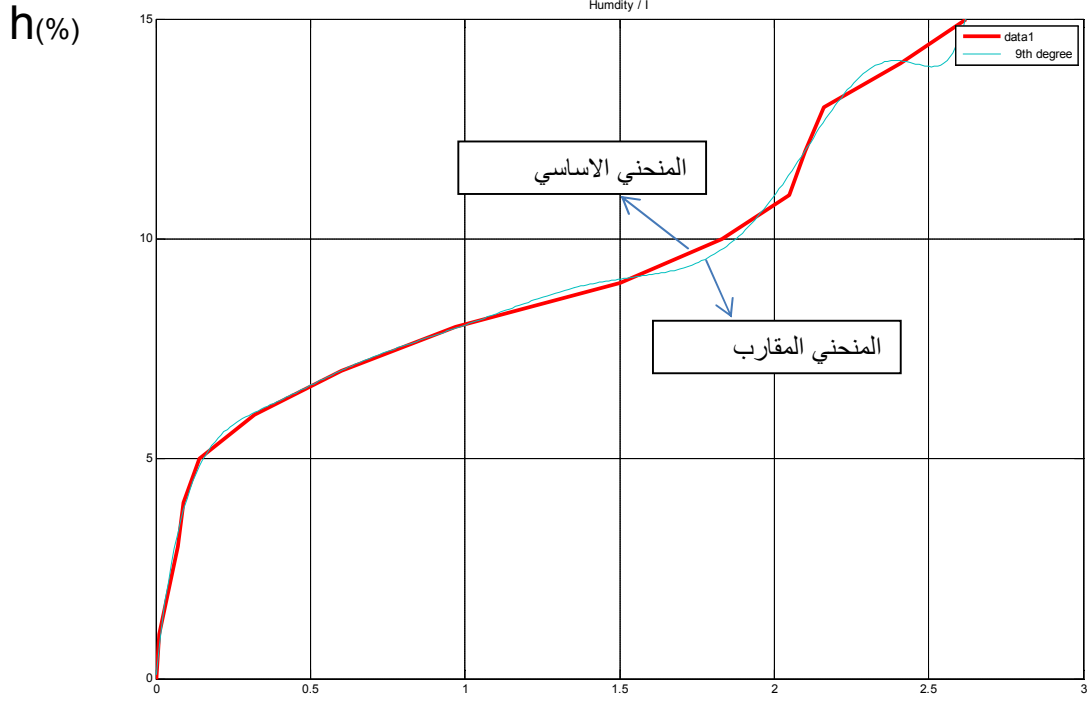
من المعادلتين (5-1) (5-2) والرسم البياني الموافق لهما نلاحظ أن الإرتياب النسبي يتناقص بازدياد درجة المعادلة.

تتم إعادة الحساب من أجل معادلات من الدرجة الرابعة حتى الدرجة التاسعة وينظم جدول يبين قيمة الإرتياب النسبي لكل معادلة كما يوضح الجدول (5-2):

الجدول (5-2) قيمة الإرتياب النسبي:

قيمة الإرتياب	درجة المعادلة
2.2462	n = 4
٢.٠٤٣١	n = 5
١.٤٧٠٤	n = 6
١.٠١٥٩	n = 7
١.٠١٥٤	n = 8
0.83321	n = 9

وتبعاً للجدول السابق نلاحظ قيمة الإرتياب النسبي أصغر ما يمكن عندما يكون كثير الحدود من الدرجة التاسعة، ويوضح الشكل (5-7) المخطط البياني لتغير التيار بتغير الرطوبة عندما تكون المعادلة من الدرجة التاسعة:



الشكل (5-7) تغيير التيار بتغير الرطوبة في معادلة من الدرجة التاسعة

نلاحظ من الشكل (5-7) أن التطابق بين القيم الحقيقية والإسمية عند استخدام معادلة من الدرجة التاسعة أفضل ما يمكن، كذلك قيمة الإرتياب أقل ما يمكن.

وعليه فإن المعادلة المعبرة عن تغير شدة التيار المار بتغير محتوى الرطوبة هي عبارة عن كثير حدود من الدرجة التاسعة معادلته:

$$y = p_1x^9 + p_2x^8 + p_3x^7 + p_4x^6 + p_5x^5 + p_6x^4 + p_7x^3 + p_8x^2 + p_9x + p_{10} \dots\dots (5-3)$$

ثوابت المعادلة :

$$p_1 = -2.1064e^{-11}$$

$$p_2 = 2.3188e^{-10}$$

$$p_3 = -1.0698e^{-09}$$

$$p_4 = 2.6855e^{-09}$$

$$p_5 = -3.9834e^{-09}$$

$$p_6 = 3.5482e^{-09}$$

$$p_7 = -1.8461e^{-09}$$

$$p_8 = 5.2288e^{-10}$$

$$p_9 = -7.0857e^{-11}$$

$$p_{10} = 3.419e^{-12}$$

قيمة الارتياح النسبي =0.83321

وبالتالي تم ضبط الجهاز وبرمجته وفقاً للمعادلة (5-3).

الفصل السادس

تنفيذ التجارب وتسجيل النتائج

يعرض هذا الفصل مجموعة من التجارب التي تهدف إلى معرفة محتوى الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة بطريقة القوس المغمور وكذلك اختلاف محتوى الهيدروجين ضمن الوصلة باختلاف رطوبة بودرة اللحام .

6.1 المعاملات التجريبية:

المتحولات الثابتة:

- سلك اللحام المستخدم (EN 756 S2 (d =3.2 mm) (C=0.11%, Si=0.12%, Mn=1.1%) .
- بودرة اللحام المستخدم JN-SJ301G يقابلها وفق (AWS) البودرة F6A0-EL12 وهي بودرة من النوع المتكثف قابلة لامتصاص الرطوبة مؤشر القاعدية لها (١.٣) وتتكون بشكل أساسي من السيلكون والكالسيوم، يستعمل هذا النوع من البودرة مع التيارات العالية حيث يمكن أن يصل التيار إلى ١٢٠٠ أمبير.
- المسافة بين الفالة و سطح المشغولة 15mm .
- درجة حرارة الوسط 23 °c .
- زاوية اللحام ٩٠ درجة.

متحولات عملية اللحام (التيار – الجهد – سرعة العربة) تم اختيارها وفق المعيارية (ISO-2690) بحيث أن الدخل الحراري [20]: $E \leq 2 \text{ KJ/mm}$

$$E = \frac{I \times V \times 60}{S \times 1000} \eta \dots \dots \dots (6 - 1)$$

E: الدخل الحراري [kJ/mm]

V: التوتر الكهربائي [V].

I: شدة التيار الكهربائي [A].

S: سرعة تقدم العربة [mm/min].

η: المرودود الحراري لآلة اللحام Thermal efficiency.

من أجل لحام SAW يكون $\eta = 0.9$.

من أجل تيار لحام (300A) وجهد لحام (25V) وسرعة تقدم (30 Cm/min):

$$E = \frac{I \times V \times 60}{S \times 1000} \eta = \frac{300 \times 25 \times 60}{30 \times 10 \times 1000} \times 0.9 = 1.35 \text{ KJ / mm} < 2 \text{ KJ / mm}$$

المتحولات المتغيرة:

- رطوبة بودرة اللحام، حيث تم إجراء التجارب بمتحولات ثابتة ورطوبة بودرة متغيرة من (1-10) %.

يبين الشكل (6-1) وضعية اللحام وطريقة تنفيذ الوصلة اللحامية:



الشكل (6-1) وضعية اللحام

6.2 خطة العمل:

١. إجراء عمليات اللحام على القطعة النحاسية ومن ثم نزع الدرزة الملحومة عنها وأخذ الدرزة الأحادية بدون معدن أساس وذلك وفق المتحولات السابقة.
٢. قياس حجم الهيدروجين المنتشر في الدرزة، وتسجيل النتائج.
٣. دراسة ميتالوغرافية على العينات.

٦.٣ إجراء التجارب:

تجرى التجارب وفق المتحولات المذكورة أعلاه ($I=300A$, $V=25V$, $S=30cm/min$, $d= 3.2 mm$) وبتغير رطوبة بودرة اللحام (٠-١٠)%.

تظهر الأشكال التالية عينات اللحام المنفذة:



العينة 4

h = 3%

العينة 3

h = 2%

العينة 2

h = 1 %

العينة 1

h = 0 %

الشكل (6-2) عينات اللحام المنفذة (١)



الشكل (6-3) عينات اللحم المنفذة (٢)



الشكل (6-4) عينات اللحم المنفذة (3)

٦.٤ قياس حجم الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة:

يقاس حجم الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة بطرق عديدة ومختلفة منها طريقة الغليسيرين وطريقة الزئبق وطريقة الغاز اللوني.... تم اختيار طريقة الغليسيرين نظراً لبساطة وسهولة تنفيذها.

لتنفيذ التجربة بهذه الطريقة سيتم في البداية إعداد العينة:

تحدد أبعاد عينة اللحام ومثبتات العينة من أجل اختبار محتوى الهيدروجين المنتشر في باص اللحام الأحادي بناء على المدخلات الحرارية لعملية اللحام، يجب أن تكون مثبتات اللحام مصنوعة من النحاس و ذلك من أجل السماح بتبريد عينة اللحام بشكل سريع وكذلك نزع معدن اللحام عن قطعة النحاس بسهولة وتقليل هروب الهيدروجين من العينة.

يجب ألا تزيد نسبة الكربون في العينة عن ٠.١٨% و نسبة الكبريت عن ٠.٠٢% كما يجب أن تتمتع درزة اللحام بعرض ثابت [20].

يجب أن تتم عملية تبريد العينة مباشرة بعد الإنتهاء من عملية اللحام و ذلك لأن بنية الدرزة الملحومة تكون أوستنيتية ومشبعة بالهيدروجين ويتم التبريد إلى درجة حرارة الغرفة وتوضع العينة بعدها في أنبوب الاختبار لقياس محتوى الهيدروجين المنتشر، وفي حال لم يتم تنفيذ الاختبار مباشرةً تحفظ العينة في قالب من الثلج الجاف عند الدرجة (°C -78) لمدة لا تزيد عن ثلاثة أيام، أو في النتروجين السائل عند الدرجة (°C -199) لعدة أسابيع إلى أن يتم تنفيذ الاختبار.

تجميع محتوى الهيدروجين المنتشر:

تم استخدام مقياس مدرج بـ (ml) لقياس محتوى الهيدروجين المنتشر حيث يتم وضع العينة ضمن الأنبوب ويملى بالجليسيرين ويكون الأنبوب مسدود من الأعلى ويتم سدده من الأسفل بإحكام ويترك فيه ثقب صغير ثم يوضع في إناء مملوء بالجليسيرين كما يوضح الشكل (5-6):



الشكل (6-5) أنابيب قياس محتوى الهيدروجين المنتشر

تترك العينة لمدة ثلاثة أيام فتظهر فقاعات ضمن الأنبوب هي عبارة عن غاز الهيدروجين المنتشر المراد قياسه.

حساب تركيز الهيدروجين المنتشر:

يتم حساب حجم الهيدروجين المنتشر في الوصلة الملحومة وفق المعادلات (6-2) و (6-3)[20]:

$$H_D = V \times \frac{1}{\rho}$$

V : حجم الهيدروجين المنتشر في انبوبة القياس (ml).

M_D : وزن الدرزة الملحومة الأحادية بـ (g).

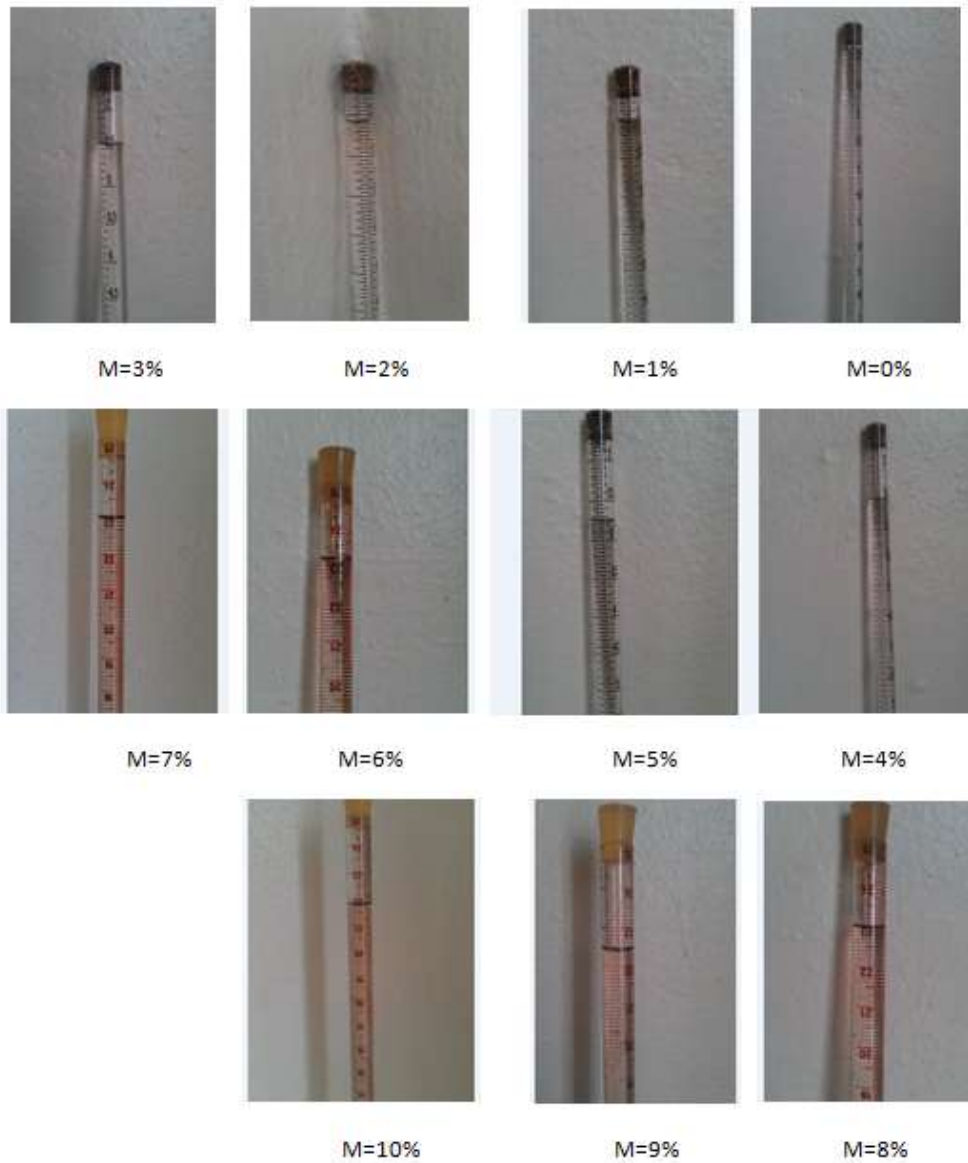
$$M_D = M_2 -$$

M_1 : وزن العينة النحاسية قبل اللحام عليها بـ (g).

M_2 : وزن العينة النحاسية بعد اللحام عليها بـ (g).

تعتمد الشركات المصنعة على قياس حجم الهيدروجين المنتشر بـ (مل) لكل ١٠٠ غرام من معدن اللحام.

تنفذ التجارب وفق الخطوات السابقة ويوضح الشكل (6-6) صور تجارب قياس الهيدروجين المنتشر.



الشكل (6-6) محتوى الهيدروجين المنتشر في الأنبوب الاختباري

6.5 تسجيل النتائج:

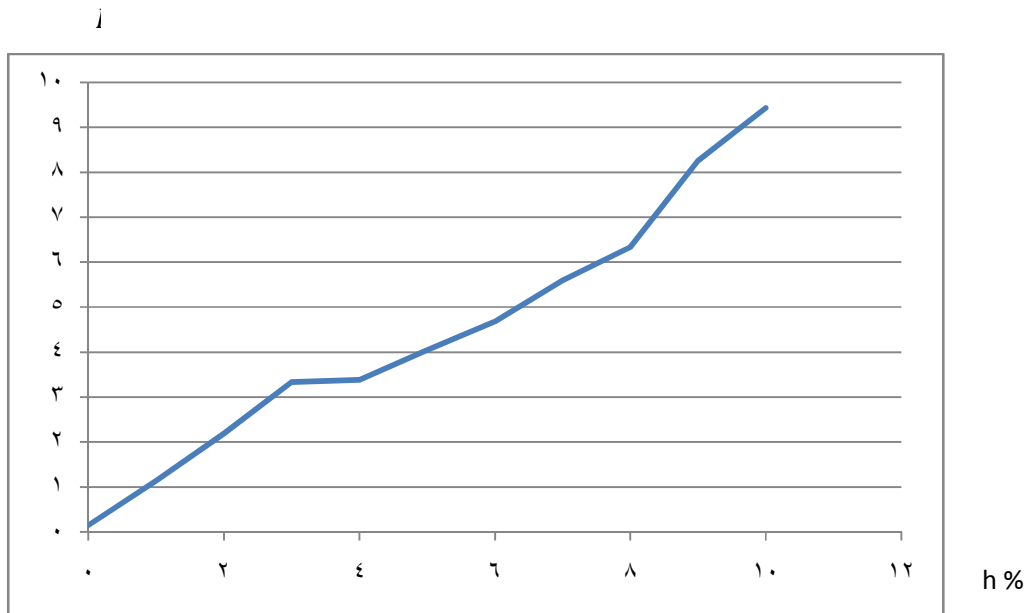
يبين الجدول (6-1) النتائج التي تم الحصول عليها للهيدروجين المنتشر عند رطوبة بودة متغيرة.

الجدول (6-1): متحولات عملية اللحام ومحتوى الهيدروجين المنتشر في كل وصلة ملحومة.

العينة	رطوبة البودة [%]	وزن العينة [g]m	متوسط وزن العينات m_D [g]	درجة حرارة الجو [°c]	الدخل الحراري Kj/mm	$[ml]V_H$	متوسط $[ml]V_H$	[ml/100g]
١	٠	33	٣٢.٥	٢٣	٠	٠.٠٥٥	٠.٠٥	٠.١٥٣
		٣٢.٥		٢٣		0.05		
		٣٢		٢٣		٠.٠٤٥		
٢	١	٢٧.٥	٢٧	٢٣	٠	٠.٣٥	٠.٣١	١.١٤
		٢٧		٢٣		٠.٣٥		
		٢٦.٥		٢٣		٠.٢٥		
٣	٢	١٨	١٦	٢٣	٠	٠.٤٥	٠.٣٥	٢.١٨٧
		١٦		٢٣		٠.٣٥		
		١٤		٢٣		٠.٢٥		
٤	٣	٢٣	٢١.٣ ٣	٢٣	٠	٠.٨	٠.٧١	٣.٣٣
		٢١.٥		٢٣		٠.٧٥		
		١٩.٥		٢٣		٠.٦		
٥	٤	٢٦	٢٥.١	٢٣	٠	٠.٩	٠.٨٥	٣.٣٨
		٢٥.٢		٢٣		٠.٨٥		
		٢٤		٢٣		٠.٨		
٦	٥	٢٧.٥	٢٧.١	٢٣	٠	١.٢	١.١	٤.٠٥
		٢٧		٢٣		١.١		
		٢٧		٢٣		١.٠٠		
٧	٦	٣٤	٣٢	٢٣	٠	١.٦٥	١.٥	٤.٦٨
		٣٢		٢٣		١.٤٥		
		٣٠		٢٣		١.٤		
٨	٧	٢٨	٢٦.٨	٢٣	٠	١.٥٥	١.٥	٥.٥٩
		٢٧.٦		٢٣		١.٥		
		٢٥		٢٣		١.٤٥		
٩	٨	٢٩	٢٧	٢٣	٠	١.٨	١.٧١	٦.٣٣
		٢٧		٢٣		١.٧٥		
		٢٥		٢٣		١.٦		

العينة	رطوبة البودرة [%]	وزن العينة [g] m	متوسط وزن العينات m_D [g]	درجة حرارة الجو [°C]	النخل الحراري Kj/mm	[ml]V _H	متوسط [ml]V _H	[ml/100g]
١٠	٩	٢٧	٢٥.٤	٢٣	()	٢.٤	٢.١	٨.٢٦
		٢٥						
		٢٤.٤						
١١	١٠	٣٢	٣٠	٢٣	()	٢.٩٥	٢.٨٣	٩.٤٣
		٣٠						
		٢٨						

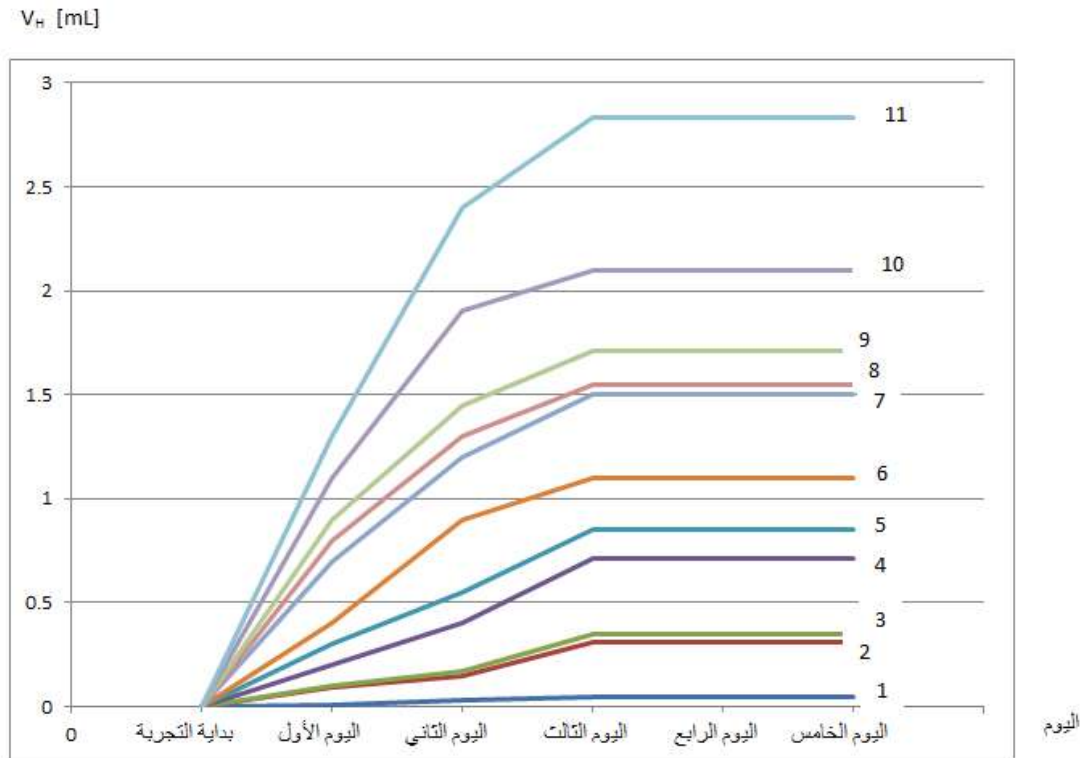
يبين الشكل (6-7) العلاقة بين رطوبة بودرة اللحم المتغيرة ومحتوى الهيدروجين الناتج من الوصلات الملحومة.



الشكل (6-7) العلاقة بين رطوبة البودرة والهيدروجين المنتشر

يلاحظ من الشكل السابق وجود علاقة شبه خطية بين رطوبة البودرة ومحتوى الهيدروجين المنتشر في الدرزة الملحومة، حيث يزداد الهيدروجين المنتشر بشكل طردي مع ازدياد رطوبة البودرة.

يوضح الشكل (6-8) مخطط الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة خلال خلال الفترة الزمنية لاجراء التجارب.



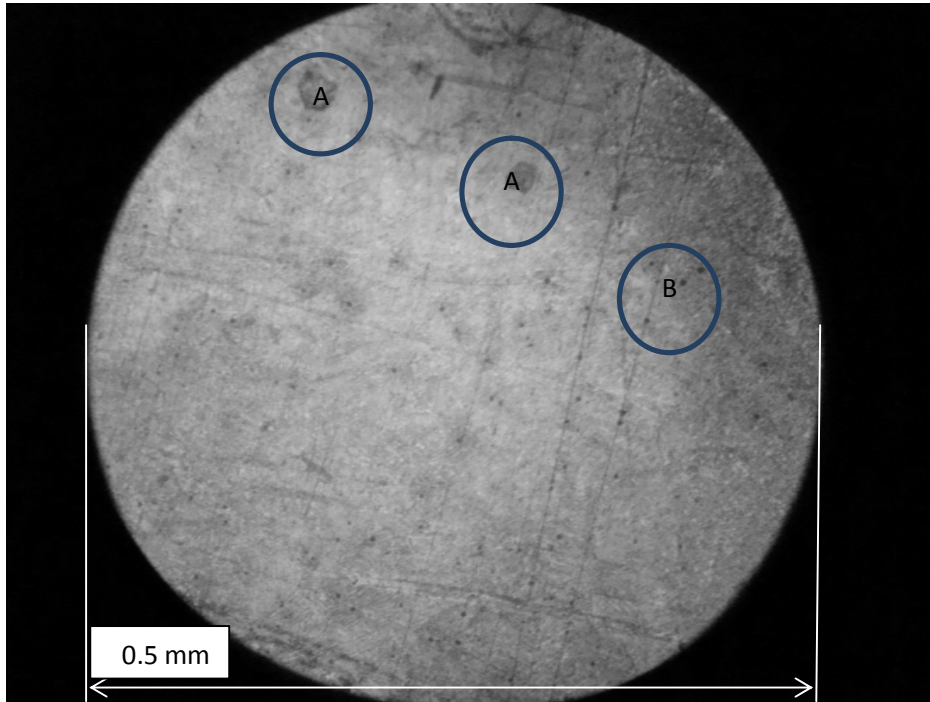
الشكل (6-8) مخطط الهيدروجين المنتشر

- (١) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ٠%
- (٢) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ١%
- (٣) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ٢%
- (٤) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ٣%
- (٥) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ٤%
- (٦) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ٥%
- (٧) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ٦%
- (٨) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ٧%
- (٩) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ٨%
- (١٠) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ٩%
- (١١) مخطط الهيدروجين المنتشر عند نسبة رطوبة بودة ١٠%

٦.٦ الدراسة الميتالوغرافية لعينات اللحام:

بعد تنفيذ تجارب قياس حجم الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة، تم إجراء الدراسة الميتالوغرافية لعينات اللحام وذلك لتحديد نسبة رطوبة البودرة التي تبدأ عندها التشققات بالظهور ضمن الوصلات الملحومة، وقد تم إجراء الدراسة الميتالوغرافية وأخذ الصور للعينات باستخدام المجهر الضوئي بنسبة تكبير $\times = 250$ مرة.

تبين الأشكال (6-18.....6-9) الصور الميتالوغرافية للعينات المدروسة:

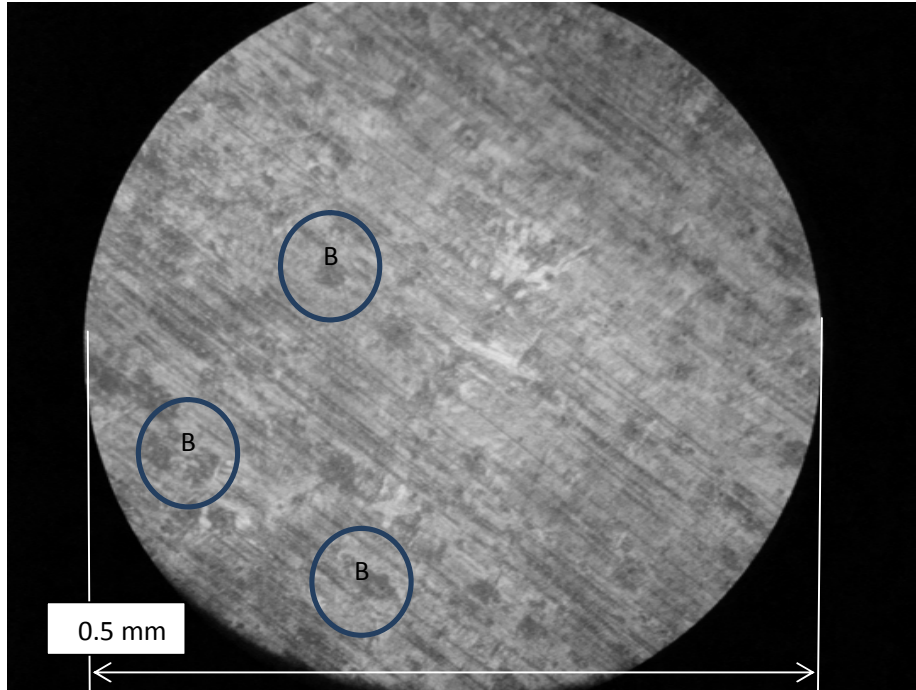


الشكل (6-9)

$$h = 1 \% , H_D = 1.11 \text{ ml/100g}$$

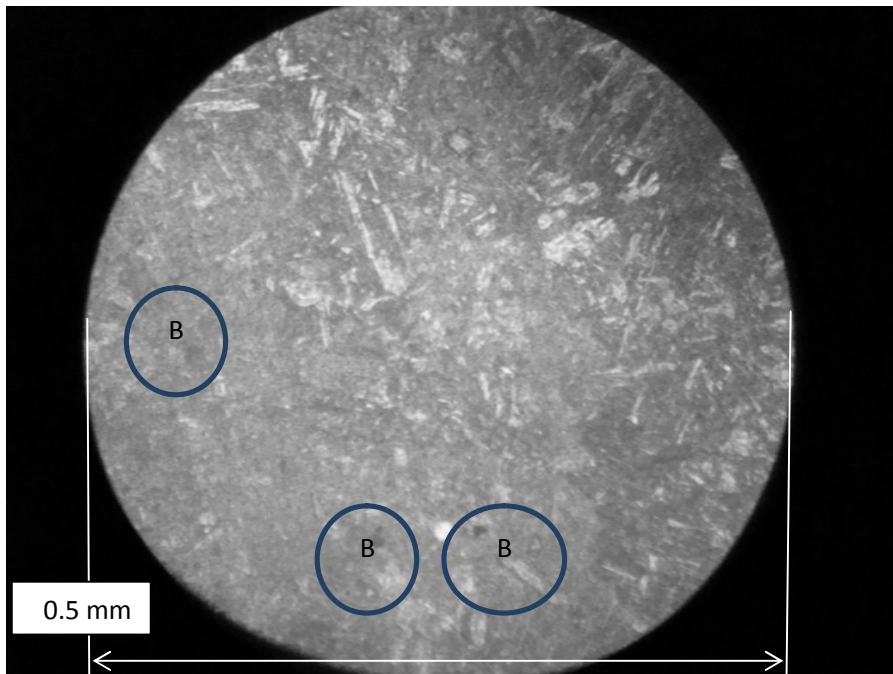
A- فجوات هوائية صغيرة

B- الهيدروجين المنتشر يظهر بشكل نقاط سوداء



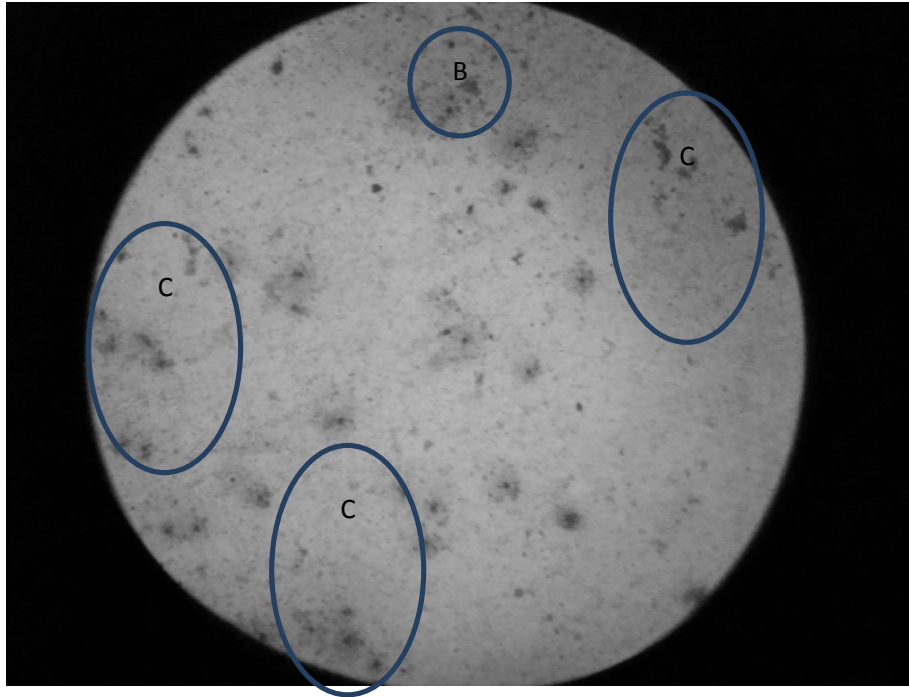
الشكل (6-10)

B- ، $H_D = 2.33 \text{ ml/100g}$ ، $h=2$ ، النقاط السوداء هي الهيدروجين المنتشر



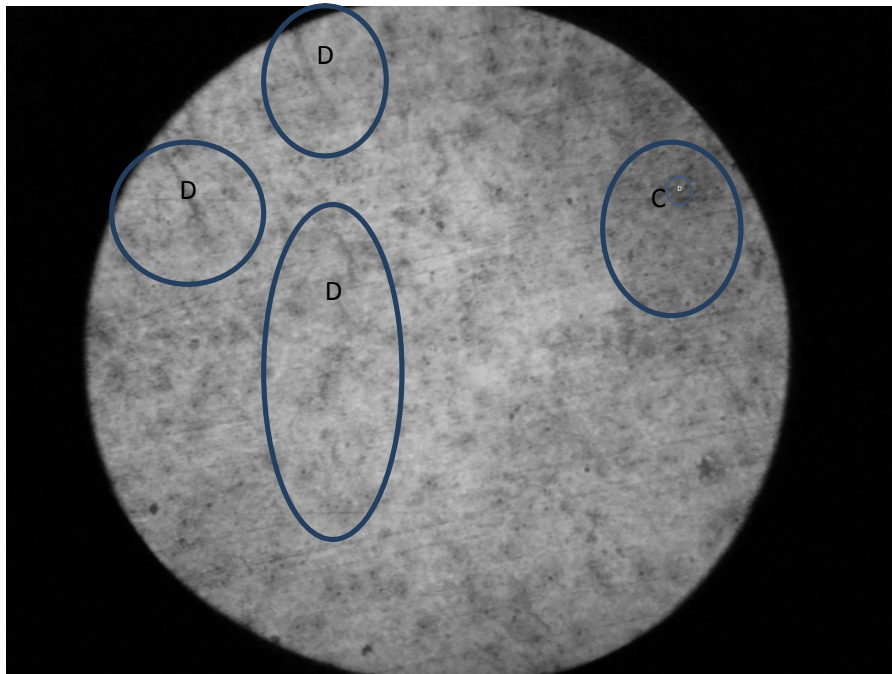
الشكل (6-11)

$H_D = 3.25 \text{ ml/100g}$ ، $h=3 \%$



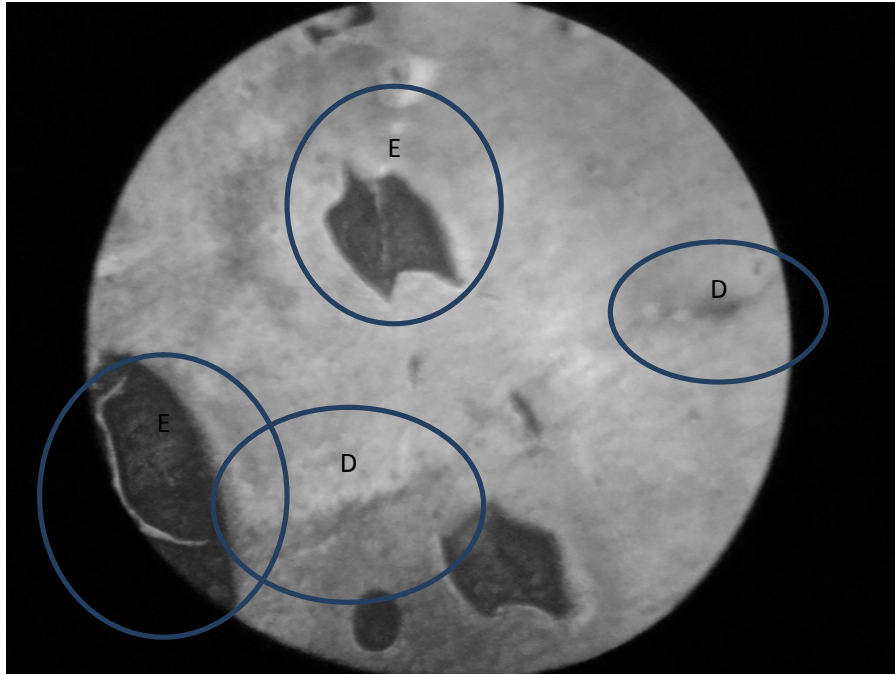
الشكل (6-12)

تجمع نقاط الهيدروجين قبل حدوث التشقق-C ، $H_D = 3.37 \text{ ml/100g}$ ، $h = 4\%$



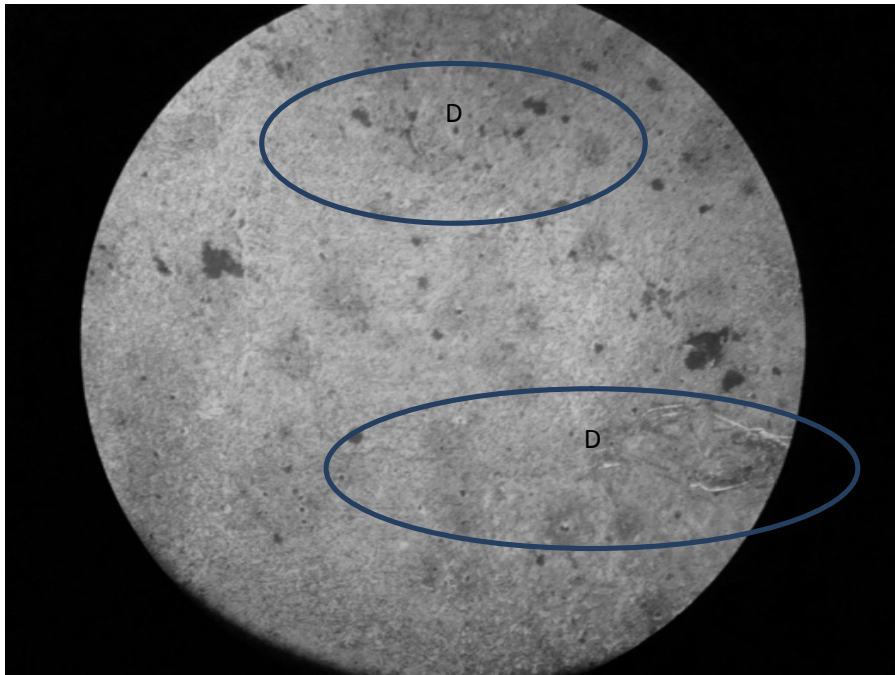
الشكل (6-13)

ظهور الشق في البنية الميكروية - D ، $H_D = 4.05 \text{ ml/100g}$ ، $h = 5\%$



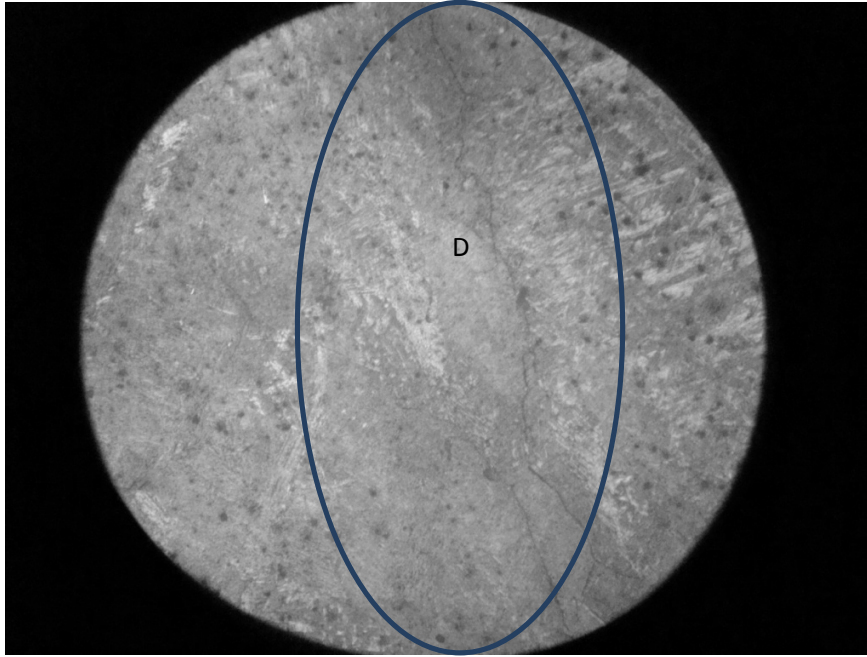
الشكل (6-14)

$H_D = 4.68 \text{ ml}/100\text{g}$, $h = 6 \%$ ، فجوات (مسامات) كبيرة - E ، ظهور الشق في البنية الميكروية - D



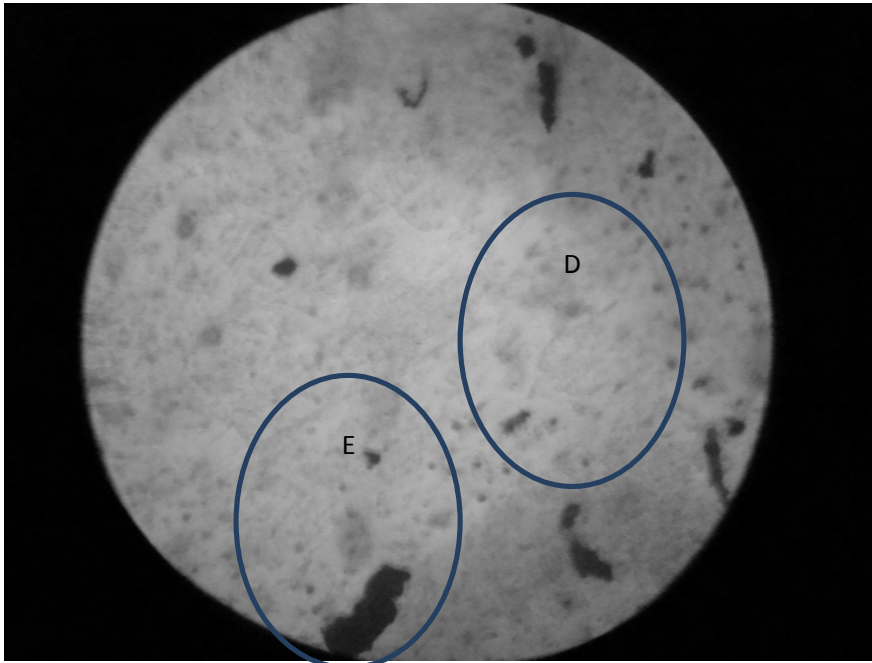
الشكل (6-15)

$H_D = 5.55 \text{ ml}/100\text{g}$, $h = 7 \%$



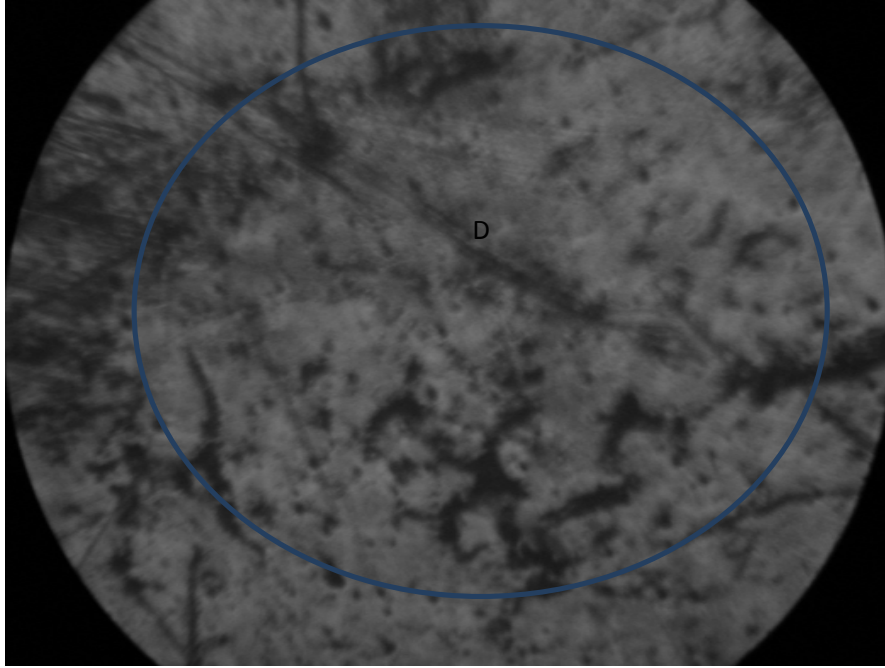
الشكل (6-16)

$$H_D = 6.29 \text{ ml}/100\text{g}, h = 8 \%$$



الشكل (6-17)

$$H_D = 8.26 \text{ ml}/100\text{g}, h = 9 \%$$



الشكل (6-18)

$$H_D = 9.33 \text{ ml/100g}, h = 10 \%$$

الفصل السابع

مناقشة النتائج والاستنتاجات

يعرض هذا الفصل مناقشة النتائج للجزء التجريبي من الدراسة وكذلك الاستنتاجات والتوصيات المستخلصة من هذا العمل .

7-1 مناقشة النتائج:

- ١- تم تصميم وتنفيذ جهاز لقياس رطوبة البودرة والذبيعتد على تغير المقاومة الكهربائية لبودرة اللحم بتغير رطوبتها، أي محتوى الرطوبة يتم تحديده عبر قياس تغير المقاومة الكهربائية .
 - ٢- من مقارنة المخططات البيانية للأشكال (5-4) و(5-5) و(5-6) و(5-7) وكذلك الارتياح النسبية المبينة بالجدول (5-2)، نلاحظ أن التطابق بين القيم الحقيقية والقيم الأسمية أفضل ما يكون عند المعادلة من الدرجة التاسعة وكذلك الارتياح النسبي يكون أقل ما يمكن، لذلك تم برمجة الجهاز بناءً على المعادلة (5-3).
 - ٣- يبين الشكل (5-7):
- ازدياد قيمة التيار المار في البودرة مع ازدياد رطوبتها وهذا طبيعي لازدياد الناقلية الكهربائية للبودرة.
 - من الواضح أن ميل المنحني يكون كبيراً حتى نسبة رطوبة ٥% أي زيادة رطوبة بودرة اللحم حتى نسبة ٥% تؤدي إلى زيادة صغيرة في الناقلية الكهربائية للبودرة ويعود ذلك إلى أن النسب المنخفضة من الرطوبة تؤدي إلى حدوث ظاهرة الادمصاص التي تتميز بتبليط الطبقة السطحية لحبيبات البودرة فقط .
 - مع ازدياد نسبة الرطوبة للبودرة حتى ١٠% ينخفض ميل المنحني بسبب الانتقال من حالة الادمصاص إلى حالة الامتصاص التي تسبب تبلل كامل لحبيبات البودرة وبالتالي تزداد الناقلية الكهربائية للتيار المار بالبودرة.
 - عند نسب رطوبة أكبر من ١٠% يصبح هناك فائض من السائل ضمن حبيبات البودرة بحيث تصبح حبيبات البودرة وكأنها موضوعة ضمن السائل فيحدث قفزة كما يوضح المخطط وينخفض ميل المنحني ولا تزداد الناقلية بعدها بشكل كبير لأن وجود البودرة لا يؤثر على ناقلية السائل.

- ٤- تم إجراء اختبار قياس محتوى الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة بطريقة الغليسيرين وذلك حسب الامكانيات والأدوات المتوفرة.
- ٥- نلاحظ من الجدول (1-6) تزايد قيمة الهيدروجين المنتشر بزيادة رطوبة البودرة عند ثبات باقي متغيرات عملية اللحام، مما يؤكد دور رطوبة البودرة وتأثيرها على محتوى الهيدروجين المنتشر في الوصلات الملحومة وبالتالي دورها الأساسي في حصول التشققات الهيدروجينية أو التشققات على البارد في الوصلات الملحومة.
- ٦- من الشكل (6-7):
- يلاحظ وجود علاقة شبه خطية بين رطوبة البودرة ومحتوى الهيدروجين المنتشر في الدرزة الملحومة، حيث يزداد الهيدروجين المنتشر بشكل طردي مع ازدياد رطوبة البودرة.
 - لا يمر المنحني بمبدأ الاحداثيات على الرغم من أن رطوبة البودرة تساوي الصفر في العينة (١) وذلك بسبب رطوبة الجو المحيط (الوسط المحيط).
- ٧- من الشكل (6-8):
- نلاحظ أنه من أجل نسبة رطوبة محددة فإن كمية الهيدروجين المنتشر تتزايد مع مرور الزمن ومن ثم تستقر عند قيمة ثابتة وذلك لأن انتشار الهيدروجين يتم في الأيام الثلاثة الأولى بعد إجراء عملية اللحام وهذا يتوافق مع المعيارية (ISO 3690-2000).
- ٨- تظهر الدراسة الميتالوغرافية للأشكال من (6-9) حتى (6-18):
- وجود فراغات هوائية ضمن الدرزة الملحومة (مسامات) إضافة إلى نقاط سوداء تعبر عن الهيدروجين المنتشر ضمن الدرزة الملحومة.
 - حجم هذه المسامات والفجوات والنقاط السوداء يزداد بشكل طردي مع زيادة رطوبة البودرة.
 - يكون حجم هذه المسامات والفراغات صغيراً حتى نسبة رطوبة (4%) وهي موزعة بشكل شبه منتظم ضمن بنية الدرزة.
 - عند زيادة نسبة الرطوبة عن 4% تبدأ هذه المسامات والنقاط السوداء (الهيدروجين المنتشر) بالتجمع لتشكّل جيوباً كبيرة مما يسمح بتركيز الاجهادات عند هذه الجيوب مهينة الظروف لتشكّل التشققات على البارد وهذا ما يتضح في العينة ذات نسبة الرطوبة (5%).
 - مع ازدياد نسب الرطوبة عند (5%) يزداد حجم هذه الجيوب بشكل ملحوظ وتصبح على شكل بقع كبيرة ويزداد معها طول الشق حتى يمتد على طول العينة كما موضح بالشكل (6-18) عند نسبة رطوبة (10%).

- تتفق الدراسة الميتالوجرافية مع الدراسة النظرية التي تؤكد وجود علاقة بين محتوى الرطوبة والهيدروجين المنتشر ضمن الدرزة الملحومة وتأثير ذلك على تشكل التشققات على البارد.

7-2 الاستنتاجات:

من خلال الدراسة السابقة نتوصل للاستنتاجات التالية:

- ١- وجود علاقة من الدرجة التاسعة تربط رطوبة بودرة اللحام بالناقلية الكهربائية لهذه البودرة مما سمح باستثمار هذه العلاقة في تصميم وتصنيع جهاز لقياس رطوبة البودرة يعتمد على تغير المقاومة الكهربائية لبودرة اللحام بتغير رطوبتها.
- ٢- وجود تأثير هام لرطوبة البودرة على محتوى الهيدروجين المنتشر في الدرزة الملحومة وبالتالي دورها الكبير في حدوث التشقق على البارد في الوصلات الملحومة المنفذة بطريقة اللحام بالقوس المغمور.
- ٣- أهمية تجفيف بودرة اللحام قبل استخدامها في عملية اللحام لتفادي حدوث التشققات ضمن الوصلات الملحومة.
- ٤- يجب ألا تزيد رطوبة البودرة المستخدمة في عملية اللحام بالقوس المغمور عن (4%) وذلك من أجل هذا النوع من البودرة.

7-3 الخاتمة:

تم في هذا البحث التطرق إلى عملية اللحام بالقوس المغمور والتركيز على دور البودرة ورطوبتها في تشكل عيوب اللحام وبالأخص عيوب المسامية التي تؤدي إلى حدوث التشققات على البارد، كما تم تنفيذ تجارب قياس محتوى الهيدروجين المنتشر في الوصلة الملحومة بتغيير رطوبة البودرة.

كما تم تصميم وتصنيع جهاز لقياس محتوى الرطوبة يعتمد على تغيير المقاومة الكهربائية لبودرة اللحام بتغيير رطوبتها.

خُصت الدراسة إلى أنه من خلال استخدام جهاز قياس رطوبة البودرة الذي تم تصنيعه أصبح بالإمكان معرفة رطوبة البودرة مباشرة وبشكل سريع وبالتالي يمكن معرفة محتوى الهيدروجين المنتشر الذي سينتج عن الوصلة الملحومة والذي يقودنا للتنبؤ فيما إذا سيحدث تشقق على البارد ضمن الوصلة الملحومة أو لا.

7-4 الآفاق المستقبلية:

١- يمكن العمل مستقبلاً على تطوير الجهاز الذي تم تصنيعه بحيث يصبح بإمكانه التعامل مع جميع أنواع البودرة، وذلك لأن التجارب التي تم برمجة الجهاز على أساسها أجريت على نوع واحد من البودرة.

٢- قياس محتوى الهيدروجين المنتشر ضمن الدرزة الملحومة تم بتغيير متحول واحد وهو رطوبة البودرة وتثبيت باقي المتحولات (الجهد – التيار – سرعة العربة ...) من الممكن مستقبلاً توسيع البحث ليشمل تغيير المتحولات الأخرى وبالتالي الحصول على نتائج أكثر دقة.

٣- التوسع في دراسة عملية اللحام بالقوس المغمور والعيوب المرافقة لها لما لهذه التقنية من أهمية كبيرة في اللحامات وإمكانية استثمارها في مرحلة إعادة الاعمار للمنشآت الصناعية ولحام أنابيب النفط.

المراجع

- [1] اللحام بالقوس المغمور- المؤسسة العامة للتعليم الفني والمهني – السعودية /١٤٢٧ هـ [1]
- [2] Welding, Brazing and Soldering WAS Published in 1993 AS Volume 6 of the ASM HandBOOK. The Volume was prepared under the Direction of the ASM HandBook committee.
- [3] submerged Arc Welding – ESAB – XA00109620- 2008.
- [4] ITW Welding – Miller – HOBART – Submerged Arc Welding Consumables.
- [5] McKeown, D: 'Hydrogen and its control in weld metal' Metal Construction
1985 17 (10) 655-661
- [6] Houldcroft, P.T. (1989), *Submerged-Arc Welding*, Abington Publishing, Cambridge, England.
- [7] Metals HandBook -Welding, Brazing and Soldering. American Society for Metals, 1993 Edition , Volume 6, USA, Lecture 13 Submerged Arc Welding.
- [8] Technical HandBook –ESAB- Submerged Arc Welding. Fluxes and Wires for Joining Non and Low – Alloyed Steels, Stainless Steels and Nickel – Base Alloys.
- [9] 3. Submerged Arc Welding /2005.
- [10] *Diffusible Hydrogen in Steel Weldments. - A Status Review* Transactions of JWRI, Vol.42 (2013), No. 1
- [11] CONTROL OF DIFFUSIBLE WELD METAL HYDROGEN THROUGH ARC CHEMISTRY MODIFICATIONS. By JOHN DU PLESSIS- May 2006.
- [12] دليل عملي لضمان جودة اللحام – الدكتور أحمد الرصيص /٢٠٠٩ [12]
- [13] The Effect of Welding Parameters on Levels of Diffusible Hydrogen in weld Metal deposited Using gas Shielded Rutile Flux Cored Wires. Miroslay Pitrun. University of Wollongong /2004/.
- [14] SUBARC Equipment for welding and hard surfacing using the submerged arc welding process in automatic applications.

SAF , Air LIQUID , France.

[15] Subarc DC 650/800 - CE And Non-CE. Miller OM-236 684H /2010.

[16] +GF+ George Fisher Limited Suhaffhausen – Switzerland. Agitator type PWB.

[17] +GF+ George Fisher Limited Suhaffhausen – Switzerland. Ifar Red Rapid Dryer Type PIT.

[18]sartrorius GPA5202-OCE / GERMANY 1995.

[19] International Journal of Technical Research and Applications e-ISSN: 2320-8163, www.ijtra.com Volume 1, Issue 1 (march-april 2013), PP. 26-28

RECLAMATION OF MOISTURIZED FLUXIN SUBMERGED ARC ELDTING

Rati Saluja¹, K M Moeed²

Mechanical Engineering Department, Goel Institute of Technology and Management Faizabad Road, Lucknow, UP, India

[20] ISO-3690-2000