جامـــــعة قاصـــــدي مربـــــاح ورقـــــلة

كلية علوم المادة والرياضيات

مذكرة ماستر أكاديمي

مجال علوم المادة

شعبة الفيزياء

تخصص فيزياء المواد

من إعداد الطالبة: بوقفة صونيا

العنوان:

دراسة تأثير درجـــــــــة حرارة المراجـــــــعة على سلوك التآكل لصـــــــلب منخفض الكربون

نوقشت علينا بتاريخ: 14 / 06 / 2026

أمام اللجنة المكونة من الأساتذة:

د. إبراهيم غربي	أستاذ محاضر أ	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	رئيسا
د. صالح تليلي	أستاذ تعليم عالي	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	مناقشا
د. عبد اللطيف مامانو	أستاذ محاضر ب	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	مشرفا

الموسم الجامعي: 2026/2025

شكر وامتنان

ليس كل الشكر يقال ...

فهناك امتنان يسكن القلب، ويعجز اللسان عن وصفه ...

إلى الأستاذ المشرف الدكتور مامانو عبد اللطيف

لم تكن مجرد مؤطر لهذا العمل المتواضع، بل كنت يدا امتدت لتقوم اعوجاج الطريق ، وعقلاً وجهني حين التبست علي المسارات... لك مني شكراً لا يكافئ مقامك ، لكنه صادق بعمق ما قدمت.

إلى والدي...

إلى من كانا الدعاء الذي لا يرى ...لكنه يغير كل شيء، إلى من حملا عني ثقل الطريق دون أن أشعر، ومنحاني من القوة ما لم أدرك انني أملكه هذا الإنجاز ليس لي وحدي.. بل هو امتداد لكم ، وصدى لعطائكم الذي لا ينتهي.

وإلى كل يدٍ امتدت ، وكل كلمة رفعتني ، وكل دعم خفي ...قد لا أذكر الأسماء ، لكن الأثر لا ينسى .

شكراً.....

بحجم تعب لم يُرَ، وصبرٍ لم يُحكَ ، وفرح ولد أخيراً بعد طول انتظار

الإهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتمّ الصالحات، والذي جعل بعد العسر يسرًا، ووفقني لأن أضع بين أيديكم ثمرة جهدٍ طال، وصبرٍ امتد، وحلمٍ كاد أن يكون بعيدًا... فأصبح حقيقة.

إلى أبي الغالي...

ذلك القلب الذي حمل عني ثقل الطريق دون أن يُظهر تعبه، إلى من كان يؤمن بي حين يخذلني خوفي، ويزرع فيّ الثقة كلما أوشكت على التراجع...هذا الإنجاز بعضٌ من عطائك الذي لا يُرد.

إلى أمي الحبيبة...

يا دعوةً لا تُرد، ويا حضنًا يسع كل انكساراتي،إلى من كانت ترفعني بدعائها حين أعجز،وتقويني بحبها دون أن تشعر...لو كان للنجاح روح، لكانت أنتِ.

إلى إخوتي...

أنتم دفء أيامي وسندي في صمتي قبل كلامي، كنتم دائمًا النور الذي يخفف عني عتمة الطريق.

إلى أساتذتي الكرام...

شكرًا لأنكم لم تكونوا مجرد ناقلين للعلم، بل كنتم قدوةً وإلهامًا، وسببًا في أن أُكمل هذا الطريق بثبات.

إلى صديقاتي...

يا من كنتن معي حين ضاق صدري، واشتد الطريق، وكنتم ضحكتي في عز التعب، ونوري في لحظات العتمة...معكم كان كل شيء أخف، وكل شيء ممكن.

إلى كل من مرّ في حياتي وترك أثرًا طيبًا،إلى كل كلمة دعم، وكل دعاء صادق،وكل لحظة وقوف بجانبي...لكم جميعًا نصيب من هذا الإنجاز.

وأخيرًا... إلى نفسي،التي خاضت معارك صامتة، ووقفت رغم التعب،وسارت رغم الخوف، ولم تستسلم...أقول لكِ: لقد فعلتِها،وما هذا إلا بداية لطريقٍ أجمل، وأوسع، وأعمق بإذن الله

قائمة المحتويات

العنوان	صفحة
شكروامتنان.....	i
الإهداء.....	ii
قائمة المحتويات.....	iii
قائمة الاشكال.....	iv
قائمة الجداول.....	vii
مقدمة عامة.....	
الفصل الأول: مراجعة حول ظاهرة تآكل المعادن	
I-1- مقدمة.....	5
I-2- تعريف التآكل.....	5
I-2-1-آلية حدوث التآكل	6
I-2-2-الجوانب الكهروكيميائية للتآكل.....	6
I-2-3-آلية التآكل الكهروكيميائي.....	7
I-3-تصنيفات التآكل	8
I-3-1- التآكل الجاف (الكيميائي).....	8
I-3-2- التآكل الرطب (الكهروكيميائي).....	8
I-4- أشكال التآكل.....	9
I-4-1- ا لتآكل المنتظم.(Uniform Corrosion)	9
I-4-2- التآكل الجلفاني (Galvanic Corrosion).....	10
I-4-3- التآكل النقري (Pitting Corrosion)	11
I-4-4- الذوبان الانتقائي (Selective eaching)	12
I-5- العوامل المؤثرة على معدل التآكل.....	13
I-5-1- I تأثير الرقم الهيدروجيني(pH).....	13
I-5-2- تأثير درجة الحرارة	13
I-5-3- تأثير المعالجة الحرارية.....	14
I-5-4-كثافة التيار الحدية.....	15
I-6 الاستقطاب وأنواعه.....	15
I-6-1 Iمفهوم الإستقطاب (Polarization)	15
I-6-2- أنواع الاستقطاب	16
I-6-3-استقطاب التنشيط (Activation Polarization)	16
I-6-4 استقطاب التركيز(Concentration Polarization)	16
I-6-5 الاستقطاب المركب (Mixed Polarization).....	17
I-7-خاتمة	17
الفصل الثاني: المعالجات الحرارية	
II-1- مقدمة	20
II-2- مفهوم المعالجات الحرارية.....	20
II-3- أنواع المعالجات الحرارية.....	22
II-3-1- التصليد.....	22

II-3-2- الآسترو مراجعة 24
II-3-3- المراجعة..... 25
II-3-4- المعادلة 27
II-4- خاتمة 29
الفصل الثالث: الجانب التطبيقي
III-1- المقدمة 33
III-2- المواد الخام الصلب منخفض الكربون 33
III-3- تحضير العينات 34
III-3-1- تطبيق المعالجة الحرارية (المراجعة) على فولاذ منخفض الكربون..... 35
III-3-2- شروط المعالجة الحرارية 35
III-4- فلورية الأشعة السينية (XRF) 37
III-4-1- مبدأ العمل 38
III-5 التركيبة المجهرية (Microstructure) 38
III-5-1- في الجانب التطبيقي..... 38
III-5-2- طريقة تحضير محلول النيتال 39
III-6- المجهر الضوئي (OM – Optical Microscopy) 39
III-6-1- مبدأ عمل المجهر الضوئي 40
III-6-2- استعمال المجهر الضوئي..... 40
III-7- الأشعة السينية XRD 40
III-7-1 مبدأ عمل جهاز الأشعة السينية..... 41
III-7-2 استعمال الأشعة السينية..... 42
III-8- قياس الصلادة Hv 42
III-8-1- مبدأ عمل جهاز قياس الصلادةHv 42
III-8-2- الجانب التطبيقي 43
III-9- قياس التآكل 44
III-9-1- مبدأ العمل جهاز الجهد الكهربائي..... 44
III-9-2 الخطوات العملية لقياس سرعة التأكل..... 45
III-10- خاتمة..... 46
الفصل الرابع : المناقشة والنتائج
IV-1- تحليل عينة الصلب الكاربوني الخام..... 48
IV-1-1-نتائج التحليل الكيميائي (XRF) 48
IV-1-2-مناقشة نتائج التحليل الكيميائي للعينة المدروسة 48
IV-2- تأثير المعالجة الحرارية على الخواص الميكانيكية 49
IV-3- نتائج اختبارات الصلادة للعينات 50
IV-3-1مناقشة نتائج الصلادة 51
IV-4- الخواص الفيزيائية 51
IV-5-المجهر الضوئي وتحديد الأطوار 52
IV-5-1 مناقشة النتائج الملاحظة في المجهر..... 54
IV-6- تحليل أطياف الأشعة السينية DRX..... 55
56

IV-6-1 مناقشة تحليل أطياف الأشعة السينيةDRX 57
IV-7- اختبار التآكل 57
IV-7-1منحنيات الاستقطاب (Polarization Curvers) 58
IV-7-2مناقشة منحنيات الاستقطاب (Polarization Curvers) 59
IV-8-استقراء تافل 63
IV-8-1 مناقشة استقراء تافل 64
IV-9- خلاصة..... 66
خاتمة عامة .....
الملخص

قائمة الاشكال

الشكل	صفحة
(1-I): صورة لأنبوب متآكل.....	5
(1-I) : تخطيط يمثل آلية التآكل على السطح المعدني.....	6
(I- 2) : التآكل المنتظم	7
(I-4) العلاقة بين الجهد وكثافة التيار، ويُستخدم لتحديد جهد التآكل وكثافة تيار التآكل.....	10
(I-5): التآكل الجلفاني.....	11
(I- 6): التآكل النقري.....	11
(I-7) : الذوبان الانتقائي	12
(I- 8) : تأثير الرقم الهيدروجيني.....	13
(I-9): تأثير درجة الحرارة.....	14
(I-10): تأثير المعالجة الحرارية	14
(I-3) : كثافة التيار الحدية.....	15
(II-1): صورة مخطط للمعالجة الحرارية	21
(II-2): صورة توضح بنية فولاذ تمت معالجته حراريا	22
(II-3): مخطط يظهر عملية التصليد.....	23
(II-4) : مخطط يظهر عملية المراجعة الحرارية	25
(II-6): منحنى الاتزان الحراري للحديد و الكربون.....	26
(II-7): رسم بياني يوضح مسارات المعالجات الحرارية لحديد الصلب.....	27
(III-1) : العينات التي تم تقطيعها على شكل مربع و العينات الدائرية.....	34
(III–2): العينات بعد ما تم ترميزها.....	35
(III–3) : فرن المعالجات الحرارية	36
(III-4) : العينات المعالجة حراريا بعد ما تم تنظيفها	36
(III-6) جهاز الأشعة السينية	37
(III-7) صورة توضح مبدأ عمل الأشعة السينية	38
(III-8) صورة للمجهر الضوئي.....	39
(III-9): جهاز الأشعة السينية DRX.....	41
(III-10): صورة توضح مبدأ عمل الأشعة السين.....	41
(III-11) صورة لجهاز الصلادة المستعمل في اختبار الصلادة	42
(III-12): صورة لعينة قبل اختبار الصلادة.....	43
(III-13): صورة لعينة بعد اختبار الصلادة	43
(III-14): جهاز الجهد الكهربائي	44
(III-15): صورة مدخلات بيانات العينة المختبرة في جهاز الكومبيتر.....	45
(IV-1): منحنى بياني لتغيرات الصلادة بدلالة درجة الحرارة.....	50
(IV-2) العينة الخام قبل النقع في محلول النيتال.....	52
(IV-3) عينة من الصلب الكربوني غير معالجة حراريا بعد نقها في محلول النيتال	53
(IV-4) : عينة معالجة في درجة حرارة 400 م لمدة ساعة.....	54
(IV-5): عينة معالجة في درجة حرارة 500 م لمدة ساعة.....	54

(6-IV) : طيف حيود الأشعة السينية للعينة الخام 55
(7-IV) : طيف حيود الأشعة السينية للعينات المعالجة حراريا للعينات..... 55
(8-IV): طيف حيود الأشعة السينية للعينات المعالجة حراريا للمستوي (110)..... 56
(9-IV): منحنى الاستقطاب لعينة فولاذ منخفض الكربون مراجعة في درجة حرارة 200℃.... 57
(10-IV): منحنى الاستقطاب لعينة فولاذ منخفض الكربون مراجعة في درجة حرارة 300℃.... 57
(11-IV): منحنى الاستقطاب لعينة فولاذ منخفض الكربون مراجعة في درجة حرارة 400℃.... 58
(12-IV): منحنى الاستقطاب لعينة لعينة فولاذ منخفض الكربون مراجعة في حرارة 500℃.... 58
(13-IV): منحنى تافل لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 200℃ 59
(14-IV): منحنى تافل لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 300℃ 60
(15-IV): منحنى تافل لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 400℃ 60
(16-IV): منحنى تافل لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 500℃ 61
(17-IV): منحنيات تافل لعينات من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجات مختلفة.... 61
(18-IV): منحنى لسرعة تآكل الفولاذ في وسط حمضي بدلالة درجة الحرارة..... 62

قائمة الجدوال

الجدول صفحة
(1-II) عمليات المعالجات الحرارية و أهم استعمالاتها..... 28
(1-III) يوضح عملية المراجعة وترتيب العينات..... 37
(1-IV) التركيب الكيميائي للعينة المدروسة..... 48
(2-IV) القيم النهائية لاختبار الصلادة..... 50
(3-IV) نتائج التجارب الكهروكيميائية لتأكل العينات في وسط حمضي..... 62

مقدمة عامة

مقدمة عامة:

التآكل هو تفاعل سطحي غير عكوس بين المادة المتآكلة وعامل مُسبب للتآكل في بيئتها(الوسط المُسبب للتآكل)، يتسبب هذا التفاعل فيتأكسد المعدن وإنتاج شكل مُختزل من العامل المُسبب للتآكل [1]. وهذا التدهور للمادة بسبب عدم استقرارها ترموديناميكيًا في تلك البيئة المسببة للتآكل مما ينتج عنه تُغير في خصائصها، مما يجعلها غير صالحة للاستخدام.

تواجه الصناعات باستمرار مشكلة تآكل المعدات، مما يؤدي إلى زيادة تكاليف التشغيل نتيجةً لتوقف الإنتاج أو الصيانة أو استبدال المنشآت المعيبة. ويؤثر ذلك أيضًا على موثوقية المعدات وسلامة مستخدميها. وأخيرًا، قد تسبب مشاكل التآكل غير المُدارة بشكل جيد تلوث بيئيا

استناداً إلى مصادر علمية موثوقة، تقدر الخسائر الاقتصادية المتعلقة بالتآكل في جميع أنحاء العالم بنحو 2.5 تريليون دولار أمريكي سنويا أي ما يعادل 3.4% من الناتج المحلي الإجمالي العالمي. (2013).

تشير التقديرات إلى أن التآكل مسؤول عن خسارة ربع إنتاج الصلب العالمي، أي ما يعادل 150 مليون طن سنويًا، أو 5 أطنان في الثانية. كما يؤدي إلى خسارة مباشرة أو غير مباشرة تتراوح بين 4 و5% من الناتج المحلي الإجمالي للدول الصناعية (الولايات المتحدة الأمريكية، والاتحاد الأوروبي، واليابان، والمملكة المتحدة) [2]،

في غياب إحصائيات رسمية محدثة حول تكلفة خسائر التآكل في الجزائر،فإنه خلال أيام الدراسة التي نظمتها وزارة الأشغال العامة عام 2002 حول موضوع "تآكل المنشآت"، والتي كان الهدف منها وضع خريطة وطنية للمنشآت المتأثرة بهذه الظاهرة، أفاد الخبراء بأن تكلفة التآكل في الجزائر بما بين 4 و5% من الناتج المحلي الإجمالي.

بالرغم من هذه الإحصائيات لا يعد التآكل اليوم مشكلة غير قابلة للحل. إذ تشير التقديرات إلى إمكانية تجنب ما بين 15% إلى 35% من الخسائر الناجمة عن التآكل من خلال تطبيق ممارسات رقابة وحماية بسيطة نسبيًا [3]

في صناعة النفط والغاز تحديدا تُستخدم عدة تقنيات للتحكم في التآكل، مثل إضافة مثبطات التآكل الكيميائية إلى الوسط المسبب للتآكل، وتطبيق الحماية الكاثودية، وتطبيق طلاءات عضوية على سطح المادة، وتعريض المادة للمعالجة الحرارية. وتركز جميع هذه الطرق على إحدى الاستراتيجيات التالية:

تغيير خصائص الوسط المسبب للتآكل، أو إنشاء حاجز بين المادة وبيئتها، أو تعزيز مقاومة المادة للتآكل. تُضاف مثبطات التآكل عادةً إلى البيئات لمنع تلف أنابيب الصلب الكربوني. وتُشكّل التفاعلات الكيميائية أو الكهروكيميائية بين المثبطات والبيئة طبقة رقيقة واقية على سطح المعدن. كما تُغيّر المثبطات خصائص الوسط المُسبّب للتآكل، مما يجعله أقلّ حدّةً وبالتالي يحمي المعدن. مع ذلك، تتضاءل فعالية المثبط مع ارتفاع درجة الحرارة أو انخفاض تركيزه.

الذي يُمكن تحسين سلوك التآكل والخواص الميكانيكية للمعادن والسبائك من خلال المعالجات الحرارية، التي تتضمن تسخين المعدن وتبريده على مدى فترة زمنية معينة. ومن بين المعالجات الحرارية، تُستخدم عملية المراجعة على نطاق واسع لتقليل الإجهاد المتبقي، وتحسين سلوك التآكل. إذ يُسخّن المعدن إلى درجة حرارة أقل من نقطته الحرجة لفترة زمنية محددة، ثم يترك ليُبرّد، في الهواء [6][7].

دراستنا تندرج في هذا الإطار، إذ تهدف إلى معالجة مشكلة التآكل التي ظهرت في أنابيب الصلب منخفض الكاربون المستخدمة في عملية حقن المياه في حقل بركاوي النفطي للمحافظة على إنتاج مستقر للمحروقات. هذه الأنابيب عرفت تأكل حاد بسبب تغير مياه الحقن المستخرجة من الخزان الجوفي الجوراسي بأخرى مستخرجة من أبار طبقة الالبيان مما أدى إلى تقلص ملحوظ في عمرها الافتراضي للاستعمال.

وتتمحور إشكالية البحث حول ما مدى تأثير درجة حرارة المراجعة على سلوك التآكل أنابيب الصلب منخفض الكربون في وسط مياه أبار الالبيان.

بالإضافة إلى هذه المقدمة التي أبرزنا فيه الهدف وإشكالية البحث، تنقسم دراستنا هذه إلى أربع فصول:

في الفصل الأول: نتطرق إلى مراجعة عامة حول ظاهرة تآكل المعادن، حيث نعرض المفاهيم الأساسية للتآكل من الجانب الكهروكيميائية، مع تصنيف أنواعه وأشكاله والعوامل المؤثرة على معدلته.

أما في الفصل الثاني: فنخصصه لدراسة المعالجات الحرارية، حيث نتناول مفهومها وأنواعها مع التركيز على عملية المراجع

أما الفصل الثالث المتمثل في الجانب التطبيقي، فسنتطرق إلى عرض الاختبارات والتقنيات التحليلية المطبقة على عينات الفولاذ منخفض الكربون المعالج إضافة إلى اختبارات التآكل والاستقطاب، وذلك لدراسة تأثير المعالجات الحرارية على سلوكه.

أما في الفصل الرابع: فنخصصه لعرض النتائج نتائج الاختبارات المختلفة مثل الصلادة والتآكل، مع مناقشتها تفسيرها.

وأخيرًا نختم دراستنا بخاتمة تتضمن استخلاص أهم استنتاجات وتوصيات البحث الذي أنجزناه.

وفي ظل عدم توفر إحصائيات دقيقة حول حجم الضرر الذي تخلفه مشكلة التآكل في القطاع الصناعي على الاقتصاد الجزائري، خصوصا على مستوى القطاع النفطي الذي يمثل ما نسبته 97 % من دخل البلاد من العملة الصعبة. ارتأينا أن تكون لنا مساهمة في هذا الإطار.

إذ تهدف إلى بحث تأثير المعالجة الحرارية بالتطبيع على سلوك التآكل لأنابيب الصلب الكربوني منخفض الكاربون المستخدمة في عملية حقن المياه في حقل بركاوي النفطي (الواقع جنوب الجزائر) ,إذ تُعدّ هذه التقنية الأكثر فعالية من حيث التكلفة للحفاظ على معدلات إنتاج مستقرة لاسيما في الآبار القريبة من النضوب. وتتضمن هذه الطريقة ضخ الماء المضغوط إلى المكمن عبر آبار الحقن لدفع ما تبقى من النفط الخام أو الغاز داخل مسام التكوين باتجاه آبار الإنتاج. وتربط خطوط أنابيب حقن الماء (WIPs) المرافق السطحية، مثل محطات معالجة المياه ومحطات الضخ وخزانات التخزين، بآبار الحقن

الفصل الأول:
مراجعة حول ظاهرة تآكل المعادن

I -1- مقدمة :

يعد التآكل من الظواهر الطبيعية التي تؤدي إلى تدهور المواد المعدنية نتيجة تفاعلها مع الوسط المحيط بها، مما يسبب تغييرا تدريجيا في خواصها الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية. وتحدث هذه الظاهرة غالبا نتيجة تفاعلات كهر وكيميائية بين المعدن والعوامل البيئية مثل الرطوبة والأكسجين والمواد الكيميائية المختلفة، الأمر الذي يؤدي في النهاية لفقدان المعدن لجزء من كتلته أو ضعف بنيته.

ويظهر التآكل في عدة أشكال تبعا لطبيعة المعدن والظروف البيئية المحيطة به، مثل التآكل العام، والتآكل الموضعي والتآكل الجلفاني، إضافة إلى أنواع أخرى مرتبطة بظروف التشغيل المختلفة. لذلك فإن فهم آلية حدوث التآكل والعوامل المؤثرة فيه تعد خطوة أساسية من أجل تطوير طرق فعالة للوقاية منه وتقليل تأثيراته السلبية.

I -2- تعريف التآكل :

يعرف التآكل بأنه ظاهرة طبيعية تؤدي إلى تدهور المواد وخاصة المعادن نتيجة تفاعلها مع الوسط المحيط، سواء كان هواءً أو ماءً أو محاليل كيميائية. ويُلاحظ أن هذه الظاهرة لا تقتصر على المعادن فقط، بل يمكن ان تمس مواد أخرى مثل البلاستيك والسيراميك، إلا أن تأثيرها يظهر أكثر وضوحا وتعقيداً في المعادن والسبائك المعدنية.

الشكل (I-1): صورة لأنبوب متآكل

ويُعد التآكل عملية تلقائية، أي أنه يحدث دون تدخل خارجي مستمر، وذلك لأنه مرتبط بانخفاض الطاقة الحرة للنظام، حيث تميل المواد للوصول إلى حالة أكثر استقراراً تيرموديناميكياً . وغالباً ما يتم هذا التحول عبرفاعلات

كيميائية أو كهروكيميائية بين المعدن وبيئته، تؤدي في النهاية إلى تحويله من حالته الأولية إلى مُركبات أكثر ثباتاً، مثل الأكسيد أو الهيدرو كسيدات. [1].[5].[7].

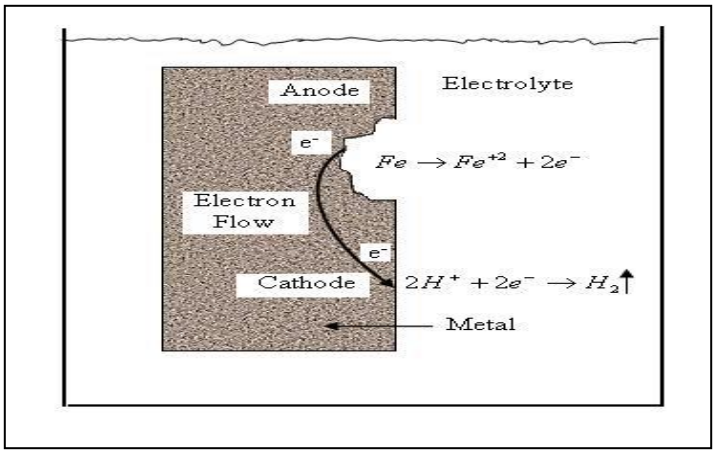
I -2-1-آلية حدوث التآكل :

ينشأ التآكل نتيجة عدم الاستقرار التيرموديناميكي للمعادن في حالتها النقية، إذ تميل تلقائياً إلى التحول نحو حالة أكثر استقراراً، مماثلة لتلك التي توجد عليها في الطبيعة وذلك بهدف تخفيض طاقتها الحرة للنظام.

ويتم التآكل غالباً عبر تفاعلات كهر وكيميائية تحدث عند سطح المعدن، حيث يتأكسد المعدن في مناطق تدعى الأنود فيفقد إلكترونات وفق العلاقة:

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^{-} \qquad (1)$$

بالمقابل، تستهلك هذه الإلكترونات في تفاعلات اختزال تحدث في مناطق أخرى (كاثود)، مثل اختزال الأكسجين في وجود وسط رطب. وينتج عن هذا التفاعل المتكامل تكون نواتج التآكل على سطح المعدن.[6].



الشكل (I-1) : تخطيط يمثل آلية التآكل على السطح المعدني

وبالتالي فإن التآكل هو نتيجة مباشرة لتفاعل المعدن مع الوسط المحيط به، سواء كان وسطاً غازياً أو سائلاً، ويُعد من العمليات غير العكوسة التي تؤدي تدريجياً إلى تدهور خواص المادة.

I -2-2- الجوانب الكهروكيميائية للتآكل :

يقصد بالجوانب الكهرو كيميائية للتآكل تفسير هذه الظاهرة اعتمادًا على مبادئ الكيمياء الكهربائية، أي من خلال دراسة التفاعلات التي يحدث فيها انتقال للإلكترونات بين مناطق مختلفة من سطح المعدن [12]. وعند وجود المعدن في وسط يحتوي على رطوبة أو محلول قادر على توصيل التيار الكهربائي، تتكون على

سطحه مناطق تختلف في نشاطها الكهروكيمائي، حيث تعمل هذه المناطق كأنود (Anode) يفقد فيه المعدن إلكترونات ويتحول إلى أيونات معدنية في الوسط المحيط، وهي العملية التي تمثل بداية التآكل الفعلي [13].

في المقابل توجد مناطق أخرى تعمل ككاثود (cathode)تستقبل هذه الإلكترونات تفاعلات اختزال ، مثل اختزال الأكسجين المذاب في الماء [14]. ونتيجة لانتقال الإلكترونات داخل المعدن وانتقال الأيونات في الوسط المحيط تتشكل خلية كهروكيميائية تؤدي تدريجيا إلى تآكل المعدن.

I -2-3- آلية التآكل الكهروكيميائي:

تفسر ظاهرة التآكل الكهروكيميائي للمعادن من خلال تفاعلات الأكسدة و الإرجاع التي تحدث على سطح المعدن، حيث تتم هذه العملية على مرحلتين متتاليتين تمثلان التفاعل الأنودي و التفاعل الكاثودي ، و اللتين تؤديان في النهاية إلى تدهور المعدن وتآكله [3].

- **المرحلة الأولى**:تتمثل هذه العملية في تفاعل الأكسدة التي يحدث عند المصعد بشكل تلقائي، حيث تفقد ذرات المعدن إلكترونات التكافؤ الخاصة بها، فتتحول نتيجة ذلك إلى أيونات موجبة [3].

تفاعل التأكسد المصعدي: قطب الأنود

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^{-} \qquad (2)$$

- **المرحلة الثانية :** الإرجاع المهبطي هو عملية تلقائية يلتقط فيها سطح المعدن الإلكترونات المفقودة أثناء الأكسدة، ويختلف مصدر هذه الإلكترونات بحسب الوسط: أيونات الهيدروجين في الوسط الحمضي، والأكسجين المذاب في الوسط المعتدل، ما يوضح تأثير طبيعة الوسط على التفاعل الكهروكيميائي.
- **تفاعل الإرجاع المهبطي:الكاثود** :

إذا كان الوسط حمضيا:

$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2 \qquad (3)$$

وإذا كان معتدلا :

$$H_2O + ½\ O_2 + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-} \qquad (4)$$

وكمثال تطبيقي عن عملية صدأ الصلب ماهي إلا تفاعل أكسدة /إرجاع لعنصر الحديد عند تعرضه لوسط رطب حامضي ، وتحول الحديد إلى صدأ كالتالي :

- **تفاعل الأكسدة عند الأنود :**

$$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^{-} \qquad (5)$$

تنتقل الإلكترونات خلال هذا التفاعل إلى الكاثود من خلال سطح الحديد حتى تتفاعل مع البروتونات كالتالي:

- عند الكاثود:

$$2H^{+} + 2e \rightarrow H_2 \qquad (6)$$

كما يمكننا اختصار المعادلتين أنود وكاثود في معادلة واحدة فتكون كالآتي:

$$Fe + 2H \rightarrow Fe^{+2} + H_2 + 2e \qquad (7)$$

I -3- تصنيفات التآكل :

يمكن تصنيف التآكل اعتمادا على طبيعة الوسط الذي يحدث فيه ونوع التفاعلات المسؤولة عنه. وبناءً على ذلك يقسم التآكل عادة إلى نوعين رئيسيين هما التآكل الجاف (الكيميائي) و التآكل الرطب (الكهروكيميائي)

ويعتمد هذا التقسيم أساساً على وجود أو غياب وسط كهروليتي قادر على نقل الشحنات الكهربائية. إذ تختلف آية حدوث التآكل تبعًا لهذه الظروف. ففي غياب الوسط الكهروليتي يحدث التآكل نتيجة تفاعلات كيميائية مباشرة. بينما في وجوده تتم العملية عبر تفاعلات كهروكيميائية تشمل انتقال الإلكترونات بين مناطق مختلفة من سطح المعدن [14].

I-3-1- التآكل الجاف (الكيميائي) :

يعرف التآكل الجاف بأنه تفاعل كيميائي مباشر يحدث بين سطح المعدن والوسط المحيط به من غازات أو سوائل كهروليتية، دون تدخل محلول ناقل للتيار الكهربائي.

وغالبا ما يحدث هذا النوع من التآكل عند درجات الحرارة المرتفعة، حيث تتفاعل المعادن مع الغازات الموجودة في الوسط مثل الأكسجين أو الكبريت. وينتج عن هذه التفاعلات تكون طبقات من الأكسيد أو المركبات الكيميائية على سطح المعدن ، وقد تكون هذه الطبقات في بعض الحالات واقية فتحد من استمرار التآكل بينما قد تكون مسامية أو غير مستقرة مما يسمح باستمرار تدهور المعدن [14].

I-3-2- التآكل الرطب (الكهروكيميائي):

التآكل الرطب يحدث عندما يكون المعدن في تماس مع وسط كهروليتي مثل الماء أو المحاليل المائية. وفي هذه الحالة يتم التآكل نتيجة تفاعلات كهروكيميائية تتضمن عمليتي الأكسدة والإرجاع. حيث تفقد ذرات المعدن إلكترونات عند مناطق معينه من سطحه تسمى المصعد، فتتحول إلى أيونات موجبة تنتقل إلى الوسط

المحيط، بينما تكتسب الإلكترونات المحررة في مناطق أخرى تسمى المهبط بواسطة مواد موجودة في الوسط مثل أيونات الهيدروجين والأكسجين المذاب في الماء .ويعد هذا النوع الأكثر انتشارا في الطبيعة ، إذ يحدث في المنشآت المعدنية المعرضة للرطوبة أو المياه مثل الأنابيب والهياكل المعدنية[12].

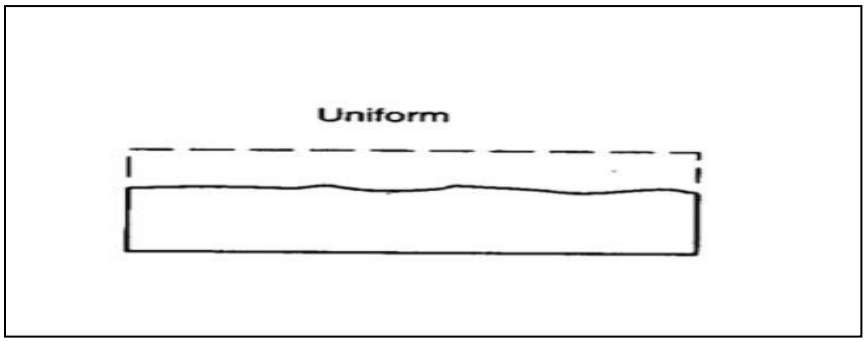
I-4- أشكال التآكل :

I-4-1- التآكل المنتظم (Uniform Corrosion) :

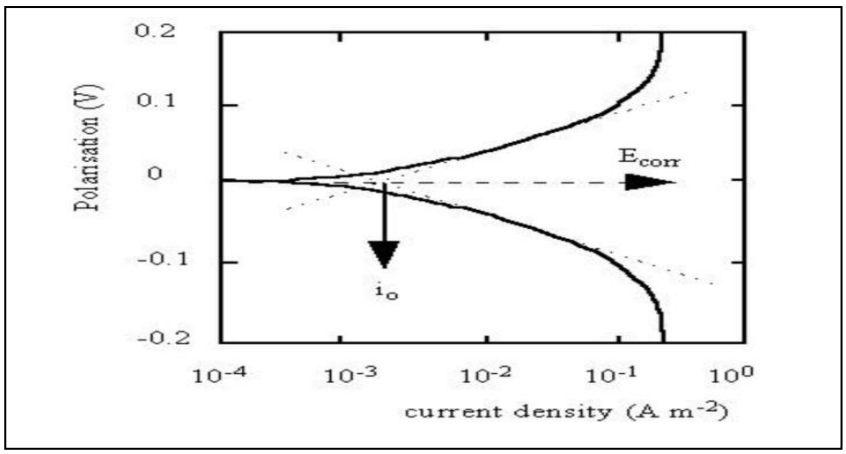
يُعد التآكل المنتظم أبسط أشكال التآكل وأكثرها شيوعًا، حيث يحدث فقدان المعدن بصورة متجانسة على كامل سطحه المعرض للوسط المتآكل. ويُفسَّر هذا النوع من التآكل من منظور كهر وكيميائي على أنه نتيجة تفاعل أكسدة-اختزال موزع بانتظام، بحيث تعمل جميع مناطق السطح تقريبًا كأقطاب أنودية و كاثودية في آنٍ واحد، دون وجود فروق جهد كبيرة بينها.

في هذا النمط، تتأكسد ذرات المعدن وتتحول إلى أيونات موجبة وفق تفاعل أكسدة عام، بينما تُختزل المواد المؤكسدة (مثل الأكسجين أو شوارد الهيدروجين) على سطح المعدن. ويؤدي ذلك إلى تناقص تدريجي في سمك المعدن يمكن التنبؤ به بدقة، وهو ما يجعل هذا النوع أقل خطورة مقارنة بباقي الأنواع من حيث المفاجأة، لكنه يبقى مضرًا من حيث الاستمرارية الاقتصادية والصناعية [1].

من الناحية التطبيقية، يظهر هذا التآكل في الأنابيب، الخزانات، والهياكل المعدنية المعرضة لبيئات متجانسة مثل المياه أو الأجواء الرطبة. ويُعتمد في تقييمه على معدلات الفقد الكتلي أو معدل التآكل السنوي.[4] . (mm/year)وهو ما يسمح بتحديد عمر الخدمة المتوقع للمنشأة كما أن هذا النوع من التآكل يتأثر بشكل مباشر بتركيب الوسط (الحموضة، الأكسجين المذاب) وكذلك بدرجة الحرارة، ما يجعله قابلًا للتحكم نسبيًا باستخدام الطلاءات الواقية أو المثبطات الكيميائية.[5]



الشكل (I- 2) : التآكل المنتظم



الشكل (I. 4) العلاقة بين الجهد وكثافة التيار، ويُستخدم لتحديد جهد التآكل وكثافة تيار التآكل

I-4-2- التآكل الجلفاني (Galvanic Corrosion) :

ينشأ التآكل الجلفاني عند تماس معدنين مختلفين كهروكيميائيًا في وجود إلكتروليت، حيث يتشكل زوج جلفاني يعمل فيه المعدن الأقل نبالة كأنود (يتآكل)، بينما يعمل المعدن الأكثر نبالة ككاثود محمي نسبيًا.

يعتمد هذا النوع على فرق الجهد الكهروكيميائي بين المعدنين، والذي يؤدي إلى انتقال الإلكترونات من المعدن الأنودي إلى الكاثودي. ويُسرّع هذا التفاعل من تآكل المعدن الأنشط، خصوصًا إذا كانت مساحة الكاثود أكبر من مساحة الأنود، مما يزيد كثافة التيار على سطح الأنود [2].

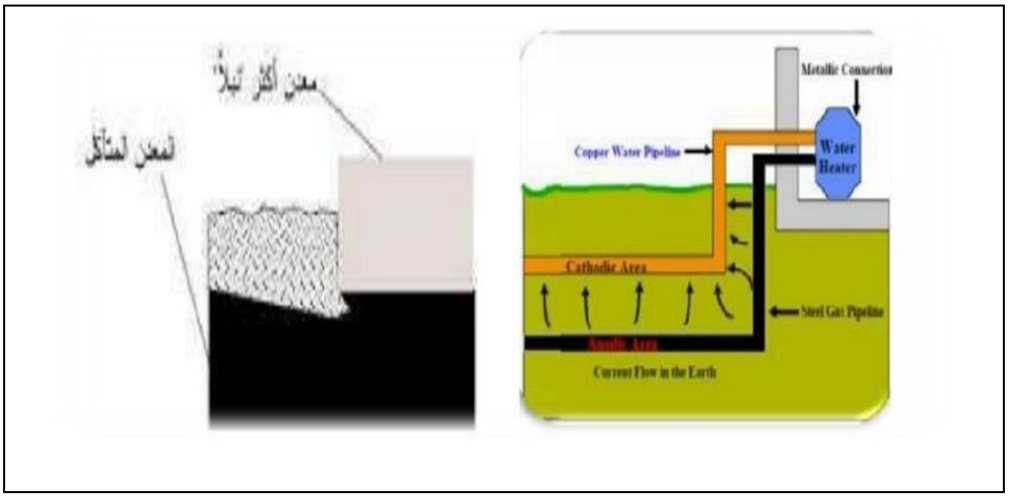
تظهر هذه الظاهرة بوضوح في المنشآت البحرية، أو عند ربط معادن مختلفة مثل الحديد والنحاس. ويُلاحظ أن شدة التآكل تعتمد على عدة عوامل منها:

1- فرق الجهد بين المعدنين.

2- نسبة المساحات السطحية.

3- طبيعة الوسط الناقل (الناقلية الكهربائية).

وتُستخدم هذه الظاهرة بشكل إيجابي في أنظمة الحماية الكاثودية، حيث يتم التضحية بمعدن أكثر نشاطًا (كالزنك) لحماية معدن آخر (كالحديد) [4].



الشكل(I-5): التآكل الجلفاني

I -3-4- التآكل النقري (Pitting Corrosion)

يُعد التآكل النقري من أخطر أنواع التآكل، رغم أنه قد لا يكون ملحوظًا في البداية. يتميز بحدوث تآكل موضعي على شكل حفر صغيرة (نقر) تخترق المعدن بعمق، بينما يبقى باقي السطح سليمًا نسبيًا.

الشكل (I- 6): التآكل النقري

ينشأ هذا النوع غالبًا نتيجة انهيار الطبقة السلبية (Passive film) التي تحمي المعدن، خاصة في وجود شوارد الكلوريد. فعند حدوث خلل موضعي في هذه الطبقة، يتشكل موقع أنودي صغير داخل النقرة، بينما يصبح باقي السطح كاثوديًا، مما يؤدي إلى تسارع التآكل داخل الحفرة بسبب زيادة كثافة التيار [6].

تتفاقم هذه الظاهرة نتيجة تراكم نواتج التآكل داخل النقرة، مما يؤدي إلى زيادة الحموضة محليًا وبالتالي تسريع عملية الذوبان المعدني وانخفاض قيمة خطورة هذا النوع تكمن في صعوبة اكتشافه قبل حدوث فشل مفاجئ، خصوصًا في الخزانات والأنابيب [7].

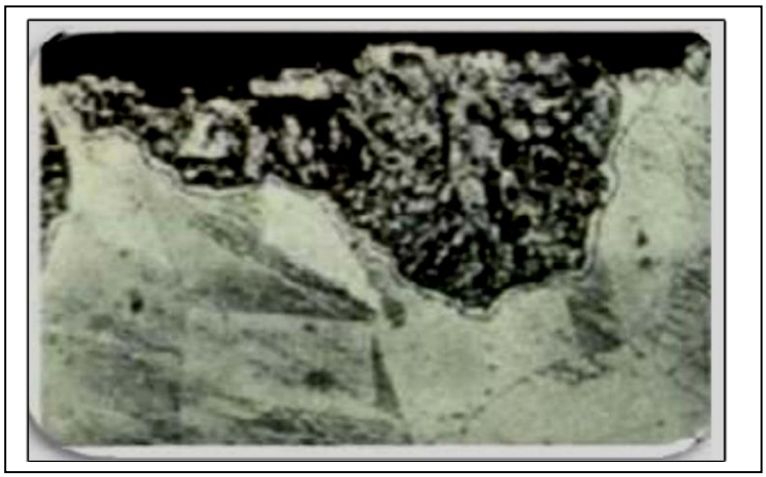
I -4-4- الذوبان الانتقائي (SelectiveLeaching):

يشير الذوبان الانتقائي إلى إزالة أحد مكونات السبيكة بشكل انتقائي، مع بقاء المكونات الأخرى، ومن أشهر الأمثلة على ذلك:

- نزع الزنك من النحاس الأصفر(Dezincification)
- نزع الحديد من بعض السبائك

يحدث هذا النوع نتيجة اختلاف النشاط الكهروكيميائي بين مكونات السبيكة، حيث يذوب العنصر الأكثر نشاطًا تاركًا بنية مسامية ضعيفة [1].

وتكمن خطورته في أنه لا يُلاحظ بسهولة، إذ يحتفظ المعدن بشكله العام، لكنه يصبح هشًا وقابلًا للكسر تحت إجهاد بسيط [10].



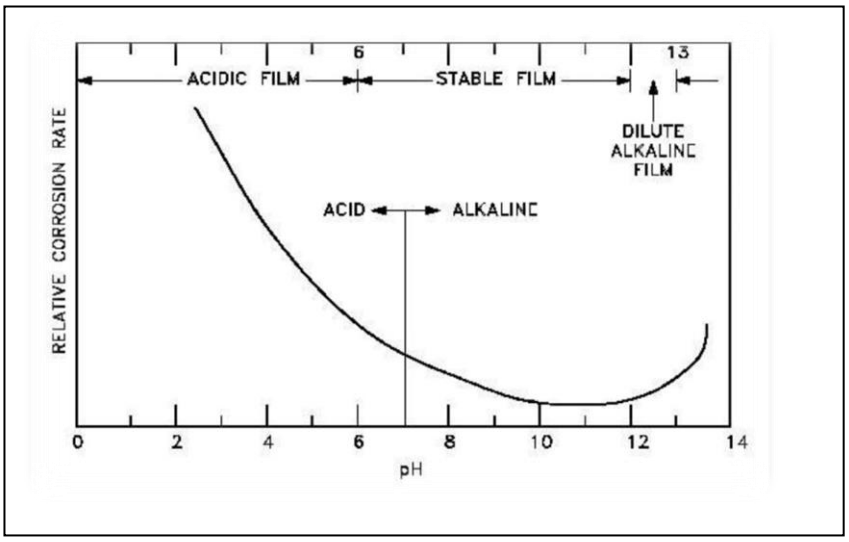
الشكل (I-7) : الذوبان الانتقائي

I-5- العوامل المؤثرة على معدل التآكل :

I -5-1- تأثير الرقم الهيدروجيني (pH):

يُعد الرقم الهيدروجيني من أهم العوامل المؤثرة في التآكل، حيث يحدد طبيعة التفاعلات الكهروكيميائية على سطح المعدن. في الأوساط الحمضية، تزداد سرعة التآكل نتيجة توفر شوارد الهيدروجين التي تعمل كمؤكسد قوي، مما يسرّع التفاعل الكاثودي.

أما في الأوساط القاعدية، فقد تتكون طبقات واقية (مثل أكاسيد المعادن) تقلل من معدل التآكل، خاصة في حالة المعادن مثل الألمنيوم والحديد [2].



الشكل (I- 8) : تأثير الرقم الهيدروجيني

I-5-2- تأثير درجة الحرارة

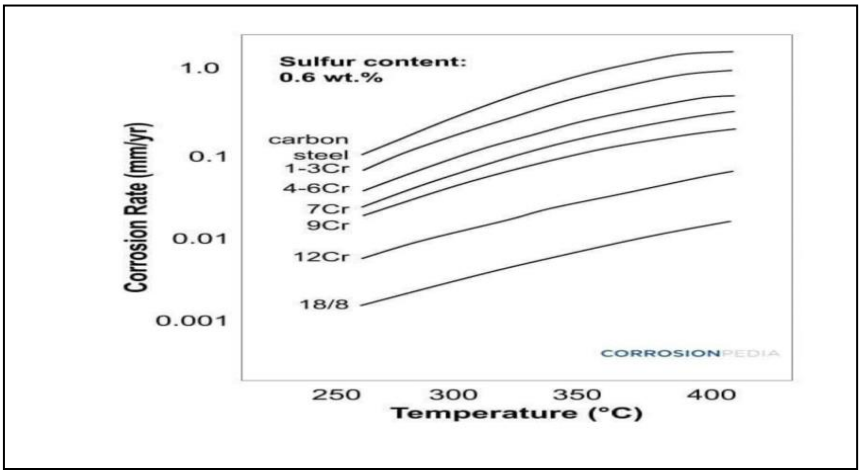
تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تسريع التفاعلات الكيميائية وفق قانون أرينيوس، مما يزيد من معدل التآكل. كما تؤثر على:

1- زيادة ذوبانية الأكسجين

2- زيادة حركة الأيونات

3- تسريع انهيار الطبقات الواقية

وقد ثبت أن معدل التآكل قد يتضاعف مع كل ارتفاع بمقدار 10 درجات مئوية تقريبًا [15].



الشكل (I -3): تأثير درجة الحرارة

I -5 -3- تأثير المعالجة الحرارية

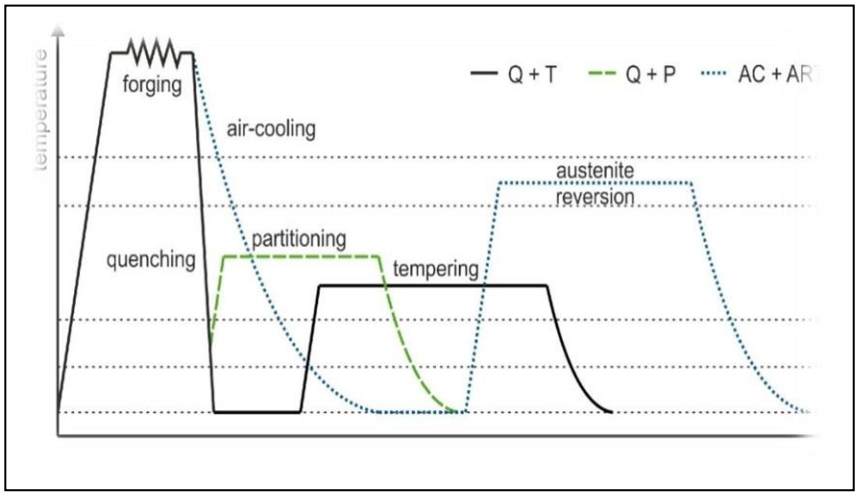
تلعب المعالجة الحرارية دورًا مهمًا في تغيير البنية المجهرية للمعدن، مما يؤثر على مقاومته للتآكل. فقد تؤدي بعض المعالجات إلى:

1- تكوين أطوار غير متجانسة

2- زيادة الإجهادات الداخلية

3- تحفيز التآكل بين الحبيبات

بينما قد تحسن معالجات أخرى من مقاومة التآكل عبر تجانس البنية [16].

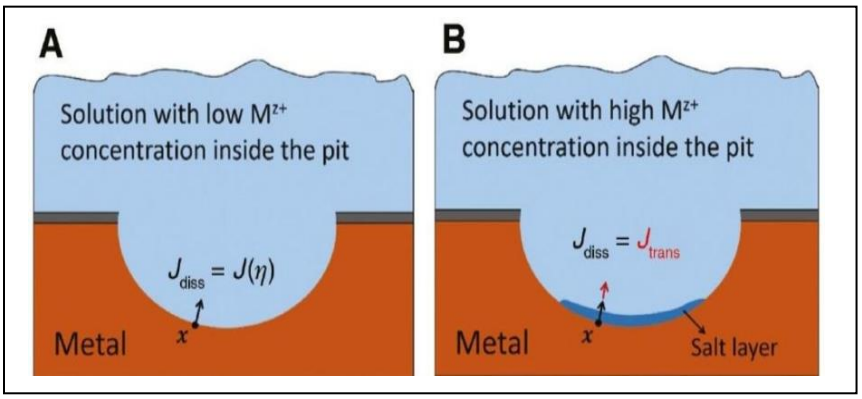


الشكل (I- 4): تأثير المعالجة الحرارية

I -5-4-كثافة التيار الحدية

تمثل كثافة التيار الحدية أقصى قيمة يمكن أن يصل إليها التيار الكهروكيميائي في نظام معين، وتكون مرتبطة بانتقال المادة.(Mass Transport)

عند الوصول إلى هذه القيمة، يصبح معدل التفاعل محدودًا بانتشار المواد المتفاعلة، وليس بالتحفيز السطحي، مما يؤدي إلى نوع من الاستقرار النسبي في معدل التآكل [6].



الشكل (I-5) : كثافة التيار الحدية

I -6- الاستقطاب وأنواعه :

I -6-1-مفهوم الإستقطاب (Polarization) :

يُعدّ الاستقطاب من المفاهيم الأساسية في دراسة التآكل الكهروكيميائي، حيث يعبّر عن انحراف جهد القطب عن قيمته التوازنية نتيجة مرور تيار كهربائي عبر واجهة المعدن/المحلول. فعند حدوث تفاعل أكسدة أو اختزال، لا يبقى الجهد عند قيمته الثرموديناميكية، بل يتغير بفعل العوامل الحركية وانتقال الكتلة، وهو ما يُعرف بظاهرة الاستقطاب [1][10].

ويمثل الاستقطاب مقياساً لمقاومة التفاعل الكهروكيميائي، حيث إن زيادة قيمته تدل على وجود عوائق تحدّ من سرعة التفاعل، سواء كانت هذه العوائق مرتبطة بسطح المعدن أو بخصائص الوسط المحيط [11]. ويُعبّر عنه عادةً بالفرق بين الجهد الفعلي والجهد التوازني(η) ، وهو ناتج عن تداخل عدة عوامل منها طبيعة المعدن، سرعة التفاعلات الجزئية، وظروف الانتقال داخل المحلول [14].

I-6-2- أنواع الاستقطاب :

يمكن تصنيف الاستقطاب إلى عدة أنواع رئيسية وفقاً للآلية المسيطرة على التفاعل، وأهمها: استقطاب التنشيط، استقطاب التركيز، والاستقطاب المركب، حيث تمثل هذه الأنواع الأساس في تفسير الظواهر الكهروكيميائية المرتبطة بالتآكل [2] [12].

I -6-2-1- استقطاب التنشيط (Activation Polarization):

ينشأ استقطاب التنشيط نتيجة بطء التفاعلات الكهروكيميائية على سطح القطب، إذ يتطلب انتقال الشحنات عبر الواجهة تجاوز حاجز طاقي يُعرف بطاقة التنشيط. وبالتالي، فإن زيادة التيار تستلزم زيادة في الجهد لتسريع التفاعل [3][14].

ويرتبط هذا النوع من الاستقطاب بالعوامل الحركية، مثل طبيعة سطح المعدن، حالته الفيزيائية والكيميائية، ودرجة الحرارة، إضافة إلى وجود مواد محفزة أو مثبطة [4].

كما يُوصف هذا السلوك عادةً بعلاقة لوغاريتمية بين التيار والجهد، كما هو الحال في معادلة تافل، والتي تُستخدم بشكل واسع في تحليل بيانات التآكل [15].

ومن التطبيقات العملية لهذا النوع، تفاعلات انحلال المعادن واختزال الأكسجين، حيث يكون معدل التفاعل محكوماً بسرعة انتقال الإلكترونات عبر السطح، مما يجعل استقطاب التنشيط عاملاً أساسياً في تحديد معدل التآكل [16].

I-6-2-2- استقطاب التركيز (Concentration Polarization):

يظهر استقطاب التركيز عندما يحدث اختلاف في تركيز المواد المتفاعلة أو النواتج بين سطح القطب وبقية المحلول، نتيجة عدم كفاية سرعة الانتقال الكتلي لتعويض المواد المستهلكة أو إزالة النواتج [5].

ويؤدي هذا التدرج في التركيز إلى تقليل معدل التفاعل، وبالتالي زيادة الاستقطاب. ومن أبرز الأمثلة على ذلك نقص الأكسجين بالقرب من سطح المعدن في الأوساط المائية، أو تراكم الأيونات المعدنية الناتجة عن التآكل [6][13].

ويخضع هذا النوع من الاستقطاب لقوانين الانتشار، حيث يصبح التفاعل محدوداً بسرعة انتقال المواد داخل المحلول، وعند حد معين يصل التيار إلى قيمة قصوى تُعرف بالتيار المحدود، حيث لا يمكن زيادة سرعة التفاعل رغم زيادة الجهد [14].

كما يمكن تقليل هذا النوع من الاستقطاب من خلال تحسين ظروف الانتقال الكتلي، مثل التحريك أو زيادة درجة الحرارة، مما يساهم في تقليل التدرجات التركيزية [7].

I-6-2-3- الاستقطاب المركب (Mixed Polarization):

في الأنظمة الواقعية، غالباً ما تتداخل آليات الاستقطاب المختلفة، بحيث لا يمكن فصل تأثير كل نوع بشكل مستقل، وهو ما يُعرف بالاستقطاب المركب [8].

في هذه الحالة، يتحدد سلوك النظام من خلال التوازن بين التفاعلات الأنودية والكاثودية، حيث يتم تحديد جهد التآكل ومعدل التآكل عند نقطة تقاطع منحنيات الاستقطاب الخاصة بكل منهما [9][15].

ويأخذ هذا النوع في الاعتبار تأثير كل من استقطاب التنشيط واستقطاب التركيز، إضافة إلى مقاومة الوسط، مما يجعله أكثر تمثيلاً للسلوك الحقيقي للأنظمة الكهروكيميائية [14].

وتُستخدم منحنيات الاستقطاب في تحليل هذا النوع من السلوك، حيث تسمح بتحديد آلية التفاعل المسيطرة، وتقييم تأثير العوامل المختلفة مثل تركيب الوسط أو وجود المثبطات [16].

I-7- خاتمة

في ختام هذا الفصل، تم تقديم عرضٍ نظري منهجي لظاهرة التآكل بوصفها عملية فيزيائية–كيميائية معقّدة تتحكم فيها تفاعلات كهروكيميائية تحدث على سطح المعدن بتأثير الوسط المحيط. وقد تم إبراز المفاهيم الأساسية المؤطرة لهذه الظاهرة، مع تحليل آلياتها المختلفة التي تفسّر انتقال المادة من الحالة المعدنية إلى مركّبات أكثر استقرارًا، وما يترتب عن ذلك من تدهور تدريجي في الخواص الوظيفية للمادة.

كما تم استعراض التصنيفات الرئيسة للتآكل، سواء من حيث طبيعته (جاف/رطب) أو من حيث أشكاله (منتظم، موضعي، وغيرها)، مع توضيح الخصائص المميزة لكل نمط والعوامل التي تساهم في ظهوره وتطوره. وفي هذا السياق، تم التركيز على العوامل المؤثرة في معدل التآكل، وعلى رأسها درجة الحموضة، ودرجة الحرارة، وتركيب الوسط التآكلي، لما لها من دور حاسم في تسريع أو إبطاء التفاعلات الكهروكيميائية.

وقد بيّن هذا العرض أن التآكل ظاهرة متعددة العوامل، تتداخل فيها الخصائص الداخلية للمعدن مع الظروف الخارجية المحيطة به، مما يستدعي مقاربة تحليلية شاملة لفهم سلوكه والتنبؤ بتطوره.

وعليه، فإن الإحاطة الدقيقة بهذه الجوانب النظرية تمثل أساسًا علميًا ضروريًا لأي دراسة تطبيقية لاحقة تهدف إلى تقييم سلوك المواد المعدنية في أوساط تآكلية مختلفة.

وبذلك، يوفّر هذا الفصل قاعدة معرفية رصينة تمكّن من الانتقال إلى المراحل اللاحقة من الدراسة على أسس علمية دقيقة ومنهجية واضحة.

المراجع بالعربية:

[1]: د.عيسى بغني أساسيات هندسة التآكل 2006/7029،دار الكتب الوطنية –ليبيا 2006.
[2]: د.عمر بن عبد الله الهزازي الكيمياء الكهربائية ،
[3]: عبد القادر بن منين ، أطروحة دكتوراه جامعة ورقلة 2018 étude de L' effect inhibitrice des extrais de plantes sur la corrosion de l'acier Cx52 (page 20,29).
[4]: مهند محمد بابكر محمد أحمد ، تقييم و تحكم نام الحماية الكاثودي لأنابيب النفط الخام ، مذكرة ماجستير ، جامعة البحر الأحمر ، 2019.(ص18-19).
[5]: د.دغموش مسعودة تحضير وتحديد الخصائص الفيزيوكيميائية لبعض مركبات ثنائي ثيول ثيون و أملاحها المرافقة لتطبيق فعاليتها التثبيطية في دراسة تآكل المعادن ، أطروحة دكتوراه ورقلة جامعة قاصدي مرباح ، 2014،(ص2-9).
[6]: عادل عبده الزهراء رشق السعدي ،جامعة القادسية ، دراسة منحنيات الاستقطاب للصلب الكربوني في الوسط الحمضي ،العراق مذكرة ماجستير 2016.
[7]: أحلام الجوجة دراسة التآكل الحديد وكيفية الحماية منه بإستخدام طرائق كيميائية و كهربائية ، مذكرة ماجستير سوريا جامعة البعث (ص19-27).
[8]: غيلاني مريم دراسة فاعلية نبات الشريك ضد التآكل بطريقة انخفاض الكتلة و الطريقة الكهروكيميائية ،مذكرة ماستر ، الوادي ،جامعة الشهيد حمه لخضر ،2018.
[9]: بلوم أسامة ، دراسة فاعلية التثبيط لمستخلص نباتPistacia atlantica على تآكل الفولاذ X C52 في وسط مياه الألبيان عند 40 درجة مئوية ، مذكرة ماستر جامعة قاصدي مرباح ورقلة، 2014.
[10]: علم المواد التطبيقي و أشكال التآكل (ص45/37) .
[11] : أحمد زكي بدوي ، التآكل وطرق حمايته ،دار الكتب العلمية ، القاهرة
[12] : أحمد زكي بدوي ،تآكل المعادن وطرق حمايتها ،دار الكتاب العلمية ، القاهرة ، 2008، الصفحة 45.
[13]: عبد الله حسين العلي ،تآكل المعادن والوقاية منه ، جامعة الملك سعود ،2012، الصفحة 32.

المراجع باللاتينية :

[14]: M.G. Fontana, Corrosion Engineering , McGraw-Hill,3rd Edition,1986.
[15] Sunil Gowda, Multi-Scale Effects of Corrosion on Steel Structures, PhD Thesis, University of Akron, 2016, pp. (13–23)

[16] Abdeali Fiala, Synthèses et Caractérisation de Nouvelles Molécules Contenant du Soufre et de l'Azote : Étude de Leur Effet Inhibiteur sur la Corrosion des Métaux de Transition – Application à la Protection du Cuivre en Milieux Acides, PhD Thesis, University Mentouri Constantine, 2007, pp. 6–8

الفصل الثاني:
المعالجات الحرارية

II -1- مقدمة

شهدت المواد المعدنية، وخاصة الفولاذ، تطورًا كبيرًا في مختلف المجالات الصناعية نتيجة الحاجة المستمرة إلى تحسين أدائها وملاءمتها لمتطلبات الاستخدام المتنوعة. ولم يعد الاعتماد على الخواص الطبيعية للمعدن كافيًا، بل أصبح من الضروري إخضاعه لعمليات تقنية تهدف إلى تعديل خصائصه بما يتناسب مع ظروف التشغيل المختلفة.

ومن بين أهم هذه العمليات نجد المعالجات الحرارية، التي تُعد خطوة أساسية في تصنيع وتشغيل المعادن، حيث تتيح التحكم في البنية الداخلية للمعدن ومن ثم تحسين خواصه الميكانيكية دون تغيير شكله أو أبعاده. وقد ساهمت هذه المعالجات في رفع كفاءة المواد المعدنية وزيادة عمرها الافتراضي، مما جعلها تحتل مكانة مهمة في مجالات الهندسة والصناعة الحديثة.

وعليه، فإن دراسة المعالجات الحرارية تُعد ضرورية لفهم سلوك المواد المعدنية وكيفية تحسين أدائها بما يتوافق مع الاستخدامات المطلوبة.

II-2- مفهوم المعالجات الحرارية :

المعالجة الحرارية تُعد من أهم العمليات المطبقة على المعادن، حيث تقوم على تسخين المعدن إلى درجات حرارة محددة ثم تبريده وفق شروط مدروسة، بهدف إحداث تغيير في بنيته الداخلية وبالتالي تحسين خواصه الميكانيكية مثل الصلادة والمتانة والليونة. ومن المهم الإشارة إلى أن هذه العمليات لا تؤثر على التركيب الكيميائي للمعدن، وإنما تُحدث تغيّرًا في ترتيب الذرات والبنية المجهرية، وهذا ما يفسر اختلاف خواص نفس المعدن عند تغيير طريقة المعالجة [1].

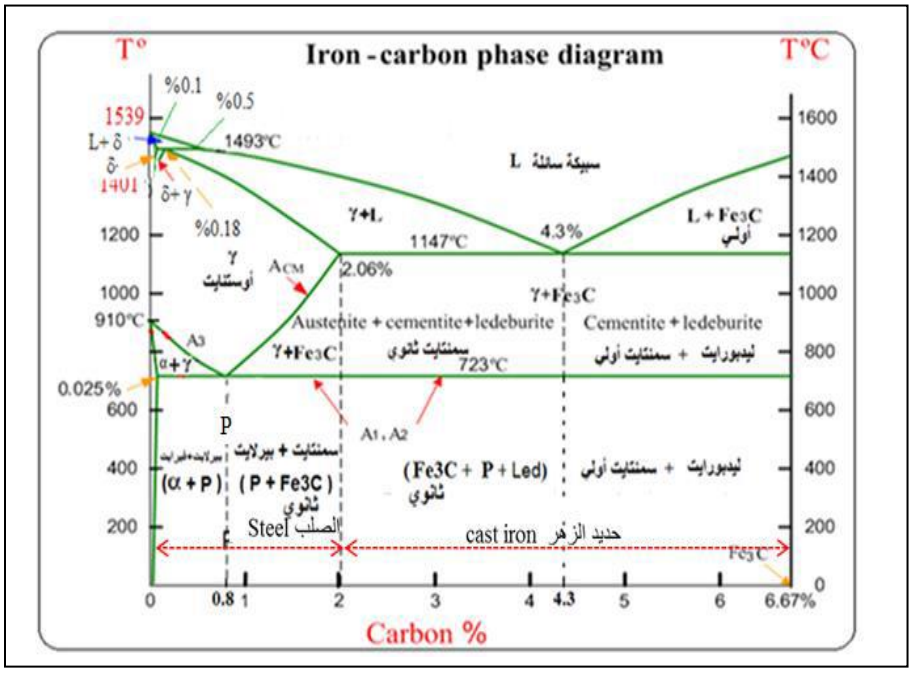
وتقوم الفكرة الأساسية للمعالجة الحرارية على أن سلوك المعادن وخصائصها يرتبطان بشكل مباشر بالبنية المجهرية، أي بكيفية توزيع الأطوار داخل المعدن. ففي حالة الفولاذ مثلاً نجد عدة أطوار مثل الفريت والأوستنيت والسمنتيت والمارتنسيت، وكل طور يساهم في إعطاء خواص مختلفة للمادة من حيث الصلادة أو الليونة أو المقاومة الميكانيكية. لذلك فإن التحكم في هذه الأطوار يسمح عمليًا بالتحكم في الخصائص النهائية للمعدن[2].

ومن الناحية العلمية يمكن فهم هذه التحولات اعتمادًا على عاملين أساسيين، هما الترموديناميك الي يحدد إمكانية تشكل الأطوار المختلفة حسب درجة الحرارة، والحركية التي تتحكم في سرعة حدوث هذه التحولات. بمعنى آخر، قد يكون الطور ممكن التكوين من الناحية الحرارية، لكن لا يتشكل فعليًا إلا إذا سمحت ظروف التبريد أو التسخين بذلك زمنيًا [3].

وعادة ما تمر عمليات المعالجة الحرارية بثلاث مراحل رئيسية، تبدأ بمرحلة التسخين حيث يُرفع المعدن تدريجيًا إلى درجة حرارة معينة حسب نوع المعالجة المطلوبة، ثم مرحلة التثبيت عند هذه الدرجة لفترة زمنية تسمح بإتمام التحولات الداخلية، وبعدها تأتي مرحلة التبريد التي تُعتبر المرحلة الحاسمة لأنها تحدد البنية النهائية للمعدن، سواء كانت صلبة أو لينة أو متوازنة[4].

وتجدر الإشارة إلى أن طريقة التبريد تلعب دورًا كبيرًا في تحديد الخواص النهائية، فالتبريد البطيء يؤدي غالبًا إلى تكوين بنى أكثر ليونة مثل البرليت والفريت، بينما التبريد السريع يؤدي إلى تكوين المارتنسيت الذي يتميز بصلادة عالية لكن مع هشاشة نسبية. لذلك غالبًا ما تُتبع عملية التقسية بمعالجة إضافية مثل المراجعة من أجل تقليل الهشاشة وتحسين المتانة [5].

كما يُعتبر مخطط الحديد–الكربون المرجع الأساسي لفهم هذه التحولات، لأنه يوضح مجالات درجات الحرارة وتركيز الكربون التي تتشكل فيها الأطوار المختلفة في الفولاذ، مما يساعد على اختيار نوع المعالجة الحرارية المناسبة لكل تطبيق عملي [1].



الشكل (II-1): صورة مخطط للمعالجة الحرارية

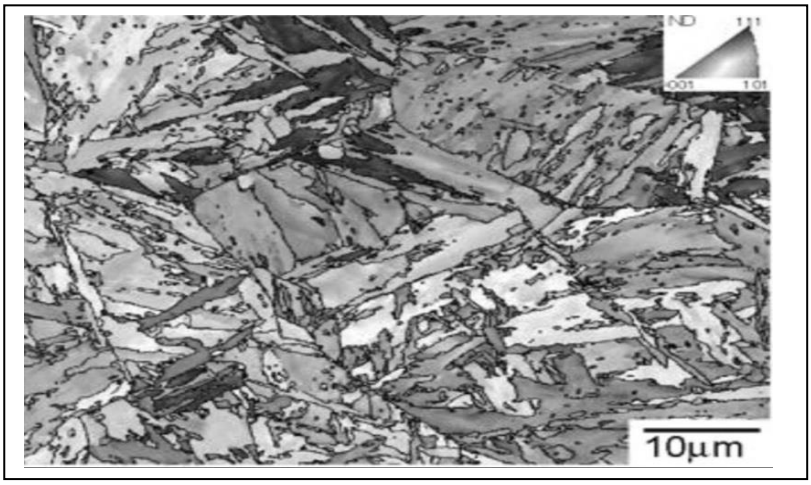
وفي الجانب التطبيقي، تُستخدم المعالجة الحرارية بشكل واسع في الصناعة، خاصة في تصنيع التروس والمحاور وأدوات القطع، حيث لا تُترك خصائص المعدن للصدفة، بل يتم تصميمها مسبقًا عبر اختيار نوع المعالجة المناسب حسب وظيفة القطعة وظروف تشغيلها [6].

II-3- أنواع المعالجات الحرارية :

II-3-1- التصليد :

يعد التصليد من أهم المعالجات الحرارية المطبقة على المعادن، خاصة الفولاذ، حيث يهدف إلى تحسين الخواص الميكانيكية وعلى رأسها الصلادة والمقاومة الميكانيكية. تتمثل عملية التصليد في تسخين المعدن إلى درجة حرارة معينة تقع عادة ضمن مجال الأوستنة ثم تبريده بسرعة كبيرة باستخدام وسط تبريد مناسب مثل الماء أو الزيت أو الهواء، وذلك للحصول على بنية مجهرية صلبة تُعرف بالمارتنسيت[7].

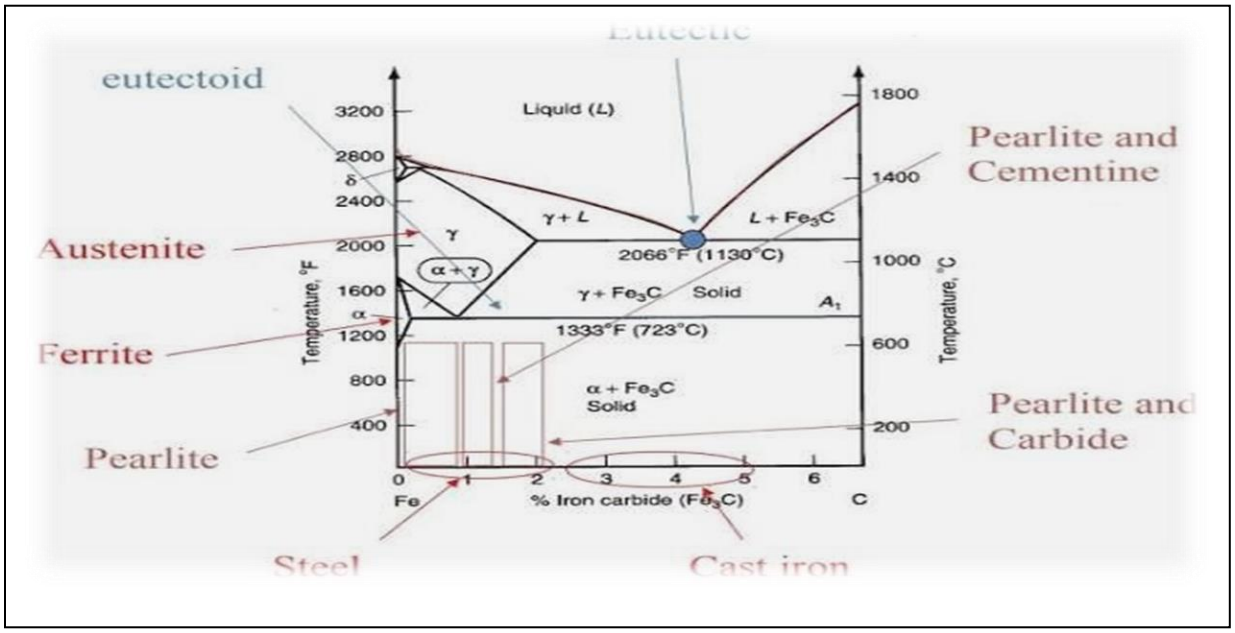
تبدأ عملية التصليد بتسخين الفولاذ إلى درجة حرارة أعلى من درجة التحول الحرجة، حيث تتحول البنية البلورية من الفيريت أو البرليت إلى الأوستينيت، وهي بنية مستقرة عند درجات الحرارة المرتفعة وقابلة للتحول إلى أطوار أخرى حسب سرعة التبريد [8]. عند التبريد السريع، لا تتمكن الذرات من الانتظام في بنية متوازنة، مما يؤدي إلى تكوّن المارتنسيت، وهي بنية مشوهة تتميز بصلادة عالية ولكنها في المقابل هشة [9].



الشكل (II-2): صورة توضح بنية فولاذ تمت معالجته حراريا

تعتمد فعالية التصليد على عدة عوامل أساسية، من بينها سرعة التبريد، وتركيب السبيكة، ودرجة حرارة التسخين، وزمن المكوث عند درجة الحرارة. فكلما زادت سرعة التبريد، زادت نسبة المارتنسيت المتشكل، وبالتالي تزداد الصلادة، إلا أن ذلك قد يؤدي إلى ظهور إجهادات داخلية وتشقق في المعدن [10]. كما أن نسبة الكربون في الفولاذ تلعب دورًا حاسمًا، حيث أن الفولاذ عالي الكربون يعطي صلادة أكبر مقارنة بالفولاذ منخفض الكربون عند نفس شروط المعالجة [11].

من الناحية المجهرية يؤدي التصليد إلى تحول الطور الأوستنيتي إلى مارتنيست، وقد يترافق أحيانا مع وجود أوستنيت متبقي خاصة إذا لم تكن سرعة التبريد كافية أو كان التركيب الكيميائي يسمح باستقرار هذا الطور [12]. ولهذا السبب غالبا ما تتبع عملية التصليد بمعالجة أخرى تسمى المراجعة ، بهدف تقليل الهشاشة وتحسين المتانة مع الحفاظ على قدر مناسب من الصلادة [13].



الشكل (II-3): مخطط يظهر عملية التصليد

تُستخدم عملية التصليد بشكل واسع في التطبيقات الصناعية التي تتطلب مقاومة عالية للاهتراء والصدمات، مثل أدوات القطع، والتروس، وأجزاء الآلات. كما أظهرت الدراسات أن المعالجة الحرارية المناسبة، بما فيها التصليد، تساهم بشكل كبير في تحسين مقاومة التآكل والخواص الميكانيكية للسبائك المختلفة، سواء كانت فولاذية أو ألمنيوم [14].

بالإضافة إلى ذلك، فإن التحكم في ظروف التصليد يسمح بالتحكم في البنية المجهرية وبالتالي في الأداء النهائي للمادة[15].

من جهة أخرى، يمكن أن يؤدي التصليد غير المتحكم فيه إلى عيوب خطيرة مثل التشققات أو التشوهات بسبب التبريد غير المتجانس أو الإجهادات الحرارية العالية، وهو ما يستدعي اختيار وسط التبريد المناسب والتحكم الدقيق في ظروف العملية [16]. كما أن بعض الدراسات ركزت على تحسين شروط التصليد من خلال التحكم في زمن المكوث ودرجة الحرارة لتحقيق أفضل توازن بين الصلادة والمتانة [17].

في الختام، يمثل التصليد عملية أساسية في هندسة المواد، حيث يسمح بالحصول على خواص ميكانيكية متميزة من خلال التحكم في التحولات التطورية والبنية المجهرية، غير أن نجاح هذه العملية يتطلب فهمًا دقيقًا للعوامل المؤثرة فيها وربطها بالتركيب الكيميائي ونوع السبيكة وظروف التشغيل [18].

II-3-2- الآسترو مراجعة

تُعدّ الآسترو مراجعة من أهم المعالجات الحرارية الحديثة التي تستخدم لتحسين الخواص الميكانيكية للمواد المعدنية، خاصة الفولاذ وبعض أنواع الحديد الزهر السبائكي. وتعتمد هذه المعالجة على مبدأ التحويل البنيوي المتحكم فيه، حيث يتم الحصول على بنية دقيقة تُعرف بالبينايت، والتي تجمع بين الصلادة الجيدة والمتانة العالية، وهو ما يجعل هذه التقنية ذات أهمية كبيرة في التطبيقات الصناعية التي تتطلب مقاومة عالية للصدمات والتآكل [7].

تتم عملية الآسترو مراجعة عبر عدة مراحل أساسية. في البداية، يتم تسخين العينة إلى درجة حرارة الأوستنة، حيث تتحول البنية المجهرية إلى طور الأوستينيت. بعد ذلك، يتم تبريد العينة بسرعة ولكن ليس إلى درجة حرارة الغرفة، بل إلى درجة حرارة متوسطة (عادة بين 250 و 400 درجة مئوية)، حيث تُحفظ العينة عند هذه الدرجة لفترة زمنية محددة تسمى زمن المكوث. خلال هذه المرحلة يحدث تحول الأوستينيت إلى البينايت بشكل متحكم فيه، ثم يتم تبريد العينة إلى درجة حرارة الغرفة [15].

تتميز هذه المعالجة بكونها تختلف عن المعالجات التقليدية مثل التبريد السريع متبوعًا بالمراجعة، حيث لا يتم تكوين المارتنسيت، بل يتم تجاوز هذا الطور مباشرة نحو البينايت. هذا الأمر يسمح بتقليل الإجهادات الداخلية والتشوهات، وبالتالي تحسين الاستقرار الأبعادي للقطعة المعالجة، وهو ما تم التأكيد عليه في عدة دراسات تناولت تأثير المعالجات الحرارية على البنية المجهرية والخواص الميكانيكية [12].

من الناحية المجهرية، تتكون بنية البينايت من مزيج من الفيريت وإبر دقيقة من الكربيدات، وتكون هذه البنية مسؤولة عن تحقيق توازن جيد بين الصلادة والمتانة. وقد أظهرت الدراسات أن التحكم في درجة حرارة وزمن المكوث يؤدي إلى التحكم في نوع البينايت المتشكل، حيث يتميز البينايت السفلي بصلادة أعلى، في حين يوفر البينايت العلوي متانة أفضل [15].

أما من حيث الخواص الميكانيكية، فإن الآسترو مراجعة تُحسن بشكل ملحوظ مقاومة الصدمات والاهتراء، كما تقلل من هشاشة المادة مقارنة بالبنية المارتنسيتية الناتجة عن التبريد التقليدي. وقد بينت بعض الأبحاث أن هذه المعالجة تساهم في تحسين مقاومة التآكل والاحتكاك، خاصة في السبائك الغنية بالكروم المستخدمة في التطبيقات الصناعية مثل كرات الطحن [8].

كما أن التحكم في المعالجة الحرارية يسمح أيضًا بالتقليل من الأوستينيت المتبقي، وهو ما له تأثير إيجابي على استقرار الخواص الميكانيكية [9].

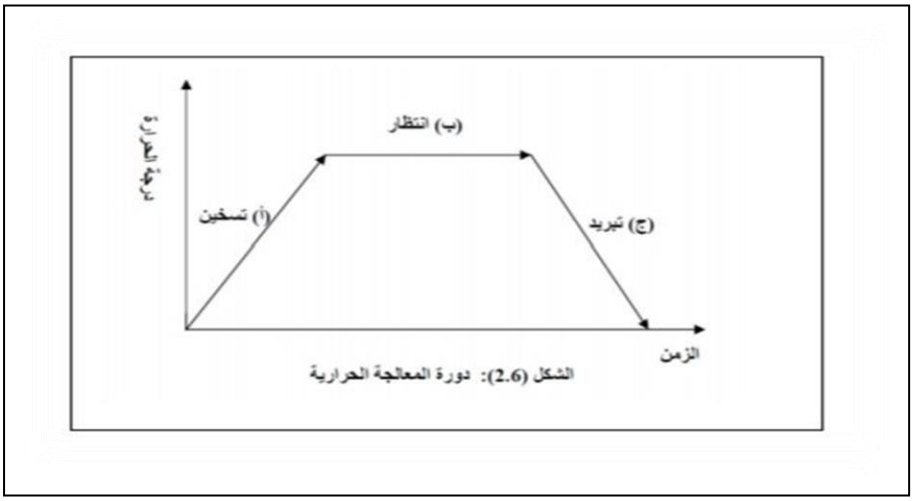
تُستخدم الآسترو مراجعة في العديد من التطبيقات الصناعية، مثل تصنيع التروس، النوابض، وأجزاء الآلات التي تتعرض لإجهادات ديناميكية عالية. كما تُستخدم بشكل خاص في الحديد الزهر العقدي، حيث تمنحه خواصًا ميكانيكية متميزة تجعله بديلاً لبعض أنواع الفولاذ، مع تكلفة إنتاج أقل [11].

من جهة أخرى، فإن نجاح هذه المعالجة يعتمد بشكل كبير على التحكم الدقيق في المعاملات الحرارية، مثل درجة حرارة الأوستنة، سرعة التبريد، درجة حرارة المكوث، وزمنه. أي انحراف في هذه المعاملات قد يؤدي إلى تكوين أطوار غير مرغوب فيها مثل المارتنسيت أو الأوستينيت المتبقي، مما يؤثر سلبًا على الخواص النهائية للمادة [13].

كما يمكن القول إن الآسترو مراجعة تمثل تقنية فعالة ومتطورة في مجال المعالجات الحرارية، حيث تتيح الحصول على توازن مثالي بين الصلادة والمتانة، مع تقليل العيوب المرتبطة بالمعالجات التقليدية. ولهذا فهي تحظى باهتمام كبير في الأبحاث العلمية والتطبيقات الصناعية الحديثة، خاصة في مجال تحسين أداء المواد تحت ظروف التشغيل القاسية [16].

II-4-3- المراجعة

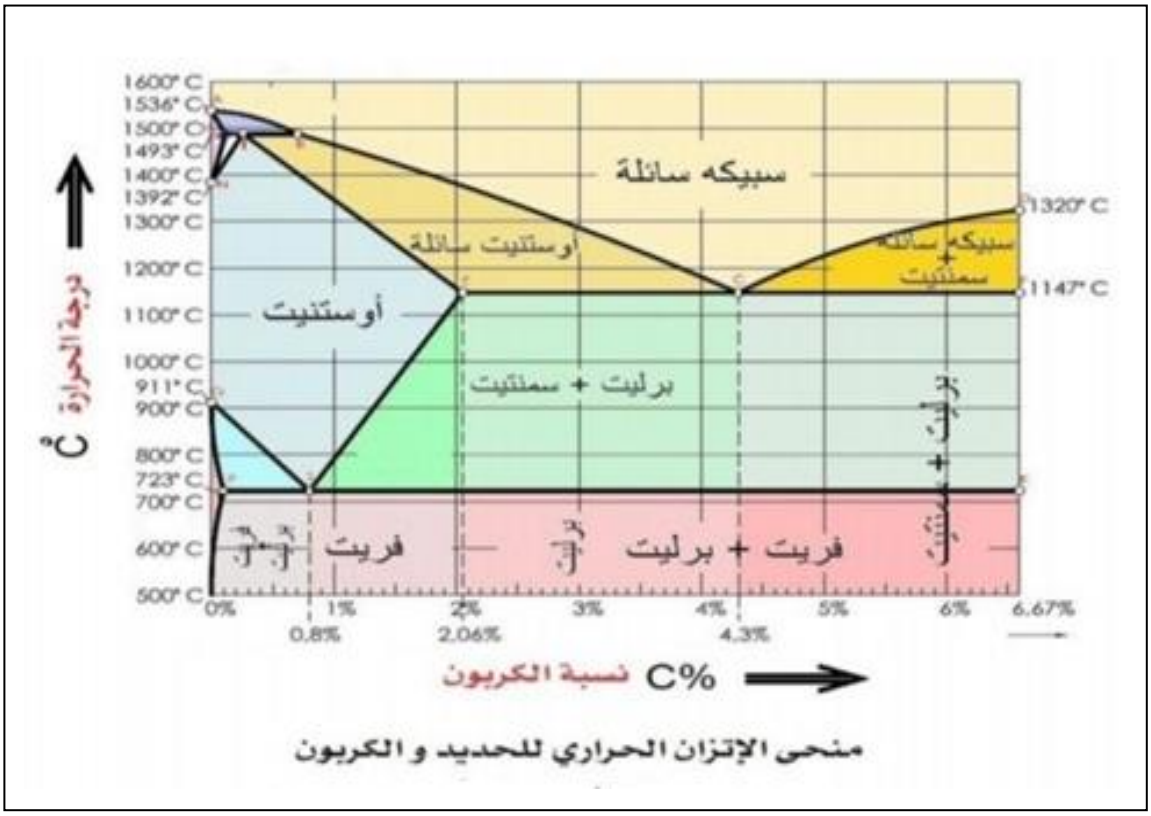
المراجعة هي إحدى أهم المعالجات الحرارية التي تُطبق بعد عملية التبريد السريع على الفولاذ. الهدف الأساسي منها هو تعديل البنية الناتجة عن التبريد، خاصة المارتنسيت، لأنه يكون صلبًا جدًا لكنه في المقابل هش وغير مستقر من ناحية الخواص. لذلك تأتي المراجعة كمرحلة ضرورية لإعادة التوازن بين الصلادة والمتانة [10].



الشكل (II-4) : مخطط يظهر عملية المراجعة الحرارية

من حيث المبدأ، تعتمد هذه العملية على إعادة تسخين الفولاذ بعد التبريد إلى درجة حرارة أقل من درجة التحول الحرجة، ثم الإبقاء عليه لمدة زمنية محددة قبل تبريده بشكل طبيعي. خلال هذه المرحلة تبدأ البنية المارتنسيتية في التفكك تدريجيًا، ويتحول جزء منها إلى مزيج أكثر استقرارًا من الفيريت و كربيدات دقيقة موزعة داخل البنية [15].

الذي يمكن فهمه من تأثير درجة حرارة المراجعة أنها العامل الأكثر تأثيرًا في النتائج النهائية. فعند درجات الحرارة المنخفضة يكون الهدف الأساسي هو إزالة الإجهادات الداخلية الناتجة عن التبريد. وعند رفع درجة الحرارة أكثر تبدأ الكربيدات في الترسب بشكل أوضح، مما يؤدي إلى تحسن في المتانة مقابل انخفاض تدريجي في الصلادة. أما عند درجات الحرارة المرتفعة فإن المادة تفقد جزءًا كبيرًا من صلابتها وتصبح أكثر ليونة [13].



الشكل (II-6): منحنى الاتزان الحراري للحديد و الكربون

ومن النقاط المهمة أيضًا وجود الأوستينيت المتبقي بعد التبريد السريع، وهو عنصر غير مرغوب فيه لأنه يسبب عدم استقرار في الخواص الميكانيكية. تساعد عملية المراجعة على تقليله أو تحويله، مما يؤدي إلى تحسين استقرار المادة بشكل عام [8].

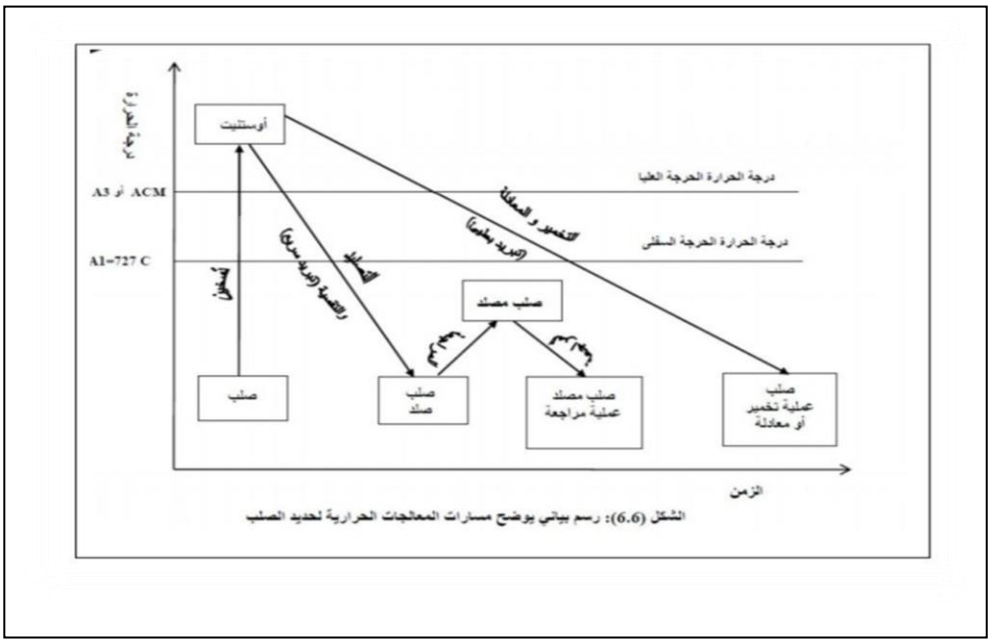
أما من حيث الاستخدامات، فإن المراجعة تُطبق على نطاق واسع في القطع الميكانيكية التي تتعرض لإجهادات عالية مثل النوابض، التروس، والأعمدة. الهدف منها هو ضمان أن تكون هذه القطع قادرة على تحمل الصدمات دون أن تكون هشة، مع الحفاظ على صلادة مناسبة في الوقت نفسه [11].

كما أن نجاح هذه العملية يعتمد بشكل كبير على اختيار درجة الحرارة المناسبة وزمن المكوث، لأن أي خطأ في هذه المعاملات قد يؤدي إلى فقدان الخصائص المطلوبة أو اختلال التوازن بين الصلادة والمتانة. لذلك تُعد المراجعة مرحلة حساسة جدًا ضمن سلسلة المعالجات الحرارية [12].

في النهاية، يمكن القول إن المراجعة ضرورية للحصول على خواص ميكانيكية متوازنة للفولاذ بعد التبريد، إذ تمنح المادة استقرارًا أفضل وتقلل من الهشاشة الناتجة عن التبريد السريع، مما يجعلها مرحلة أساسية في المعالجة الحرارية الصناعية [14].

II-3-5- المعادلة

المعادلة هي واحدة من المعالجات الحرارية الأساسية للفولاذ، وتُستعمل بشكل عام لتحسين البنية الداخلية للمادة وجعلها أكثر تجانسًا مقارنة بحالتها بعد الصب أو التشكيل. الفكرة منها ببساطة هي أننا نحاول نرتب البنية ونخليها أكثر توازن في الخواص الميكانيكية [10].



الشكل (6.6): رسم بياني يوضح مسارات المعالجات الحرارية لحديد الصلب

الشكل (II-7): رسم بياني يوضح مسارات المعالجات الحرارية لحديد الصلب

طريقة العمل تكون بأننا نسخّن الفولاذ إلى درجة حرارة أعلى من درجة التحول الحرجة، ثم نتركه مدة معينة حتى يكتمل التحول، وبعد ذلك نتركه يبرد في الهواء بشكل طبيعي التبريد هنا ليس سريع ولا مفاجئ، وهذا ما يميز المعادلة عن معالجات أخرى [13].

أثناء التسخين تتحول البنية إلى أوستينيت، وبعد التبريد في الهواء تتشكل بنية دقيقة غالبًا من الفيريت والسمنتيت على شكل بيرليت دقيق. هذه البنية تكون أفضل من البنية الخشنة اللي تتكون بعد الصب، لأنها تكون أكثر تجانس وبالتالي خواصها أحسن [15].

جدول (II-1) يوضح عمليات المعالجات الحرارية و أهم استعمالاتها

نوع المعالجة	طريقة التبريد	الاستعمالات
التخمير	بطيء داخل الفرن	- رفع اللدونة - إزالة الإجهادات - تحسين شكل الحبيبات
المعادلة	خارج الفرن (الهواء)	- رفع اللدونة - رفع الصلادة - رفع قابلية التشغيل
التصليد	سريع ومفاجئ باستخدام الماء أو الزيت	رفع الصلادة إلى أقصى درجة
المراجعة	تسخين من 200-700 دم، ثم تبريد بطيء وتستخدم بعد التصليد	- إزالة الإجهادات الداخلية - رفع المتانة - خفض القصافة

الهدف من المعادلة ليس زيادة الصلادة بشكل كبير، بل الهدف الأساسي هو تحسين التوازن بين الصلادة والمتانة، وكذلك تحسين قابلية التشغيل. لهذا يتم استخدامها كثير كمرحلة قبل عمليات أخرى أو قبل تصنيع القطع [12].

كذلك تساعد هذه المعالجة في تقليل بعض العيوب مثل اختلاف حجم الحبيبات أو وجود إجهادات داخلية غير منتظمة، وهذا يخلي المادة في الأخير أكثر استقرار وأفضل من ناحية الاستخدام [11].

تُستعمل المعادلة غالبًا في الفولاذ منخفض ومتوسط الكربون، خاصة في القطع اللي تحتاج خواص متوازنة مثل الأعمدة وبعض الأجزاء الميكانيكية العادية [8].

في الأخير، يمكن القول إن المعادلة ببساطة هي معالجة هدفها تحسين وتنظيم البنية المجهرية للفولاذ حتى نحصل على مادة أكثر توازن واستقرار في خواصها [16].

II-4-خاتمة :

في ختام هذا الفصل، تم عرض الإطار النظري للمعالجات الحرارية المدروسة والمتمثلة في التصليد، الأستنة، المعادلة والمراجعة، مع التركيز على المبادئ الأساسية التي تتحكم في كل معالجة، خاصة تأثير درجة الحرارة، زمن المعالجة ومعدل التبريد على التحولات البنيوية داخل الفولاذ منخفض الكربون. وقد سمح هذا العرض بإبراز العلاقة الوثيقة بين البنية المجهرية المتشكلة والخواص الميكانيكية الناتجة، وهو ما يُعد أساسًا لفهم سلوك المادة تحت مختلف الشروط الحرارية.

كما مكّن هذا الفصل من توضيح الدور الوظيفي لكل معالجة حرارية، سواء في تجانس البنية، تخفيف الإجهادات الداخلية، تحسين الصلادة أو تحقيق توازن مناسب بين المقاومة والليونة. وعليه، فإن التحكم في هذه المعاملات يُمثل خطوة أساسية لضبط خصائص المادة بما يتوافق مع متطلبات الاستخدام.

وبناءً على ما سبق، يُعتبر هذا الفصل قاعدة نظرية ضرورية سيتم الاعتماد عليها في تحليل النتائج التجريبية ومناقشتها في الفصول الموالية، بما يسمح بربط الجوانب النظرية بالتطبيقية بشكل منهجي ودقيق.

قائمة المراجع

قائمة المراجع بالعربية

[6]:عبد الكريم أحمد، المعالجة الحرارية للمعادن، دار المريخ للنشر

قائمة المراجع بالاتينية

[1] Callisster, W. D., & Rethwisch, D. G., Materials Science and Engineering: An Introduction, Wiley, 2018.

[**2]** Avner, S. H., Introduction to Physical Metallurgy, McGraw-Hill, 1974.

[3] Porter, D. A., & Easterling, K. E., Phase Transformations in Metals and Alloys, CRC Press, 2009.

[4] ASM International, ASM Handbook Volume 4: Heat Treating, 2016.

[5] Totten, G. E., Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies, CRC Press, 2007.

[7] BADJI Riad, « Influence des traitements thermiques à haute température sur l'évolution de la texture et de la microstructure des soudures d'acier inoxydable duplex 2205 »,Thèse de doctorat, Université Paris 13, 2008

[8] A. SADEDDINE, M.A. BRADAI, M. KERKAR, A. BENABBAS, « Influence des traitements thermiques sur la résistance à l'usure et aux chocs d'une fonte fortement alliée au chrome utilisée dans la fabrication des boulets de broyage », Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 2013.

[9] B. CHERMIME, H. DJEBAILI, B. MEDDOUR, H. ZEDIRA, A. ABOUDI, « Élimination de l'austénite résiduelle d'une fraise de forme par un traitement thermique adéquat (revenus cumulés) », Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2011.

[10] OURTI Abderrahmane, FENGAL Massinissa, « Influence de l'effet du traitement de revenu sur les propriétés de dureté et de résilience de deux nuances d'acier 25CD4 et 23CD4 », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Béjaïa, 2019.

[11] HADJI Hicham, MABROUKI Djelloul, « Effet du traitement thermique sur les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium », Mémoire de Master, Université de M'sila, 2020.

[12] HERNY Emilie, « Caractérisation mécanique et étude des mécanismes de vieillissement thermique et thermomécanique de l'acier inoxydable martensitique 15-5PH », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.

[13] TAYEBBEY Yacine, « Optimisation du temps de maintien à la température de revenu après trempe de deux types d'acier C45 et 42CrMo4 », Mémoire de Master, Université de M'sila, 2016.

[14] RADUTOIU Nicoleta, « Influence des traitements thermiques sur le comportement en corrosion à l'échelle locale de l'alliage d'aluminium EN AW 2024 », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2013.

[15] MAURIES Sébastien,« Caractérisation et modélisation de la séquence de précipitation de carbures au cours du traitement thermique d'aciers martensitiques alliés », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

[16] ZAOUI Moussa, « Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudées (cas des soudures épaisses) », Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2009.

[17] MEHALA Sofiane, « Effet du traitement thermique sur le comportement à la corrosion et la microstructure de l'alliage AA2024 soudé par l'alliage AA5554 », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2019.

[18] MORIN Sébastian, « Effet du magnésium, des traitements thermiques et de la porosité sur les propriétés mécaniques de traction et de fatigue de l'alliage A380.1 », Mémoire de Magister, Université du Québec à Chicoutimi, 2002.

الفصل الثالث:
الجانب التطبيقي

II-1- المقدمة:

في هذا الفصل ننتقل من الجانب النظري إلى التطبيق العملي، حيث نحاول إسقاط ما تم التطرق إليه سابقًا على عينة حقيقية من الصلب منخفض الكربون. الهدف من هذا الجزء هو فهم سلوك المادة بشكل أدق من خلال مجموعة من التجارب والتحاليل المخبرية.

في البداية تم تحضير العينة عبر عدة مراحل أساسية تشمل القص، الصقل والتنظيف، وذلك للحصول على سطح مناسب يسمح بإجراء القياسات بدقة. بعد ذلك تم اللجوء إلى تقنيات تحليل مختلفة من أجل دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للعينة، حيث تم استخدام تقنية فلورية الأشعة السينية (XRF) لتحديد التركيب الكيميائي، والمجهر الضوئي (OM) لملاحظة البنية المجهرية.

كما تم الاعتماد على حيود الأشعة السينية (XRD) للتعرف على الأطوار الموجودة داخل المادة، إضافة إلى إجراء اختبار الصلادة (HV) لتقييم مقاومتها للتشوه. ولم يقتصر العمل على ذلك، بل شمل أيضًا دراسة سلوك التآكل.

من خلال هذه التجارب نحاول الربط بين البنية المجهرية، التركيب الكيميائي، والخواص الميكانيكية والكهروكيميائية، من أجل الوصول إلى فهم شامل لسلوك الصلب منخفض الكربون في مختلف الظروف.

2.III. المواد الخام الصلب منخفض الكربون:

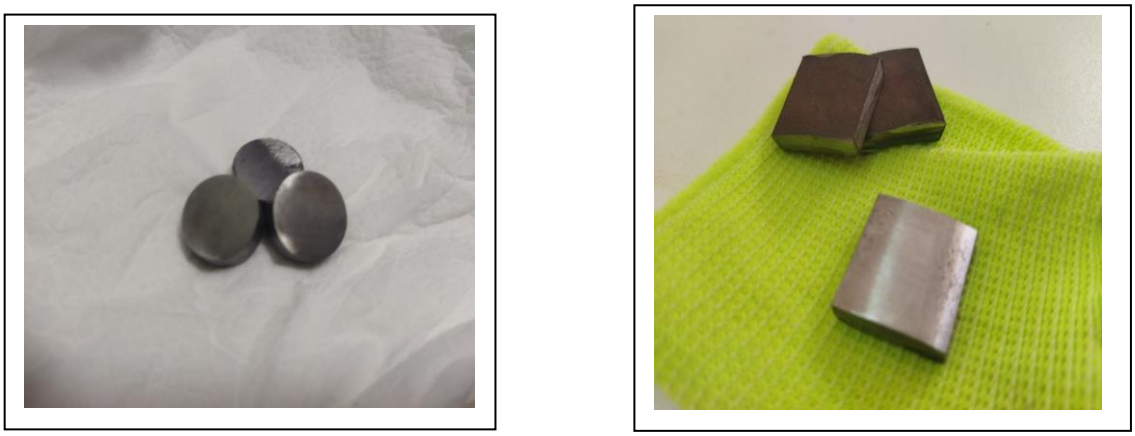
يُعدّ الفولاذ من أكثر المواد استخدامًا في التطبيقات الهندسية نظرًا لتوازنه بين الخواص الميكانيكية وسهولة التصنيع والتكلفة المنخفضة، إذ يمكن التحكم في خصائصه من خلال نسبة الكربون والمعالجات الحرارية المختلفة، مما يجعله مناسبًا للدراسات التطبيقية في علم المواد. وفي هذا الإطار، يبرز الفولاذ منخفض الكربون كخيار مثالي للأعمال المخبرية، حيث يتميز بنسبة كربون منخفضة (بين 0.05% و0.25%) وبنية مجهرية بسيطة تتكون أساسًا من الفيريت مع نسبة قليلة من البرليت، وهو ما يمنحه ليونة عالية وقابلية جيدة للتشكيل واللحام، مقابل صلادة منخفضة نسبيًا. هذه الخصائص تجعل سلوكه تحت تأثير المعالجات الحرارية، خاصة عند تغيير درجة الحرارة مع تثبيت الزمن، سلوكًا واضحًا وتدريجيًا، مما يسهل متابعة تطور الخواص الميكانيكية مثل الصلادة وربطها بالتغيرات البنيوية. كما أن هذا النوع من الفولاذ لا يتعرض لتشققات أو تعقيدات كبيرة أثناء التحضير والصقل، وهو متوفر بكثرة وبتكلفة منخفضة، مما يجعله مناسبًا للتجارب التطبيقية المتكررة. لذلك تم اختياره في هذه الدراسة لتمكين إجراء قياسات دقيقة وقابلة للتحليل، ورسم منحنيات تمثل تغير الصلادة بدلالة درجة الحرارة، وفهم العلاقة بين البنية المجهرية والخواص الميكانيكية بشكل مبسط وعملي.

III-3- تحضير العينات:

تم التحضير لإجراء مجموعة من الاختبارات التطبيقية على عينة من الصلب منخفض الكربون وفق منهجية دقيقة تضمن الحصول على نتائج موثوقة وقابلة للتحليل. في المرحلة الأولى، تم اختيار قضيب من الصلب منخفض الكربون بنسبة كربون تقارب 0.25%، وذلك لكون هذا النوع من الفولاذ يتميز بخواص ميكانيكية متوازنة مثل الليونة الجيدة وقابلية التشكيل، إضافة إلى استجابته الواضحة للمعالجات الحرارية، مما يجعله مناسبًا للدراسة التجريبية وملاحظة التغيرات البنيوية والميكانيكية.

بعد اختيار المادة، تم إرسال القضيب إلى ورشة التقطيع حيث خضع لعملية تقطيع ميكانيكي دقيقة باستعمال آلات مخصصة لضمان الحصول على عينات بأبعاد منتظمة دون التأثير على بنيتها الداخلية. وقد رُوعي أثناء عملية التقطيع تجنب ارتفاع درجة الحرارة الناتج عن الاحتكاك، لما لذلك من تأثير محتمل على البنية المجهرية للصلب. تم تحضير نوعين من العينات:

- ✓ عينات أسطوانية (دائرية) بقطر 1 سم، وهي مناسبة لاختبارات التآكل .
- ✓ عينات على شكل مكعب، تُستخدم أساسًا في الفحوصات المجهرية ودراسة البنية الداخلية بعد التلميع والحفر الكيميائي.



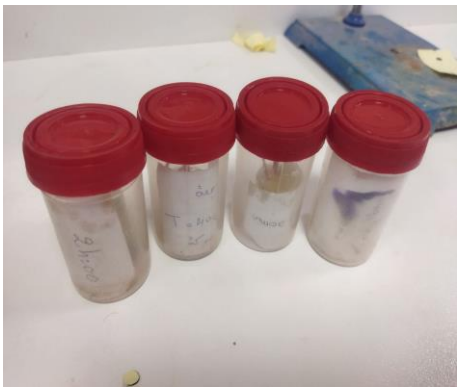
الشكل (III-1) : العينات التي تم تقطيعها على شكل مربع و العينات الدائرية

بعد ذلك، خضعت العينات لعمليات الصقل تدريجيًا باستخدام أوراق صنفرة بدرجات خشونة مختلفة (60،80،100،120،180،1000) وصولًا إلى سطح أملس مثل المرآة

يسمح بإجراء اختبارات دقيقة، خاصة تلك المتعلقة بالبنية المجهرية.

ولضمان تنظيم العمل وتفادي أي أخطاء أثناء تنفيذ التجارب، تم ترقيم جميع العينات باستخدام نظام ترميز واضح يربط كل عينة بنوعها وظروف المعالجة التي ستخضع لها لاحقًا (مثل درجة الحرارة وزمن المعالجة). هذا الإجراء يسمح بتتبع

كل عينة بدقة خلال مختلف مراحل التجربة، من المعالجة الحرارية إلى الاختبارات النهائية، كما يسهل مقارنة النتائج وتحليلها بشكل منهجي.



الشكل (III–2): العينات بعد ما تم ترميزها

بذلك، تم توفير عينات محضّرة بعناية وفق معايير تجريبية دقيقة، مما يضمن أن تكون النتائج المتحصل عليها لاحقًا معبرة بشكل حقيقي عن سلوك الصلب منخفض الكربون تحت ظروف الدراسة المختلفة.

III-3-1- تطبيق المعالجة الحرارية (المراجعة) على فولاذ منخفض الكربون :

تم تطبيق عملية المراجعة على العينات من فولاذ منخفض الكربون بهدف دراسة تأثير درجة حرارة المراجعة على كل من الخصائص الميكانيكية والبنيوية للمادة، وذلك من خلال تتبع التغيرات الناتجة عن اختلاف درجات الحرارة في البنية المجهرية والسلوك الميكانيكي للفولاذ بعد المعالجة الحرارية.

III-3-2- شروط المعالجة الحرارية:

تم تنفيذ المعالجة الحرارية عند أربع درجات حرارة مختلفة، وهي: 200°C ، 300°C ، 400°C ، 500°C وذلك من أجل مقارنة تأثير كل مستوى حراري على سلوك الفولاذ منخفض الكربون. عند كل درجة حرارة، تم إدخال عينتين من نفس المادة (عينة ذات شكل دائري وأخرى ذات شكل مكعب) إلى الفرن لضمان دراسة تأثير الشكل الهندسي على الاستجابة الحرارية بشكل متزامن مع تأثير درجة الحرارة.

الشكل (III–3) : فرن المعالجات الحرارية .

تم تثبيت درجة الحرارة داخل الفرن لمدة ساعة كاملة لكل تجربة، وذلك لضمان تجانس انتقال الحرارة داخل العينة ووصولها إلى حالة شبه مستقرة من التحول البنيوي. خلال هذه الفترة، خضعت العينات لتغيرات داخلية مرتبطة بإعادة ترتيب البنية المجهرية وتقليل العيوب الناتجة عن عملية المراجعة

بعد انتهاء مدة التثبيت الحراري، تم إخراج العينات من الفرن وتركها لتبرد في الهواء الطلق تحت ظروف التبريد الطبيعي حتى تصل إلى درجة حرارة الغرفة. ويُعد هذا النوع من التبريد مناسباً لدراسة تأثير المراجعة، حيث يسمح بحدوث تحولات تدريجية في البنية دون إدخال إجهادات إضافية ناتجة عن التبريد السريع.

الشكل (III-4) : العينات المعالجة حراريا بعد ما تم تنظيفها .

وبهذا التسلسل التجريبي، تم الحصول على سلسلة من العينات المعالجة حرارياً بدرجات حرارة مختلفة، مما يسمح لاحقاً بإجراء اختبارات ميكانيكية وبنيوية مقارنة لتحديد تأثير درجة حرارة المراجعة على خواص الفولاذ منخفض الكربون و المرتبة في الجدول الآتي :

الجدول(III-1.) : جدول يوضح عملية المراجعة وترتيب العينات

الزمن(t)	درجة الحرارة(°C)	ترميز العينات
ساعة	200°C	B1
ساعة	300°C	B2
ساعة	400°C	B3
ساعة	500°C	B4

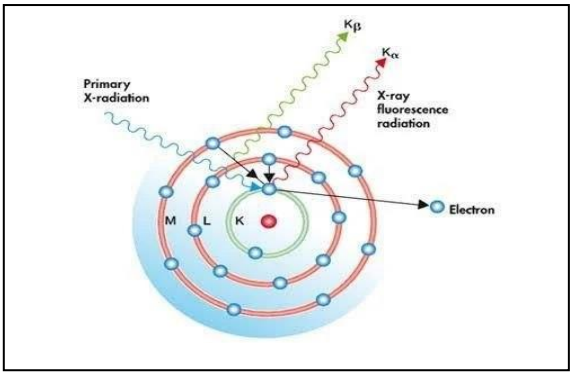
III-4- فلورية الأشعة السينية (XRF):

تُعد تقنية فلورية الأشعة السينية من أهم التقنيات التحليلية غير الإتلافية المستخدمة في تحديد التركيب الكيميائي للمواد، خاصة المعادن والسبائك مثل الصلب منخفض الكربون.

الشكل (III-6) جهاز الأشعة السينية

III-4-1. مبدأ العمل:

تعتمد هذه التقنية على مبدأ إثارة ذرات العينة بواسطة أشعة سينية أولية ذات طاقة عالية، مما يؤدي إلى طرد إلكترونات من المستويات الداخلية للذرات. نتيجة لذلك، تنتقل إلكترونات من مستويات طاقة أعلى لملء الفراغات، وتُطلق طاقة على شكل أشعة سينية ثانوية مميزة لكل عنصر، وهو ما يُعرف بالفلورية.



الشكل (III-7) صورة توضح مبدأ عمل الأشعة السينية

III-4-2. في الجانب التطبيقي:

تم استخدام جهاز XRF لتحليل العينات المحضّرة مسبقًا، حيث وُضعت العينة على سطح مستقر ووضع الجهاز بشكل عمودي ومباشر على العينة حيث يقوم الجهاز بإرسال حزمة من الأشعة السينية نحو سطح العينة، ثم يلتقط الإشعاع المنبعث ويحلله لتحديد نوع العناصر الموجودة وتركيزها النسبي بدقة عالية.

كما استخدمت هذه التقنية في هذه الدراسة لتأكيد نسبة الكربون التقريبية في الصلب، وكذلك للكشف عن وجود عناصر أخرى مصاحبة مثل الحديد (Fe) والمنغنيز (Mn) والسيليكون (Si) وغيرها من العناصر التي قد تؤثر على الخواص الميكانيكية والحرارية للمادة. كما تُعد XRF أداة مهمة للتحقق من تجانس التركيب الكيميائي بين العينات المختلفة قبل وبعد المعالجات الحرارية.

III-5. التركيبة المجهرية (Microstructure):

تُعد دراسة التركيبة المجهرية خطوة أساسية لفهم سلوك الصلب منخفض الكربون، حيث تُمكّن من ربط الخواص الميكانيكية (مثل الصلادة والمتانة) بالبنية الداخلية للمادة. في هذه الدراسة، تم تحليل البنية المجهرية للعينات باستخدام المجهر المعدني بعد إخضاعها لسلسلة من عمليات التحضير السطحي الدقيقة.

III-1-5-. في الجانب التطبيقي:

بدأت عملية التحضير بعملية الصقل التدريجي للعينات باستخدام أوراق صنفرة بدرجات خشونة متتالية (من الخشن إلى الناعم)، وذلك لإزالة آثار التقطيع والحصول على سطح مستوٍ. بعد ذلك، تم تلميع السطح للحصول على سطح مرآوي خالٍ من الخدوش، وهو شرط ضروري لرؤية البنية المجهرية بوضوح.

بعد التلميع، تم إجراء عملية الحفر الكيميائي باستعمال كاشف مناسب مثل محلول النيتال نسبة 2%(حمض النتريك مع الإيثانول).

III.1.1.5. طريقة تحضير محلول النيتال :

يتم تحضيره باستعمال حمض النتريك المركز مع الإثانول بنسبة 2% حمض النتريك إلى 98% إيثانول حيث تم قياس الكمية المناسبة من الإيثانول أولا، ثم إضافة حمض النتريك تدريجيا و ببطء شديد مع التحريك الخفيف لضمان تجانس المحلول وتجنب التفاعلات العنيفة .

حيث يعمل هذا الكاشف على إظهار حدود الحبيبات والأطوار المختلفة داخل البنية. تُعتبر هذه المرحلة حساسة جدًا، إذ أن مدة الحفر وتركيز المحلول يؤثران بشكل مباشر على وضوح النتائج.

III-6- المجهر الضوئي (OM – Optical Microscopy):

يُعد المجهر الضوئي من أهم الأدوات الأساسية في دراسة البنية المجهرية للمواد، خاصة في علم المعادن، حيث يُستخدم لملاحظة وتوصيف التركيبة الداخلية للصلب منخفض الكربون بعد تحضيره بطريقة مناسبة.

الشكل(III-8) صورة للمجهر الضوئي

III-6-1. مبدأ العمل:

يعتمد هذا المجهر على استخدام الضوء المرئي وعدسات مكبرة للحصول على صورة واضحة لسطح العينة، مما يسمح برؤية الحبيبات والأطوار المختلفة.

III-6-2. في الجانب التطبيقي:

بعد الانتهاء من عمليات التحضير (الصقل، التلميع، والحفر الكيميائي باستخدام كاشف النيتال)، تم وضع العينة على منصة المجهر الضوئي وضبط الإضاءة والتكبير المناسبين. عادةً ما تم استخدام تكبيرات مختلفة للحصول على رؤية شاملة تبدأ من الملاحظة العامة للبنية، وصولًا إلى التفاصيل الدقيقة للأطوار.

أظهر الفحص بالمجهر الضوئي البنية المجهرية المميزة للصلب منخفض الكربون، حيث تم التمييز بوضوح بين:

الفيريت (Ferrite): ظهر كمناطق فاتحة اللون، وهو الطور الغالب، ويعكس الليونة العالية للمادة.

البرليت (Pearlite): ظهر كمناطق داكنة أو على شكل صفائح دقيقة، وهو المسؤول عن زيادة الصلادة نسبيًا.

كما سمح المجهر الضوئي بملاحظة حجم الحبيبات وشكلها وتوزيعها داخل العينة، وهي عوامل تؤثر بشكل مباشر على الخواص الميكانيكية. فكلما كانت الحبيبات أدق، زادت مقاومة المادة، والعكس صحيح. كذلك، تم استخدامه لمقارنة العينات، حيث يمكن ملاحظة تغيرات واضحة في البنية مثل نمو الحبيبات أو إعادة توزيع الأطوار.

III-7- الأشعة السينية XRD :

حيود الأشعة السينية هو تقنية تحليل فيزيائية تُستخدم لدراسة البنية الداخلية البلورية للمواد الصلبة. يعتمد هذا الجهاز على تفاعل الأشعة السينية مع الذرات المكونة للمادة، حيث تُستخدم هذه التقنية لمعرفة كيفية ترتيب الذرات داخل البلورة، وتحديد الأطوار البلورية المختلفة الموجودة في العينة (مثل الحديد α أو الأوستنيت. في الفولاذ)، بالإضافة إلى تقدير درجة النقاوة وحجم البلورات الدقيقة أي هو جهاز يكشف لنا كيف الذرات مرتبة داخل المادة بدون تدميرها.

الشكل (III -9): جهاز الأشعة السينيةDRX

III-7-1 مبدأ العمل :

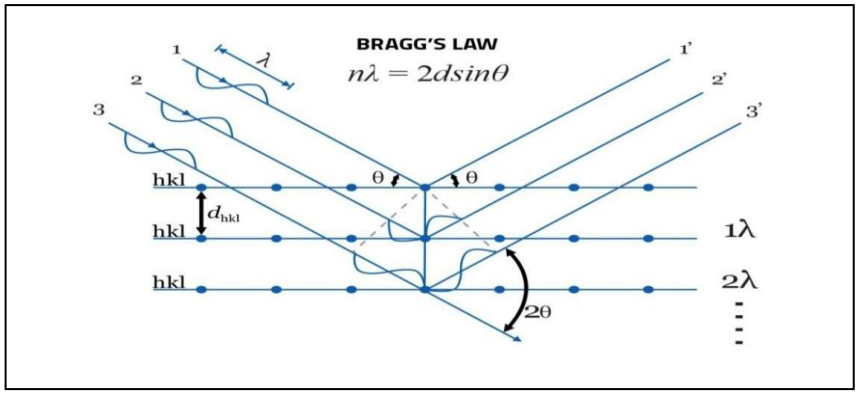
يعتمد على ظاهرة تسمى حيود الأشعة السينية، وهي تحدث عندما تصطدم الأشعة السينية بمستويات الذرات داخل البلورة.عند دخول الأشعة السينية إلى المادة :

- ✓ لا تمر بشكل مستقيم فقط
- ✓ بل تتفاعل مع المستويات الذرية المتوازية داخل البلورة ثم تنعكس أو تنحرف بزوايا محددة . هذه الظاهرة تخضع لقانون براج:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

حيث :

- λ: الطول الموجي ب Å.
- **d**: المسافة بين المستويات البلورية .
- **n** :رتبة الحيود وهي عدد صحيح (....1,2,3).
- زاوية الانعكاس **θ** :



الشكل(III -10) : صورة توضح مبدأ عمل الأشعة السينية

III.2.7. الجانب التطبيقي :

بعد تحضير العينات ، ثُبِّتت كل عينة على حامل العينات داخل جهاز حيود الأشعة السينية . بعد ذلك تم ضبط شروط التحليل المناسبة، ثم سُلِّط شعاع من الأشعة السينية على سطح العينة. أثناء القياس يدور الكاشف حول العينة ضمن مجال زوايا محدد، حيث يتم تسجيل شدة الأشعة المحيدة عند كل زاوية.
عند انتهاء عملية المسح، يُنتج الجهاز مخططًا يمثل شدة الأشعة المحيدة بدلالة زاوية الحيود ، ويعرف هذا المخطط بنمط الحيود

III-8- قياس الصلادة Hv :

يُعد اختبار الصلادة من أكثر الاختبارات الميكانيكية استخدامًا لتقييم مقاومة المواد للتشوه الدائم الناتج عن تأثير حمل خارجي. وفي هذه الدراسة تم استخدام جهاز صلادة فيكرز والذي يعتمد على غرس مخترق ماسي هرمي الشكل في سطح العينة تحت تأثير حمل محدد لمدة زمنية معينة. تُستخدم نتائج هذا الاختبار لتقييم تأثير المعالجة الحرارية على الخواص الميكانيكية للفولاذ منخفض الكربون، حيث تعطي الصلادة مؤشرًا مباشرًا على مقاومة المادة للتشوه والتآكل .

الشكل (III -11): صورة لجهاز الصلادة المستعمل في اختبار الصلادة

III-8-1-. مبدأ العمل :

يعتمد اختبار فيكرز على ضغط مخترق ماسي على شكل هرم رباعي منتظم ن تبلغ الزاوية بين الوجهين المتقابلين فيه 136 درجة. عند تطبيق حمل معلوم على سطح العينة لمدة زمنية محددة ، يترك المخترق بصمة مربعة الشكل تقريبا بعد إزالة الحمل ويتم قياس قطري البصمة d1 و d2 ثم حساب القطر المتوسط حيث بالإعتماد على هذا القطر المتوسط والحمل المطبق ، تحسب الصلادة وفق العلاقة التالية :

$$VHN = \frac{2Psin\frac{\alpha}{2}}{d}$$

حيث :

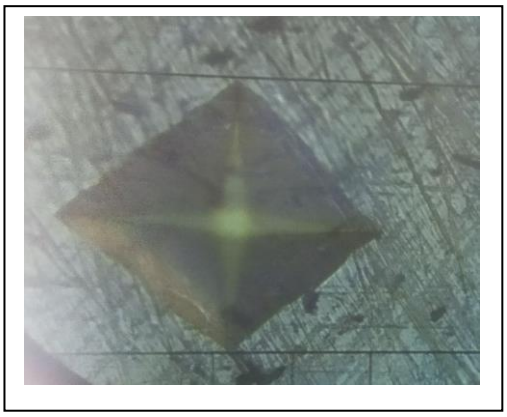
- **VHN:** رقم فيكرز للصلادة
- **P :** الحمولة المؤثرة بالكيلوغرام
- **d :** قطر الأثر
- α **:** زاوية بين كل وجهين متقابلين من المخترق الماسي

III-8-2. الجانب التطبيقي :

وقد تم إجراء اختبار الصلادة بعد الانتهاء من المعالجة الحرارية لكل العينات قد كان بغتباع الخطوات التالية :

- ✓ تنظيف سطح العينة و التأكد من خلوه من الشوائب و الخدوش .
- ✓ تثبيت العينة على منصة الجهاز
- ✓ اختيار الحمل المناسب للإختبار والذي كان 1 كلغ وتم تطبيقه .
- ✓ غرس المخترق الماسي في العينة لتكوين بصمة ثم قياس القطرين d1 و d2 بواسطة المجهر الخاص بالجهاز ثم حساب القطر المتوسط لكل بصمة .
- ✓ استخراج قيمة الصلادة hv لكل عينة كما تم تكرار القياس لكل عينة عدة مرات للحصول على نتائج دقيقة .
- ✓ حساب متوسط الصلادة لكل درجة حرارة .

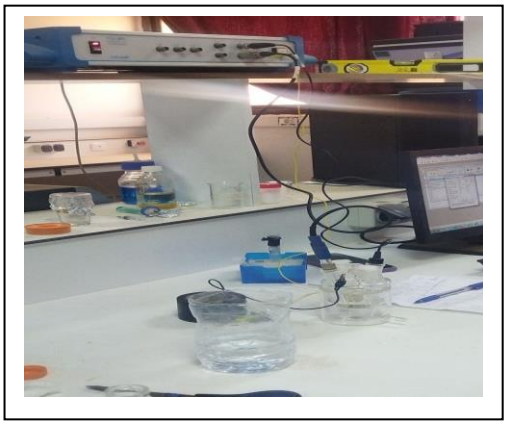
الشكل (III-12) : صورة لعينة قبل اختبار الصلادة



الشكل (III -13): صورة لعينة بعد اختبار الصلادة

III.9. قياس التآكل:

يُعتبر جهاز التآكل الكهروكيميائي من نوع تافل (Tafel) المدمج مع نظام **Voltalab PGZ 201** من الأجهزة المتقدمة المستخدمة في دراسة السلوك الكهروكيميائي للمواد المعدنية في الأوساط المسببة للتآكل. يتيح هذا الجهاز تقييم مقاومة، وذلك عبر تسجيل العلاقة بين الجهد الكهربائي والتيار الناتج عن التفاعلات السطحية. ويُعد هذا الأسلوب من أكثر الطرق دقة وموثوقية في مجال علم المواد لتحديد قابلية التآكل ومقارنة أداء المواد المختلفة.

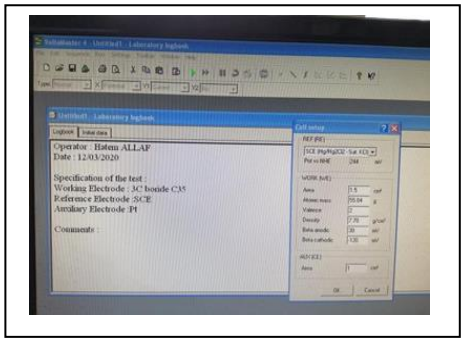


الشكل III -14 : جهاز الجهد الكهربائي

III-9-1- مبدأ العمل:

تقوم تقنية تافل على مبدأ الاستقطاب الكهروكيميائي للعينة المعدنية داخل خلية تآكل تحتوي على وسط إلكتروليتي. يتم اعتبار العينة كقطب عامل**(Working Electrode)** ، حيث تُغمر في المحلول ويتم تطبيق تغير تدريجي في الجهد الكهربائي باستخدام جهاز **Voltalab PGZ 201** ينتج عن ذلك تيار كهروكيميائي يعكس التفاعلات الأنودية والكاثودية التي تحدث على سطح المعدن. يتم تسجيل هذه الاستجابة على شكل منحنيات استقطاب ، ومن خلال تمثيل العلاقة بين الجهد ولوغاريتم التيار **(Tafel plot)** يتم استخراج المعاملات الأساسية للتآكل مثل جهد التآكل **(Ecorr)** وكثافة تيار التآكل **(Icorr)** ، والتي تُعد مؤشرات مباشرة لسرعة التآكل وسلوك المادة في الوسط المدروس

.



الشكل (III-15): : صورة مدخلات بيانات العينة المختبرة في جهاز الكومبيتر

III-9-2 الجانب التطبيقي :

تم تحضير العينات المعدنية وتحديد مساحة سطحها الفعّال والتي قدرت بـ $1.5\ cm^2$ ثم تثبيتها كقطب عامل داخل خلية التآكل الكهروكيميائية. بعد ذلك، تم غمر العينة في محلول حمض كلور الماء (**HCl**) باعتباره وسطًا تآكليًا قويًا لمحاكاة الظروف العدوانية. تم توصيل الأقطاب الثلاثة المكونة للخلية (القطب العامل، القطب المرجعي، والقطب المساعد المصنوع من البلاتين) بجهاز **Voltalab PGZ 201** ، مع التأكد من سلامة جميع التوصيلات الكهربائية واستقرار النظام. بعد ذلك، تم إدخال معطيات التجربة عبر برنامج **Volta Master 4**وضبط شروط القياس، ثم تشغيل التجربة لتسجيل منحنيات الاستقطاب الكهروكيميائي بشكل آلي. أخيرًا، تم تحليل منحنى تافل لاستخراج قيم جهد التآكل وكثافة تيار التآكل، والتي تم اعتمادها لتحديد معدل التآكل ومقارنة سلوك العينات المختلفة تحت نفس الظروف التجريبية.

III-10 خاتمة :

في ختام هذا الفصل، تم عرض مختلف المراحل التجريبية المعتمدة في هذه الدراسة، والمتعلقة بتأثير المعالجات الحرارية على الفولاذ منخفض الكربون. حيث شملت هذه المراحل تحضير العينات، وإخضاعها لمعالجات حرارية عند درجات حرارة مختلفة مع تثبيت زمن المعالجة، وفق شروط تجريبية مضبوطة. كما تم إجراء اختبار الصلادة بطريقة فيكرز (Vickers) اعتمادًا على بروتوكول تجريبي يتمثل في تطبيق حمل محدد على سطح العينة، وقياس أقطار البصمة الناتجة، ثم حساب القطر المتوسط واستخراج قيم الصلادة، مع تكرار القياسات لضمان موثوقية النتائج وتقليل الانحراف التجريبي. إضافة إلى ذلك، تم تقييم سلوك التآكل باستخدام التقنية الكهروكيميائية المعتمدة على منحنيات الاستقطاب (منحنيات تافل)، وذلك باستعمال جهاز Voltalab PGZ 201 داخل وسط حمضي .(HCl) وقد سمح هذا الأسلوب بتسجيل الاستجابة الكهروكيميائية للعينات واستخراج المعاملات الأساسية للتآكل. وعليه، فقد وفر هذا الفصل المعطيات التجريبية الأولية للدراسة، والتي سيتم الاعتماد عليها في الفصل الموالي من أجل تحليل النتائج ومناقشتها وتفسيرها وفق العلاقات بين البنية المجهرية والخواص الميكانيكية والكهروكيميائية للمادة .

الفصل الرابع:
المناقشة والنتائج

1. تحليل المواد الخام للعينة:

1.1.IV. نتائج التحليل الكيميائي (XRF) :

الجدول (IV -1): التركيب الكيميائي للعينة الصلب الكربوني محل الدراسة

العنصر	تركيب العينة (wt%)	التركيب القياسيAPI 5L G B
C	0.2200	0.26 max
Si	0.1200	
S	0.0300	0.030 max
P	0.0300	0.030 max
Mn	0.9600	1.2 max
Ni	0.1000	0.5 max
Cr	0.1000	0.5 max
Mo	0.0300	0.15 max
Cu	0.0800	0.5 max
Ti	0.0008	Nb + V + Ti < 0.15
Nb	0.0005	V + Nb < 0.06
V	0.0050	V + Nb < 0.06
Fe	98.3237	

2.1.IV. مناقشة نتائج التحليل الكيميائي للعينة المدروسة:

يُبين الجدول نتائج التحليل الكيميائي للعينة المدروسة ومقارنتها بالتركيب القياسي لفولاذAPI 5L Grade B، بهدف تقييم مدى تطابق المادة مع المواصفات وفهم تأثير الوسط التآكلي على سطحها.

تُظهر النتائج أن الحديد (Fe) هو العنصر الأساسي، القياسية (98%)، كما يظهر وجود المنغنيز (Mn) بنسبة 0.96%، و هو ما يساهم في تحسين المقاومة الميكانيكية واستقرار البنية.

في المقابل، تُسجل نسب مرتفعة نسبيًا من الفوسفور (P) والكبريت (S)، وهما عنصران يضعفان الخواص الميكانيكية ويزيدان من قابلية الهشاشة وبدء التآكل الموضعي.

كما تحتوي العينة على عناصر سبائكية مثل Ni وCr وCu وMo، والتي تساهم في تحسين مقاومة التآكل عبر تكوين طبقات سطحية واقية.

IV -2- تأثير المعالجة الحرارية على الخواص الميكانيكية:

تمت دراسة تأثير المعالجة الحرارية (المراجعة) على الخواص الميكانيكية للفولاذ منخفض الكربون من خلال تطبيق درجات حرارة مختلفة هي 200°C، 300°C، 400°C و500°C ، مع تثبيت زمن المعالجة في ساعة واحدة لكل عينة، وذلك بهدف تقييم تأثير درجة الحرارة على الميكانيكي للمادة.

من خلال التحليل العام لسلوك الفولاذ، لاحظت أن المعالجة الحرارية لا تغير التركيب الكيميائي للمادة، لكنها تؤثر بشكل مباشر على البنية المجهرية، وهو العامل الأساسي المتحكم في الخواص الميكانيكية.

عند درجة حرارة 200°C ، يكون تأثير المراجعة محدودًا نسبيًا، حيث يقتصر أساسًا على تخفيف جزء من الإجهادات الداخلية دون حدوث تغييرات بنيوية كبيرة، مما يعني أن المادة تحتفظ بمعظم صلابتها ومع الانتقال إلى 300°C، يبدأ تأثير المعالجة في الظهور بشكل أوضح، حيث تزداد عملية إعادة ترتيب العيوب البلورية وتراجع كثافة الانخلاعات، مما يؤدي إلى بداية انخفاض تدريجي في مقاومة التشوه.

أما عند 400°C، فقد لوحظ أن التغيرات البنيوية تصبح أكثر وضوحًا، حيث تزداد حركة الذرات داخل الشبكة البلورية، مما يسمح بتقليل أكبر في الإجهادات الداخلية وبدء تأثير نمو الحبيبات بشكل تدريجي وهو ما ينعكس على انخفاض أوضح في الصلادة.

وعند 500°C، يكون تأثير المعالجة الحرارية في أقصى درجاته، حيث يحدث استقرار أكبر للبنية المجهرية مع نمو ملحوظ في الحبيبات البلورية، مما يؤدي إلى تقليل عدد حدود الحبيبات التي تعيق حركة الانزلاق، وبالتالي انخفاض واضح في المقاومة الميكانيكية

وبناءً على هذه الملاحظات، يمكن تفسير تأثير درجة الحرارة على الخواص الميكانيكية كما يلي:

- عند200°C : إزالة جزئية للإجهادات الداخلية مع تأثير ضعيف على البنية.
- عند 300°C : بداية إعادة تنظيم العيوب البلورية وانخفاض تدريجي في الصلادة.
- عند 400°C : تسارع في استرجاع البنية وبدء نمو الحبيبات.
- عند 500°C : تأثير قوي لنمو الحبيبات وانخفاض واضح في المقاومة الميكانيكية.

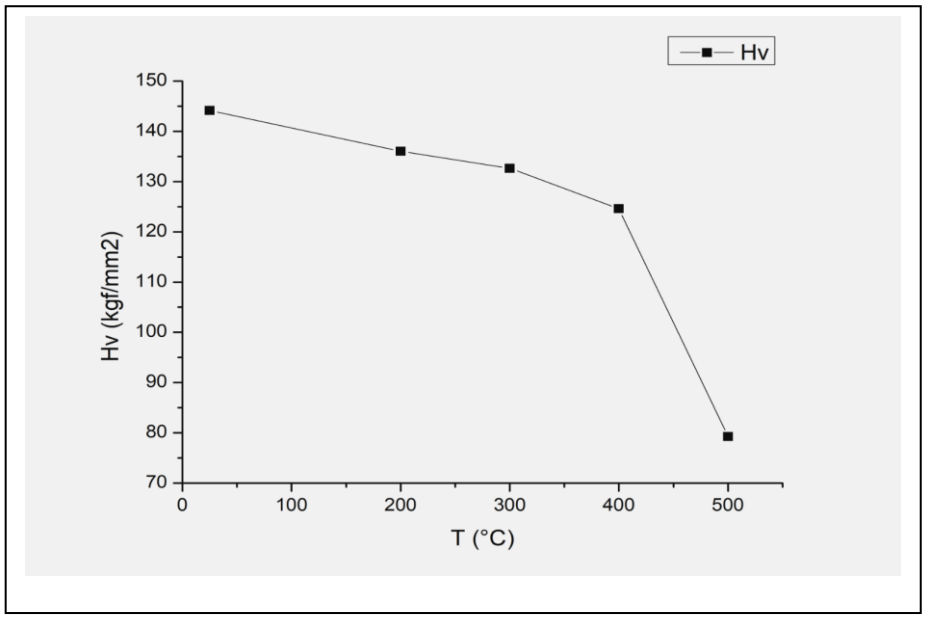
لمعالجة الحرارية لا تؤثر على التركيب الكيميائي للمادة، وإنما تؤثر بشكل مباشر على البنية المجهرية (الانخلاعات، الحبيبات، والإجهادات الداخلية)، وهي العوامل الأساسية التي تتحكم في الخواص الميكانيكية

للفولاذ. كما نستنتج أن التحكم في درجة حرارة المراجعة بين 200 و500 °C يسمح بضبط سلوك المادة حسب الحاجة التطبيقية، سواء للحصول على صلادة أعلى أو تحسين الليونة والمتانة.

IV-3- نتائج اختبارات الصلادة للعينات:

الجدول (IV -2): القيم النهائية لاختبار الصلادة

درجة حرارة المراجعة (°م)	الصلادة على سلم فيكرز
25	144,13
200	136
300	132,62833
400	124,58333
500	79,225



الشكل (IV-1) :منحنى بياني لتغيرات الصلادة بدلالة درجة الحرارة

IV-3-1- مناقشة نتائج الصلادة :

من خلال النتائج التجريبية لقياسات الصلادة بطريقة فيكرز (Vickers) نلاحظ أن هناك تناقصًا تدريجيًا في قيم الصلادة مع زيادة درجة حرارة المراجعة. ويتضح هذا السلوك من خلال المنحنى البياني الذي يأخذ اتجاهًا تنازليًا منتظمًا، مما يعكس التأثير المباشر للمعالجة الحرارية على البنية الداخلية للفولاذ منخفض الكربون.

عند درجات حرارة المراجعة المنخفضة، تبقى الصلادة مرتفعة نسبيًا، وذلك نتيجة بقاء جزء من البنية الناتجة عن التبريد السريع (مثل البنية المشوهة والإجهادات الداخلية). في هذه المرحلة تكون حركة الذرات محدودة، وبالتالي لا يحدث تخفيف كبير في الصلادة.

مع ارتفاع درجة حرارة المراجعة، تبدأ الذرات في اكتساب طاقة حرارية أكبر، مما يسمح بإعادة ترتيب العيوب البلورية وتخفيف الإجهادات الداخلية المتراكمة داخل المادة. هذا يؤدي إلى انخفاض تدريجي في الصلادة نتيجة تحسن الاستقرار البنيوي للمعدن.

وعند درجات حرارة أعلى، تصبح عملية إزالة الإجهادات أكثر وضوحًا، وتزداد عمليات الانتشار الذري داخل الشبكة البلورية، مما يساهم في زيادة الليونة وتقليل الصلادة بشكل أكبر.

بشكل عام، يمكن تفسير هذا السلوك بأن المراجعة تؤدي إلى تليين الفولاذ تدريجيًا كلما ارتفعت درجة الحرارة، حيث تتحول البنية من حالة عالية الإجهاد إلى حالة أكثر استقرارًا وأقل صلادة، وهو سلوك متوقع في الفولاذ منخفض الكربون.

وبالتالي، تؤكد النتائج أن العلاقة بين درجة حرارة المراجعة والصلادة هي علاقة عكسية، حيث كلما ارتفعت درجة حرارة المعالجة، انخفضت قيم الصلادة بشكل واضح ومنتظم.

IV-4- الخواص الفيزيائية :

أظهرت النتائج التجريبية أن المعالجة الحرارية بالمراجعة لم تُحدث تغييرات ملحوظة في الخواص الفيزيائية العامة للفولاذ منخفض الكربون، حيث نلاحظ أن الكتلة والأبعاد الخارجية للعينة بقيت شبه ثابتة قبل وبعد المعالجة، دون تسجيل أي تغيرات هندسية معتبرة. ويعود ذلك إلى أن المراجعة لا تؤثر على الشكل الخارجي للمادة، وإنما تستهدف أساسًا تعديل البنية الداخلية وتقليل الإجهادات المتبقية الناتجة عن عملية التبريد السريع.

وبالتالي فإن التغيرات التي تحدث تكون داخلية على مستوى الشبكة البلورية. كما نلاحظ من خلال النتائج أن تأثير المراجعة يظهر بشكل غير مباشر على المستوى البنيوي الدقيق، حيث أظهرت المعطيات أن زيادة درجة حرارة المعالجة تؤدي إلى انخفاض تدريجي في الإجهادات الداخلية المتراكمة داخل المادة، مما يساهم في تحسين الاستقرار الداخلي دون التأثير على الأبعاد الخارجية للعينة.

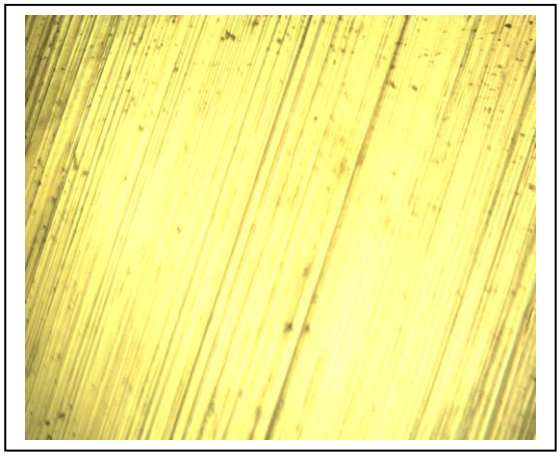
ومن جهة أخرى، ظهرت النتائج أن البنية الداخلية للمادة تتجه تدريجيًا نحو حالة أكثر انتظامًا واستقرارًا مع ارتفاع درجة حرارة المراجعة، وذلك نتيجة حدوث عمليات إعادة ترتيب للعيوب البلورية وتناقص كثافة الانخلاعات داخل الشبكة البلورية.

وبناءً على ما سبق، نستنتج أن الخواص الفيزيائية الظاهرية تبقى مستقرة تقريبًا بعد عملية المراجعة، في حين تتركز التأثيرات الأساسية لهذه المعالجة على المستوى البنيوي الداخلي، حيث تتحول المادة من حالة غير مستقرة ومليئة بالإجهادات إلى حالة أكثر توازنًا واستقرارًا.

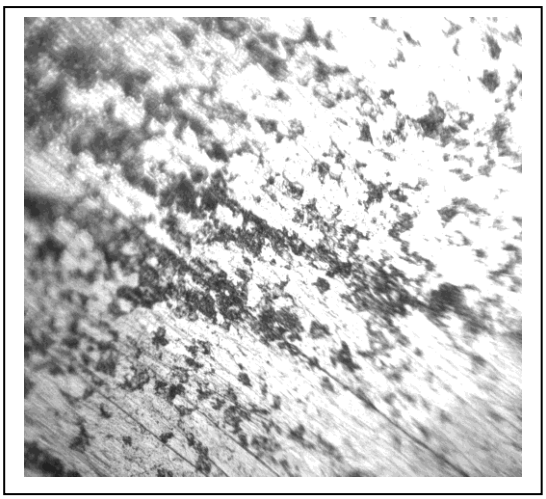
IV-5- المجهر الضوئي وتحديد الأطوار :

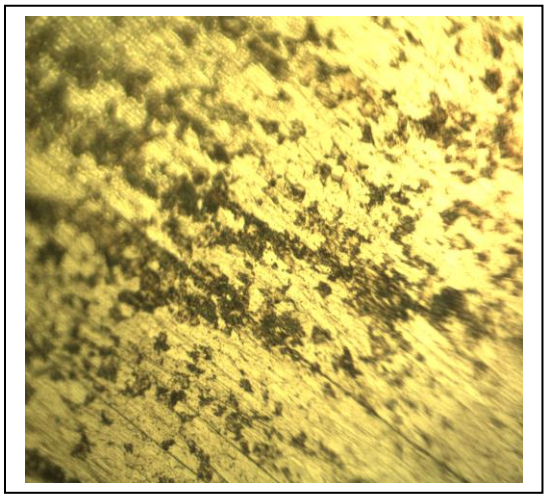
تم تحضير العينات المعدنية بعد المراجعة الحرارية وصقلها ثم إجراء حفر كيميائي باستخدام محلول النيتال (Nital 2%) بهدف إظهار البنية المجهرية وتحديد الأطوار ، حيث يسمح هذا التفاعل بإبراز حدود الحبيبات والتمييز بين الأطوار المختلفة.

يظهر الشكل صورة تحت المجهر الضوئي لعينة خام قبل تعريضها لمحلول النيتال وتظهر الصورة تجانسا في سطح العينة نتيجة عملية السقل الجيد



الشكل (IV-2) العينة الخام قبل النقع في محلول النيتال





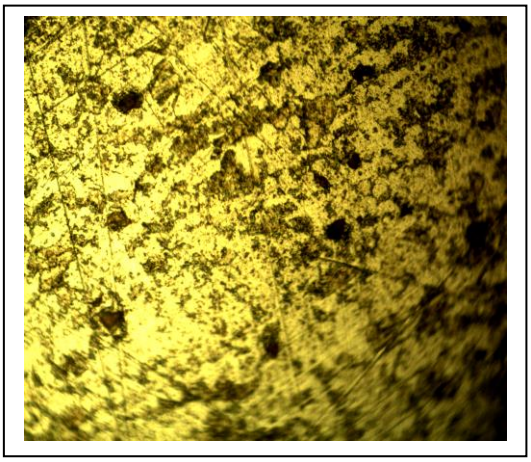
الشكل (IV-3) عينة من الصلب الكربوني غير معالجة حراريا بعد نقها في محلول النيتال

يبين الشكل على اليسار صورة عينة من الصلب الكربوني تحت المجهر بتكبير 50 x و على اليسار نفس الصورة معالجة ببرنامج ImageJ ، الصورة تبين ان البنية المجهرية للفولاذ الكربوني المدروس مكونة من طورين ، المناطقة فاتحة اللون تشكل طور الفيريت (Ferrite) بينما المناطق داكنة اللون تمثل الطور الغالب و طورالبيرلايت (Pearlite) : موزع بين مناطق الفيريت.

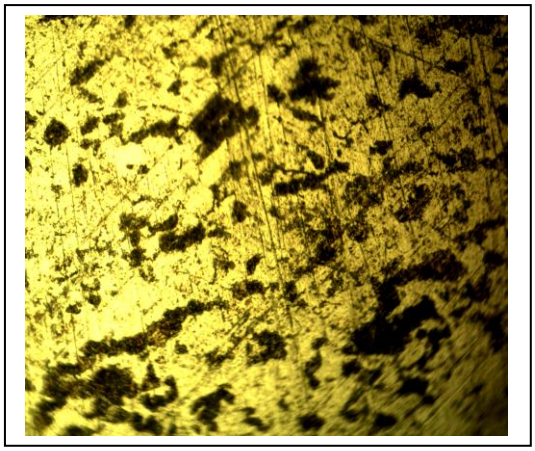
يسمح لنا بنامج ImageJ بحساب نسب تقريبية لكلا الطورين في و التي تقدر ب 68% فرايت و الباقي بارليت

الشكل الثاني يصف عينة مراجعة على درجة حرارة 300 م ، و فيه يمكن ملاحضة مصفوفة فيريتية مستمرة يتخللها وانتشاراً البيرلايت. و هذا نتيجة لاعادة تموضع الكربيد في البنية نتيجة تأثير المعالجة الحرارية.

الشكل يمثل عينة مراجعة على درجة حرارة 500 م ، و الملاحظ هو اعادة وانتشاراً للبقع الداكنة و اتي اصبحت اسمك و هذا يعزى لظهور كيربيدات جديدة منتشرة خلال مصفوفة الفريت.



الشكل (IV-4): عينة معالجة في درجة حرارة 400 م لمدة ساعة



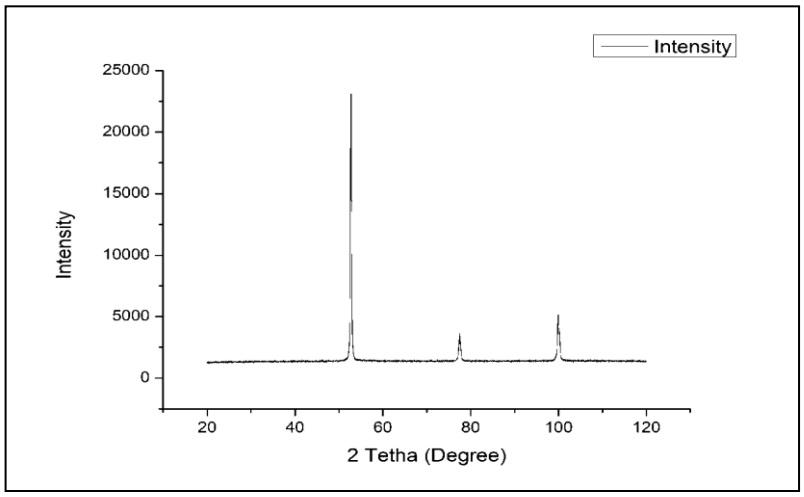
الشكل(IV-5): عينة معالجة في درجة حرارة 500 م لمدة ساعة

IV.1.5. مناقشة النتائج الملاحظة في المجهر :

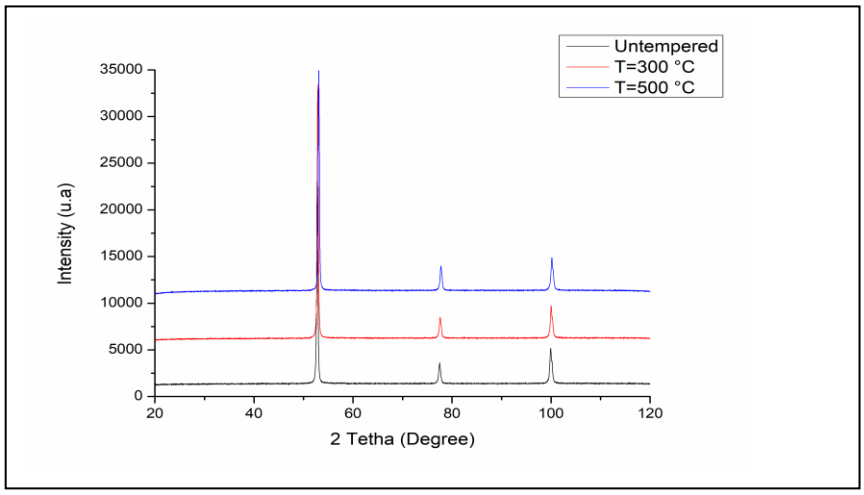
من خلال فحص الصور المجهرية للعينات الخام والعينات المعالجة حرارياً عند درجات حرارة كما هو موضح في الجدول و بعد الغمر الكيميائي بواسطة محلول النيتال ، لاحظنا أن البنية المجهرية للفولاذ منخفض الكربون تتكون أساساً من طوري الفيريت والبيرلايت. حيث أظهرت العينة الخام بنية غير متجانسة نسبياً مع وجود آثار واضحة لخطوط الصقل، مما حدّ من وضوح الأطوار المجهرية. أما بعد المعالجة الحرارية، فقد أصبح التباين بين المناطق الفاتحة والداكنة أكثر وضوحاً،

يمثل الفيريت المناطق الفاتحة بينما تمثل مستعمرات البيرلايت المناطق الداكنة. عند درجة حرارة أظهرت العينة المعالجة عند300°C تمايزاً أكبر بين الفيريت والبيرلايت مع اعادة توزيع أكثر انتظاماً للأطوار. أما عند400°C فقد بدت البنية أكثر تجانساً، مما يشير إلى انخفاض تأثير الإجهادات الداخلية وتحسن انتظام التوزيع البنيوي. وعند 500°C تصبح المناطق الداكنة اكثرحجما وهذا ما يدل على تشكل كيربيدات جديدة، مما ينقص في درجة صلادة الفولاذ الكاربوني و هذا متوافق مع منحنى الصلادة بلالة درجة حرارة المراجعة.

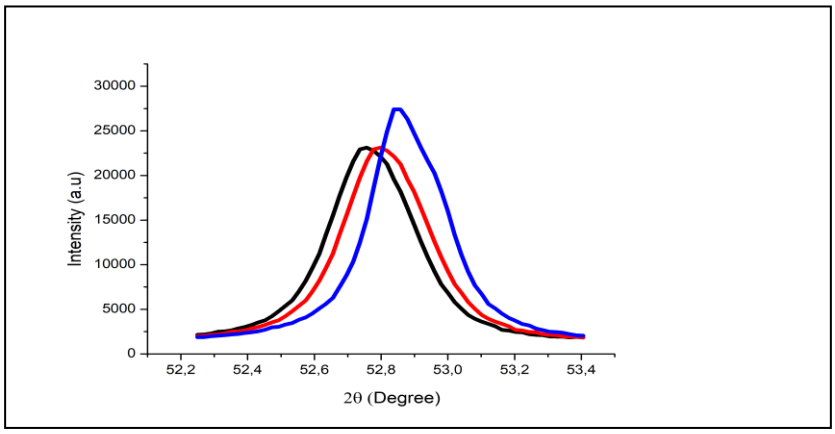
IV-6- تحليل أطياف الأشعة السينية DRX :



الشكل (IV-6): طيف حيود الأشعة السينية للعينة الخام



الشكل (IV-7): طيف حيود الأشعة السينية للعينات المعالجة حراريا



الشكل (IV-8): طيف حيود الأشعة السينية للعينات المعالجة حراريا للمستوي (110)

IV-6-1. مناقشة تحليل أطياف الأشعة السينية DRX :

يبين طيف حيود الأشعة السينية للعينة الخام وجود قمم حيود رئيسية متمركزة تقريبًا عند الزوايا °52، °77 و°100، وهي قمم مميزة لطور وهو الطور السائد في الفولاذ منخفض الكربون عند درجة حرارة الغرفة. كما تتميز القمة الرئيسية بشدة مرتفعة مقارنة ببقية القمم، مما يدل على وجود بنية بلورية جيدة الترتيب ودرجة تبلور مرتفعة. ويشير غياب قمم إضافية إلى عدم وجود أطوار ثانوية بكميات معتبرة يمكن كشفها بواسطة تقنية الأشعة السينية.

عند مقارنة طيف العينة الخام مع أطياف العينات المعالجة حرارياً عند300°C و500°C ، نلاحظ حدوث انزياح واضح مواقع القمم الرئيسية. ويشير ذلك إلى أن المعالجة الحرارية بالمراجعة تحرر البنية تدريجيا من من الإجهادات الداخلية المتولدة خلال مراحل التبريد السابقة.

IV-6-2- تحليل بعد الحبيبات

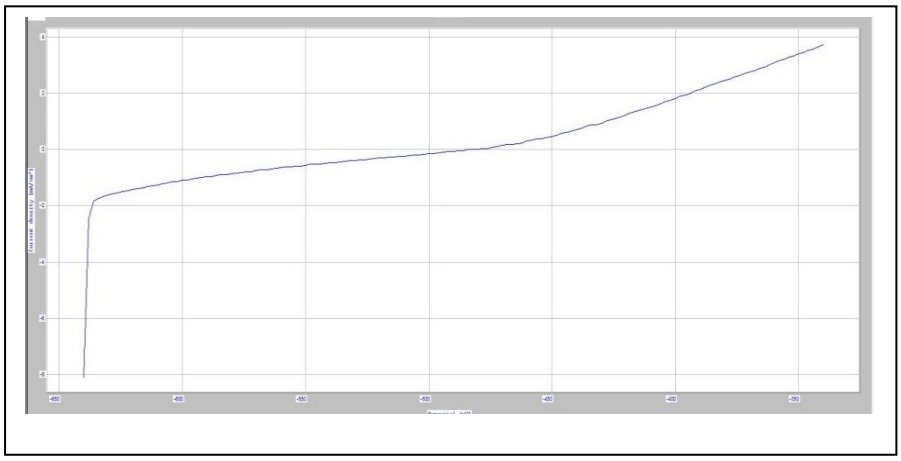
نشير الملاحظة النوعية للأطياف إلى أن عرض القمم ينخفض تدريجيًا مع زيادة درجة حرارة المراجعة. ومن المعروف أن اتساع القمم يرتبط عكسيًا بحجم البلورات الدقيقة، حيث يؤدي انخفاض عرض القمة إلى زيادة حجم البلورات. وعليه يمكن الاستنتاج أن حجم البلورات الدقيقة في العينة الخام هو الأصغر مقارنة بالعينات المعالجة حراريًا، بينما يزداد تدريجيًا بعد المراجعة عند300°C ثم يصل إلى أعلى قيمة له عند 500°C.ويعود هذا السلوك إلى أن المعالجة الحرارية تسمح بحدوث عمليات الاسترخاء البنيوي وإعادة ترتيب لعيوب البلورية داخل المادة، مما يسهل نمو البلورات الدقيقة على حساب المناطق الأكثر تشوهًا. لذلك فإن الزيادة في درجة

المراجعة تؤدي إلى زيادة حجم البلورات وتحسين انتظام البنية البلورية للفولاذ. ويمكن اعتبار العينة المعالجة عند 500°C الأكثر استقرارًا من الناحية البلورية مقارنة بالعينة الخام والعينة المعالجة عند 300°C .

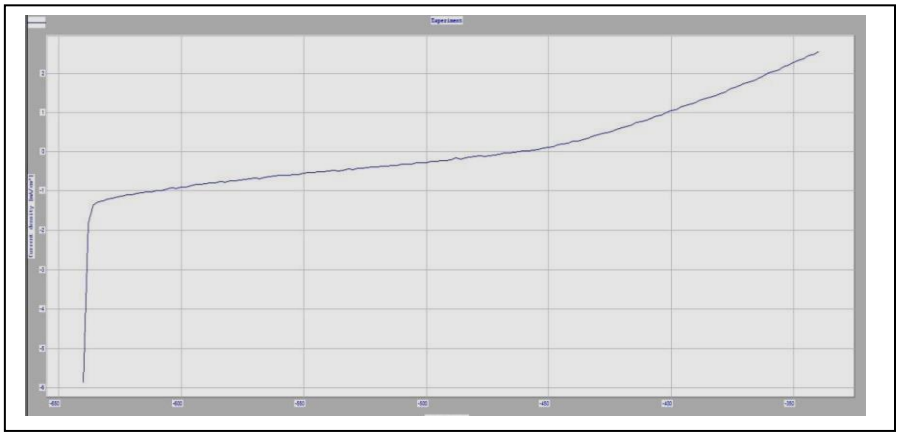
IV-7- اختبارات التآكل :

تم إجراء اختبارات التآكل بهدف دراسة سلوك الفولاذ منخفض الكربون بعد عملية المراجعة (Tempering) وتأثير درجة الحرارة على مقاومته للتآكل في وسط حمضي . وقد تم استعمال محلول حمض (HCl) بتركيز 2% كوسط تآكلي، نظرًا لقدرته على إظهار سلوك التآكل الكهروكيميائي بوضوح. تعتمد الدراسة على تقنيات الاستقطاب الكهروكيميائي (Potentiodynamic Polarization) ومنحنيات تافل (Tafel) من أجل تحديد خصائص التآكل مثل جهد التآكل (Ecorr) وكثافة تيار التآكل (Icorr)، ومن ثم حساب معدل التآكل لكل عينة

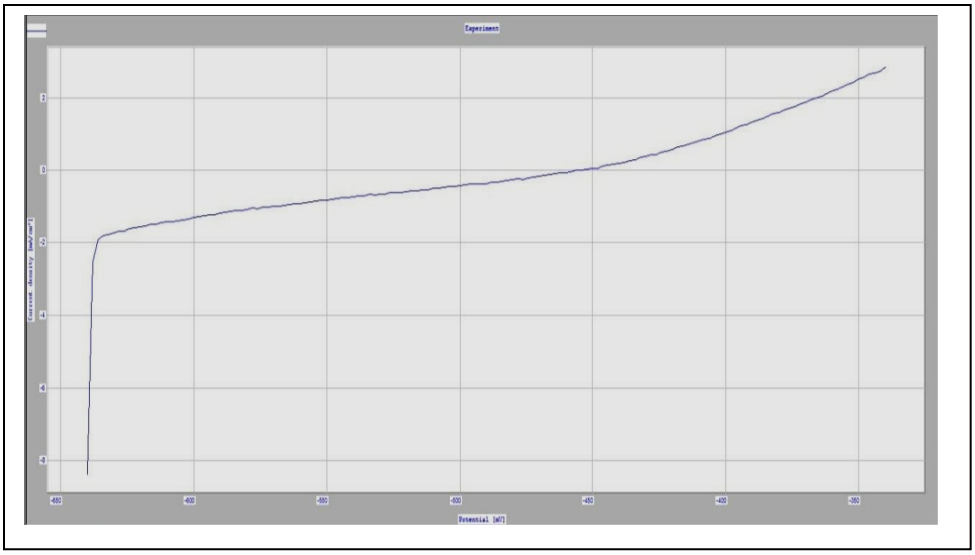
IV-7-1-. منحنيات الاستقطاب (Polarization Curvers) :



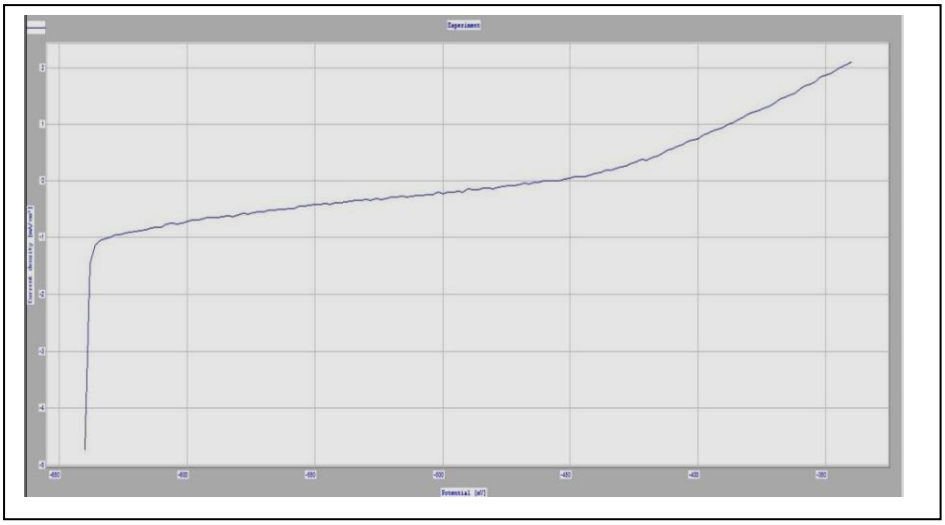
الشكل (IV–9): منحنى الاستقطاب لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 200°C



الشكل (IV-10): منحنى الاستقطاب لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 300°C



الشكل (11-IV) : منحنى الاستقطاب لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 400°C



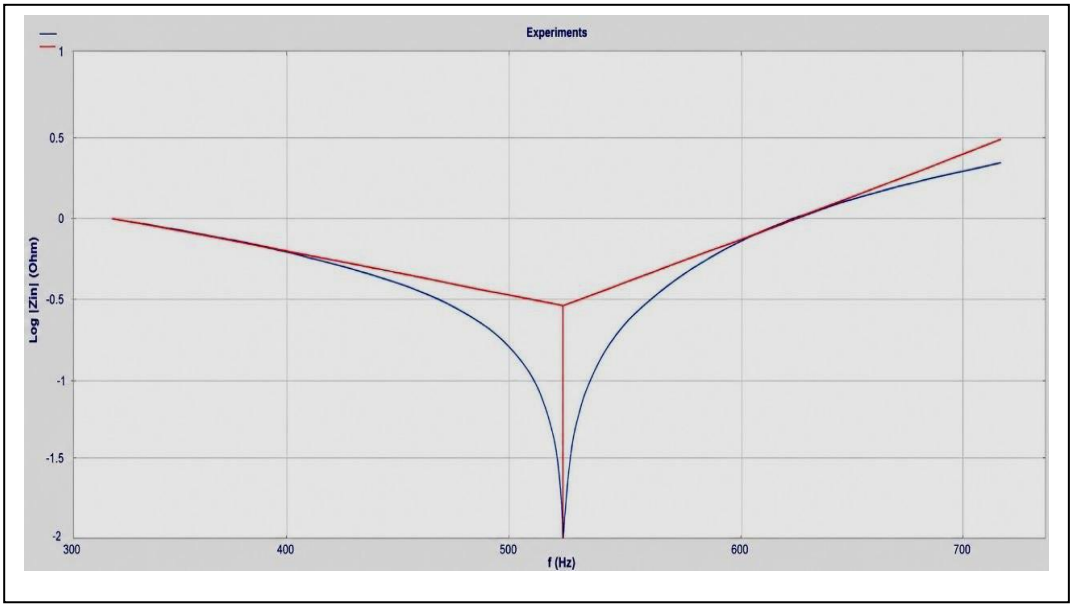
الشكل (12-IV) : منحنى الاستقطاب لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 500°C

IV-2-7-. مناقشة منحنيات الاستقطاب (Polarization Curvers) :

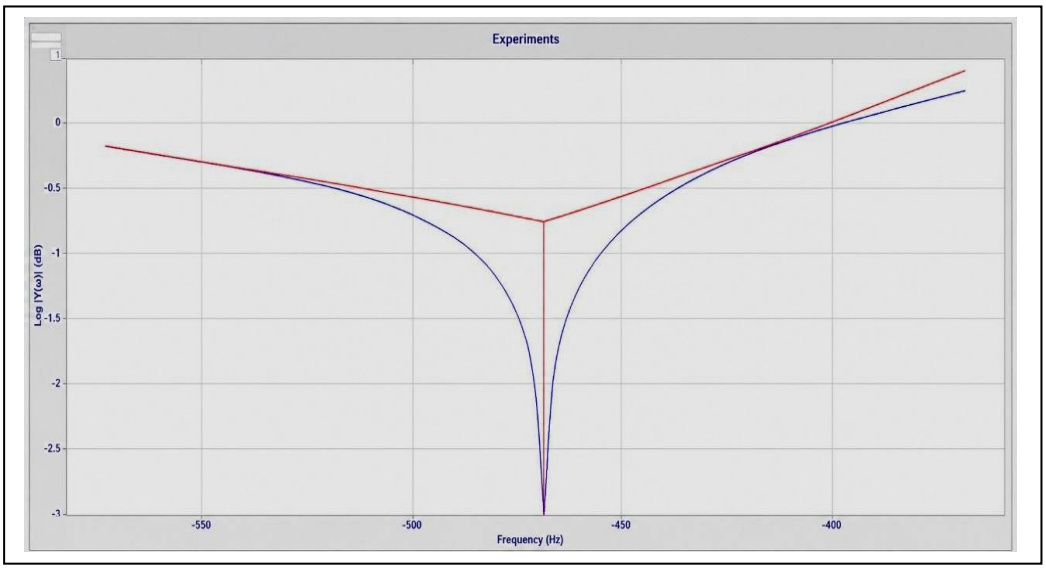
تُظهر منحنيات الاستقطاب الكهروكيميائي المسجلة في وسط حمضي HCl بتركيز 2% أن جميع العينات المدروسة 200°C، 300°C، 400°C، 500°C تتبع سلوكًا كهروكيميائيًا نموذجيًا يتمثل في وجود منطقتين أساسيتين هما المنطقة الأنودية والمنطقة الكاثودية، مما يعكس الطابع الكهروكيميائي لعملية التآكل في هذا الوسط العدواني

نلاحظ من تحليل المنحنيات وجود اختلاف واضح بين العينات من حيث كثافة تيار التآكل (Current Density)، حيث سجلت العينة المعالجة عند درجة حرارة 200°C أعلى كثافة تيار، مما يدل على سرعة تفاعل أعلى بين سطح المعدن والوسط الحمضي، وبالتالي ضعف مقاومة التآكل في هذه الحالة. ويمكن تفسير ذلك ببقاء نسبة أكبر من الإجهادات الداخلية والبنية غير المستقرة نسبيًا بعد المعالجة عند هذه الدرجة المنخفضة. كما نلاحظ أن المنحنيات الخاصة بالعينات المعالجة عند درجات حرارة أعلى 300°Cو 400°C بدأت تُظهر انزياحًا تدريجيًا نحو قيم تيار أقل، مما يشير إلى انخفاض تدريجي في معدل التآكل وتحسن في السلوك الكهروكيميائي للعينتين . و هذا بسبب بداية استقرار البنية الداخلية نتيجة التخفيف الجزئي للإجهادات وإعادة ترتيب العيوب البلورية داخل المادة. أما عند درجة حرارة 500°C، فقد أظهرت المنحنيات أفضل سلوك مقاوم للتآكل، حيث سجلت أقل كثافة تيار مقارنة بباقي العينات، مع انزياح أوضح نحو قيم أقل في منطقة التآكل. وهذا يدل على انخفاض ملحوظ في معدل الذوبان المعدني داخل الوسط الحمضي، وبالتالي تحسن كبير في مقاومة التآكل. أن زيادة درجة حرارة المراجعة تؤدي إلى تحسين تدريجي في مقاومة التآكل، وهو ما يظهر بوضوح من خلال الانخفاض المنتظم في كثافة تيار التآكل عبر جميع المنحنيات، مما يؤكد التأثير المباشر للمعالجة الحرارية على السلوك الكهروكيميائي للفولاذ منخفض الكربون في وسط.2% HCl

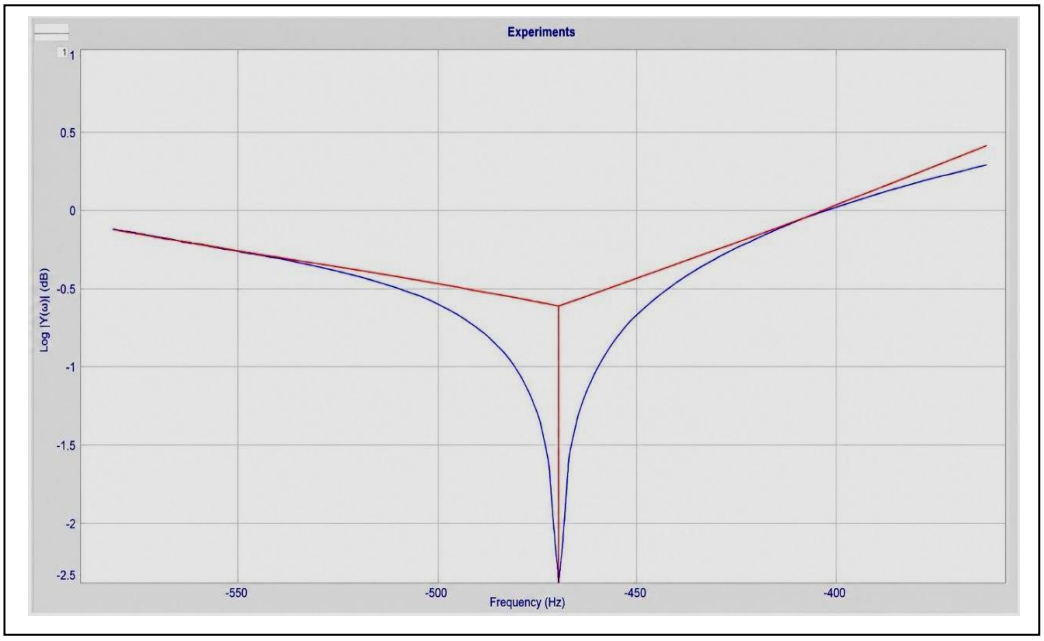
IV-8- استقراء تافل :



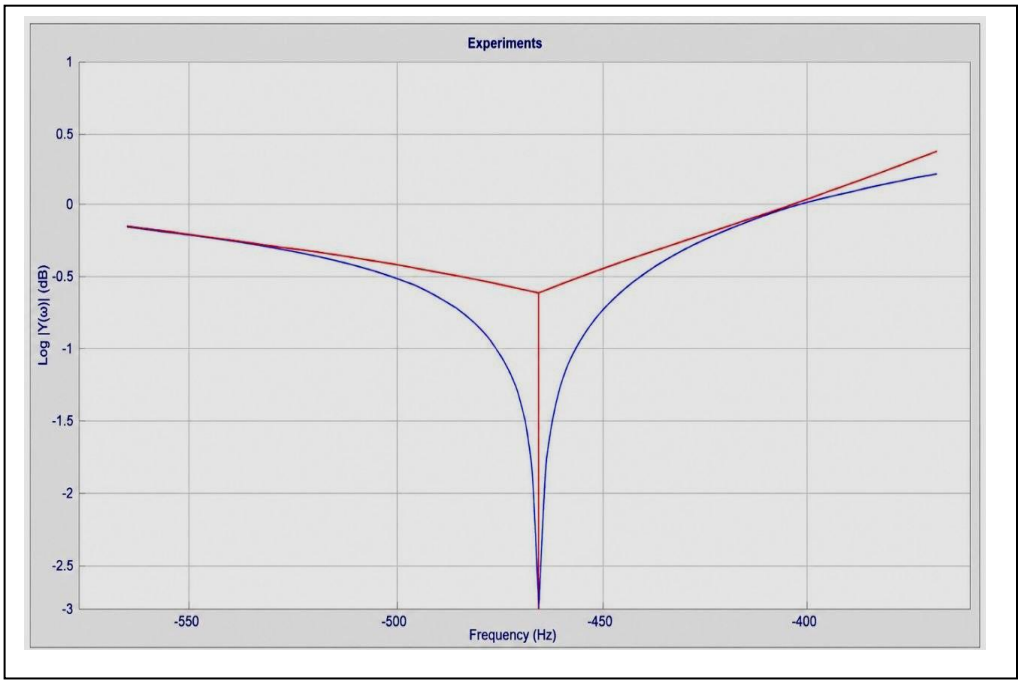
الشكل (IV-13): منحنى تافل لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 200°C



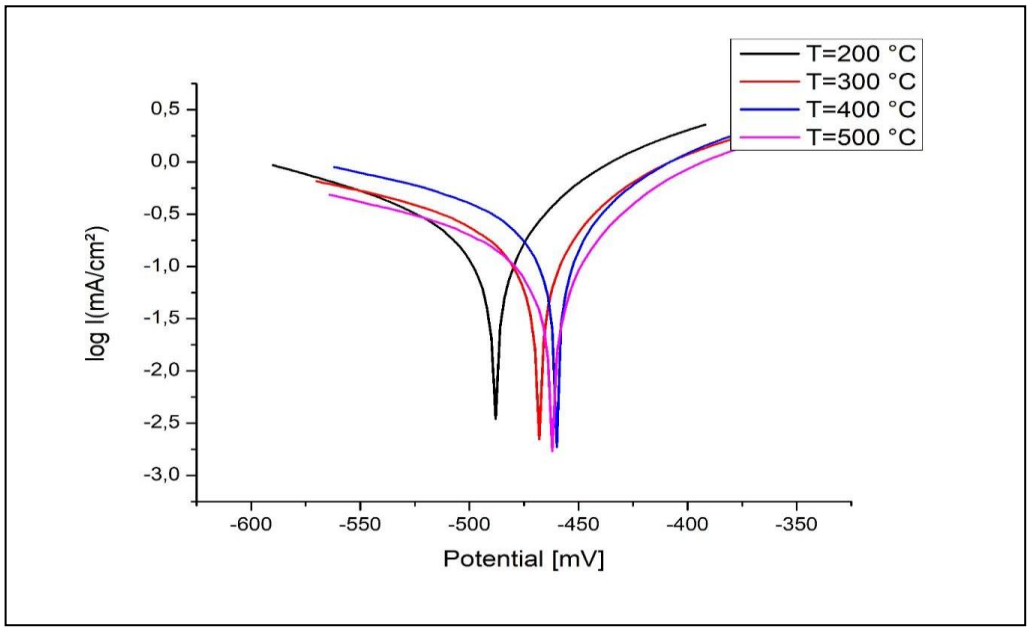
الشكل (IV-14): منحنى تافل لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 300℃



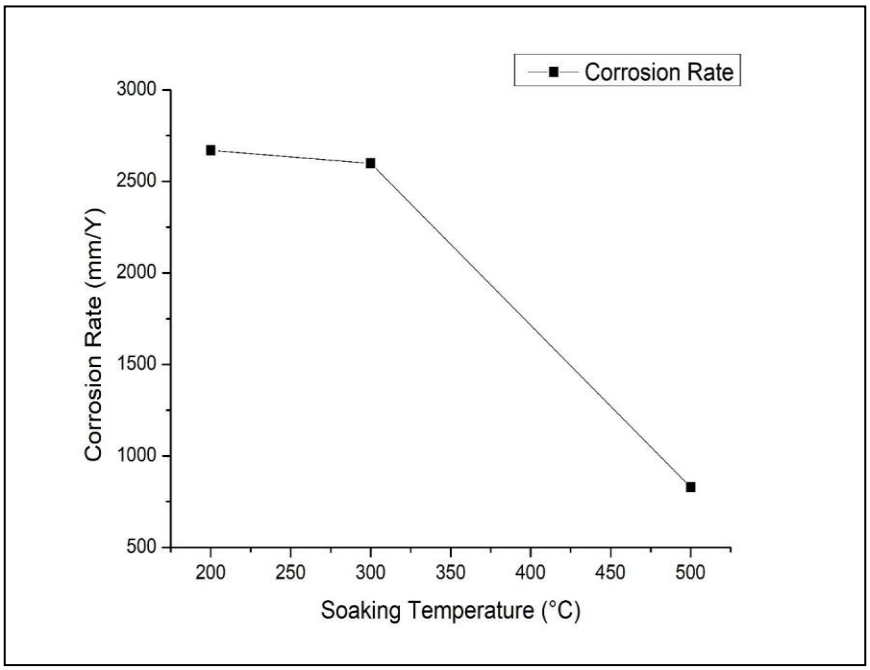
الشكل (IV-15): منحنى تافل لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 400℃



الشكل (16-IV) : منحنى تافل لعينة من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجة حرارة 500°C



الشكل (17-IV): منحنيات تافل لعينات من الفولاذ منخفض الكربون تم مراجعتها في درجات حرارة مختلفة



الشكل (IV-18): منحنى لسرعة تآكل الفولاذ في وسط حمضي بدلالة درجة الحرارة

الجدول(IV-3): نتائج التجارب الكهروكيميائية لتأكل العينات في وسط حمضي

	T=200 °C	T=300 °C	T=400 °C	T=500 °C
E(i0) mV	-488.3	-468.3	-460.1	-431.7
i corrosion (µA/cm²)	0.2297	0.2236	0.3050	0.0714
Rp (ohm.cm²)	93.13	108.61	78.79	296.29
Beta a (mV)	84.7	93.1	101.2	64.1
Beta c(mV)	-166.6	-218.2	-218.3	-227.2
Coefficient	0.9998	0.9999	1.0000	0.9989
Corrosion µm/Y	2.669	2.599	3.545	829.4

IV-8-1- مناقشة استقراء تافل

تُظهر نتائج الاختبارات الكهروكيميائية في وسط حمضي HCl (1M) أن درجة حرارة المراجعة لها تأثير واضح ومباشر على سلوك التآكل للفولاذ منخفض الكربون. حيث لوحظ انخفاض تدريجي في معدل التآكل مع زيادة درجة حرارة المراجعة من 200 °C إلى 500°C، إذ سجلت العينات المعالجة عند درجات حرارة منخفضة قيم تآكل أعلى مقارنة بالعينات المعالجة عند درجات حرارة أعلى، مما يعكس كثافة العيوب البلورية (dislocations)، والتي تُعد مواقع نشطة لبدء عملية التآكل في الوسط الحمضي.كما يساهم ارتفاع درجة حرارة المراجعة في تحسين تجانس توزيع الكربيدات (Fe_3C) داخل مصفوفة الفريت، مما يقلل من تكوين الخلايا الغلفانية الدقيقة بين مناطق الفريت الغنية بالحديد ومناطق الكربيدات الغنية بالكربون، وبالتالي يحد من سرعة التفاعل الأنودي تحسنًا ملحوظًا في مقاومة المادة للتآكل.

ويتوافق هذا السلوك مع نتائج منحنيات الاستقطاب (Polarization Curves) ومنحنيات تافل (Tafel)، حيث نلاحظ انخفاضًا تدريجيًا في كثافة تيار التآكل (I_{corr}) مع ارتفاع درجة حرارة المراجعة، وهو ما يدل على تباطؤ التفاعلات الكهروكيميائية عند سطح المعدن. كما لاحضنا أن جهد التآكل (E_{corr}) أظهر انزياحًا نحو قيم أكثر سلبية مع زيادة درجة الحرارة، من حوالي 420- mV إلى 470- mV، مما يشير إلى تغير في الحالة الكهروكيميائية للمادة مع تحسن مقاومتها النسبية للتآكل.

ونفسير هذا التحسن في مقاومة التآكل من خلال التغيرات البنيوية الناتجة عن رفع درجة حرارة المراجعة، حيث يؤدي ذلك إلى تقليل الإجهادات الداخلية المتبقية الناتجة عن التبريد، بالإضافة إلى تقليل

كما تشير معاملات تافل β_a و β_c إلى انخفاض الميل مع زيادة درجة حرارة المراجعة، مما يدل على أن الطبقة المتكونة من نواتج التآكل، رغم قابليتها للذوبان في الوسط الحمضي، إلا أنها تُساهم مؤقتًا في إبطاء انتقال الأيونات إلى سطح المعدن، وبالتالي تقليل سرعة التفاعلين الأنودي والكاثودي. كما أن الانزياح السالب في جهد التآكل (E_{corr}) بالتوازي مع انخفاض I_{corr} يدل على أن تأثير درجة حرارة المراجعة ينعكس بشكل أوضح على ديناميكية التفاعل الكاثودي المرتبط باختزال الهيدروجين. بناءً على ذلك، يمكن استنتاج أن رفع درجة حرارة المراجعة يؤدي إلى تحسين تدريجي وملحوظ

في مقاومة التآكل، حيث تتحسن البنية المجهرية وتصبح أكثر استقرارًا وتجانسًا، مما يقلل من المواقع النشطة للتآكل، وبالتالي ينخفض معدل التآكل بشكل واضح في وسط HCl.

IV-9- خلاصة

يهدف هذا العمل التجريبي إلى دراسة تأثير المعالجة الحرارية من نوع المراجعة (Tempering) على الفولاذ منخفض الكربون من حيث الخواص الميكانيكية، البنية المجهرية، وسلوك التآكل في وسط حمضي (HCl 2%).

أظهرت النتائج التي تحصلنا عليها أن المراجعة تؤدي إلى تغير واضح في توازن الخواص المدروسة، حيث انخفضت الصلادة تدريجيًا مع ارتفاع درجة الحرارة، وهو ما يعكس تخفيف الإجهادات الداخلية وتحسن استقرار البنية. كما بينت الدراسة المجهرية أن البنية تتكون أساسًا من الفريت والبيرلايت مع تحسن في انتظام وتجانس التوزيع البنيوي عند درجات حرارة أعلى.

أما من الناحية الكهروكيميائية، فقد سجلت العينات المعالجة عند درجات حرارة مرتفعة تحسنًا ملحوظًا في مقاومة التآكل، تمثل في انخفاض كثافة تيار التآكل ومعدل التآكل، وكانت أفضل مقاومة عند 500°C في الوسط الحمضي المدروس.

وبشكل عام، توضح النتائج أن المراجعة الحرارية تمثل عاملًا فعالًا في تحسين مقاومة التآكل واستقرار البنية المجهرية، مقابل انخفاض تدريجي في الصلادة، مما يعكس وجود علاقة توازن بين الخواص الميكانيكية والكهروكيميائية للمادة المدروس

خاتمة عامة

خاتمة عامة:

في ختام هذا العمل التجريبي، تم دراسة تأثير المعالجة الحرارية من نوع المراجعة على الخواص الميكانيكية والمجهرية وسلوك التآكل للفولاذ منخفض الكربون، وذلك من خلال تحليل الصلادة، دراسة البنية المجهرية باستعمال المجهر الضوئي بعد الهجوم الكيميائي بالنيتال (Nital 2%) ، بالإضافة إلى تقييم السلوك الكهروكيميائي في وسط حمضيHCl بتركيز 2.%

أظهرت نتائج اختبار الصلادة أن هناك انخفاضًا تدريجيًا في قيم الصلادة مع زيادة درجة حرارة المراجعة، مما يعكس تحسن استقرار البنية الداخلية وتخفيف الإجهادات المتبقية الناتجة عن التبريد السريع. كما بينت الدراسة المجهرية أن البنية تتكون أساسًا من الفريت والبيرلايت، مع تحسن تدريجي في انتظام التوزيع البنيوي ووضوح الأطوار مع ارتفاع درجة حرارة المراجعة، مما يدل على إعادة تنظيم داخلية للبنية المجهرية للمادة.

أما فيما يخص اختبارات التآكل، فقد أظهرت نتائج منحنيات الاستقطاب واستقراء تافل أن مقاومة التآكل تتحسن بشكل واضح مع ارتفاع درجة حرارة المراجعة، حيث انخفضت كثافة تيار التآكل ومعدل التآكل تدريجيًا، وكانت أفضل مقاومة مسجلة عند 500 °C في الوسط الحمضيHCl .2%.

وبشكل عام، يمكن الاستنتاج أن المعالجة الحرارية من نوع المراجعة تؤثر بشكل مباشر وإيجابي على توازن الخواص المدروسة، حيث تؤدي إلى تحسين مقاومة التآكل مقابل انخفاض تدريجي في الصلادة، مع تحسين الاستقرار البنيوي للمادة.

التوصيات:

بناءً على النتائج المتحصل عليها في هذا العمل، يمكن تقديم التوصيات التالية:

- يُوصى بدراسة تأثير درجات حرارة مراجعة إضافية خارج المجال المدروس (أقل من200°C أو أعلى من 500 °C) لتحديد السلوك الأمثل للمادة بشكل أدق.
- يُستحسن إجراء تحاليل مجهرية أكثر دقة مثل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لدراسة التغيرات البنيوية الدقيقة التي لا يمكن ملاحظتها بالمجهر الضوئي.
- يُنصح بتوسيع دراسة التآكل لتشمل أوساطًا مختلفة (حمضية، قاعدية، وملحية) من أجل تقييم شامل لسلوك المادة في بيئات مختلفة.
- يمكن تحسين دقة النتائج بإجراء اختبارات تكرارية (reproducibility) لضمان موثوقية أكبر للقياسات الكهروكيميائية.

يُوصى بربط النتائج الميكانيكية والكهربوكيميائية بنمذجة عددية مستقبلًا لفهم أعمق لآليات التآكل والتغير البنيوي

الملخص

تم في هذا العمل دراسة تأثير المعالجات الحرارية على سلوك التآكل لصلب منخفض الكربون في مياه الألبيان، بهدف حل مشكلة التآكل الحاد لأنابيب حقن مياه الآبار بحقل "بركاوي "النفطي. شمل الجانب التجريبي إخضاع العينات لمعالجة المراجعة، ثم تقييمها عبر اختبار صلادة فيكرز، والفحص المجهري، واختبارات الاستقطاب الكهروكيميائي في وسط حمضي مسرع (2 .HCl % وأظهرت النتائج أن رفع درجة حرارة المراجعة يؤدي إلى انخفاض تدريجي في الصلادة مع تقليل الإجهادات الداخلية، مقابل تحسن تجانس بنية الفريت والبيرلايت، مما أسهم في انخفاض معدل التآكل وكثافة تياره، مع تسجيل أفضل مقاومة تآكلية للمعدن عند درجة حرارة 500°C، وهو ما يضمن حماية وإطالة العمر الافتراضي للأنابيب النفطية

الكلمات المفتاحية: صلب منخفض الكربون، مراجعة حرارية، تآكل كهروكيميائي، مياه الألبيان، حقل بركاوي.

Abstract

This work investigated the effects of heat treatments on the corrosion behavior of low-carbon steel in Albian water, aiming to mitigate severe corrosion in water-injection pipelines at the "Berkaoui" oil field. The experimental phase involved subjecting the samples to a tempering treatment, followed by evaluation via Vickers hardness testing, microscopic examination, and electrochemical polarization (Tafel) in an accelerated acidic medium (2% HCl). The results revealed that increasing tempering temperature leads to a gradual decrease in hardness and a reduction of residual stresses, while improving the homogeneity of the ferrite-pearlite microstructure. This structural evolution resulted in a significant decrease in both the corrosion rate and the corrosion current density, achieving optimal corrosion resistance at 500°C, thereby ensuring protection and extension of the service life of oil pipelines.

Keywords: *Low-carbon steel, Tempering, Electrochemical corrosion, Albian water, Berkaoui*