جامـــعة قاصـــدي مربـــاح ورقلـــة

كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم الفيزياء

مذكرة ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

شعبة: فيزياء

تخصص: فيزياء المواد

من إعداد الطالبة: وذان فطوم

العنـــوان:

دراسة تأثير زمن المراجعة على الصلادة و الإجهادات الداخلية لصلب منخفض الكربون

د. إبراهيم غربي	أستاذ محاضر أ	جامعة قاصدي مربـــــــــاح ورقلة	رئيسـا
د. صالح تليلي	أستاذ تعليم عالي	جامعة قاصدي مربـــــــــاح ورقلة	مناقشـا
د. عبد اللطيف مامانو	أستاذ محاضر ب	جامعة قاصدي مربـــــــــاح ورقلة	مشرفـا

2026/2025

الاهداء

من قال انا لها نالها وانا لها ان أبت رغما عنها اتيت بها . لم تكن الرحلة قصيرة ولا لها ان تكون .لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق كان محفوفا بالتسهيلات لكنني فعلتها ونلتها . مسك الختام ويوم من الاحلام

الى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة ونصح الامة الى نبي الرحمة ونور العالمين سيدنا محمد

صلى الله عليه وسلم

الى من كلله الله بالهيبة والوقار الى من علمني العطاء بدون انتظار الى من أحمل اسمه بكل

افتخار ارجو من الله ان يمد عمرك لترى ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار والدي العزيز

الى ملاكي في الحياة الى معنى الحب والى معنى الحنان والتفاني الى بسمة الحياة الى من كان

دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي الى اغلى الحبايب أمي الحبيبة

أخي وأخواتي (أسامة ,جميلة, زهرة ,جوهرة) من بهم اكبر وعليهم اعتمد الى شمعة تنير حياتي الى من عرفت معهم

معنى الحياة والى كل عائلتي اعمامي وعمتي وخالتي وأخوالي

الى زميلاتي أميرة، أميمة وأمينة كل من تقاسموا معي الحياة الجامعية والدراسية ووقفوا معي

عند مطبات الحياة الى صديقتي التي تقاسمت معها رحلت هذ البحث صونيا

الى كل من علمني حرفا أساتذتي الافاضل

الى كل من دعمني ماديا ومعنويا حتى بابتسامة الى من سهر وشقي بدعمه وعطائه

مشرفي الغالي الى كل من ساعدني من قريب او بعيد

الى كل هؤلاء اهدي ثمرة تخرجي.

وذان فطوم

شكر وعرفان:

قال عز وجل: " يرفع الله الذين أمنوا منكم والذين أوتوا العلم درجات والله بما تعملون خبير "

اللهم لك الحمد على ما أعنتنا عليه وانعمت علينا به وعلى ما هديتنا اليه على الأصل نمشي

والاصل يدفعنا ان نرد الفضل لأصحابه وان نسدي الشكر لمستحقيه ممن افادنا

ولو بكلمة طية.

اول أتقدم بخالص الشكر للأستاذ المشرف "مامانو عبد اللطيف" على متابعته لهذ البحث وعلى

توجيهاته ونصائحه الهادفة ....

واتقدم بشكري الخاص الى جميع أساتذة الفيزياء وتوجيهاتهم لنا لهم كل التقدير والاحترام.

ولا يفوتني ان أقدم العرفان التام الى كل من ساعدني من قريب او بعيد في انجاز هذ العمل

نسأل الله سبحانه وتعالى ان يجعل ذلك في مزان حسانتهم

جميعا.

فهرس المحتويات

	العنوان	الصفحة
	الإهداء	i
	شكر وعرفان	ii
	فهرس المحتويات	iii
	فهرس الاشكال	v
	فهرس الجداول	vi
	مقدمة عامة	01
	الفصل الأول الصلب الكربوني تعريفه وأنواعه	
I-1	مقدمة	4
I-2	الحديد وسبائكه	4
I-3	تعريف الصلب الكربوني	4
	I-3-1 التصنيف حسب نسبة الكربون	4
	I-3-2 التصنيف المجهري	5
I-4	أنواعه	6
I-5	الصلب منخفض الكربون	6
I-6	خصائصه	7
I-7	الخصائص المجهرية	7
I-8	الخصائص الميكانيكية لصلب منخفض الكربون	09
I-9	خصائص تكنولوجية	10
I-10	تأثير عناصر السبائك على خصائص الصلب	10
I-11	تأثير نسبة الكربون	11
I-12	تأثير بقية العناصر	12
	مراجع الفصل الاول	14
	الفصل الثاني تأثير المعالجات الحرارية على خصائص الصلب الكربوني	
II-1	مقدمة	16
II-2	المعالجات الحرارية تعريفها وأنواعها	16
II-3	تعريف المراجعة	20
II-4	تأثير المراجعة	22
II-5	تأثير درجة الحرارة	23

II-6	تأثير مدة الحفظ	24
II-7	تأثير معدل التسخين والتبريد	25
II-8	الخاتمة	27
	مراجع الفصل الثاني	28
	الفصل الثالث الجانب التطبيقي	
III-1	مقدمة	30
III-2	المادة الخام المستعملة (فولاذ منخفض الكربون)	30
III-3	تحضير العينة	31
III-4	تطبيق المعالجة الحرارية المراجعة على فولاذ منخفض الكربون	33
III-4-1	شروط المعالجة الحرارية	33
III-4-2	تأثير زمن البقاء	34
III-4-3	تأثير درجة الحرارة	34
III-5	معاينة تأثير تغير الحرارة والزمن على خصائص فولاذ منخفض الكربون المدروس	35
III-5-1	فلورية الاشعة السينية(XRF):	35
III-5- 2	التركيبة الدقيقة (الميكروبنيوية) للعينة	36
III-5-3	المعاينة بالمجهر الضوئي (OM)	36
III-5-4	الأشعة السينية(XRD)	37
III-5-5	قياس الصلادةHV	37
III-6	قياس التأكل	38
	مراجع الفصل الثالث	40
	الفصل الرابع النتائج والمناقش	
IV-1	مقدمة	42
IV-2	تحليل المواد الخام	43
IV-3	تأثير المعالجة الحرارية على الخواص الميكانيكية	44
IV-4	اختبار الصلابة	45
IV-5	الخواص الفيزيائية	47
IV-6	اختبار المجهر الضوئي	47
IV-7	تحليل أطياف الاشعة السينية	50
IV-8	تحليل بعد الحبيبات	50
IV-9	تحديد الاجهادات	51
IV-10	استقراء تافل	51
	الخاتمة العامة	59

فهرس الأشكال

الشكل	العنوان	صفحة
(1-I)	مخطط التوازن الحراري حديد - كربون	06
(2-I)	البنية المجهرية للفريت والبرليت	08
(3-I)	البنية المجهرية البرليت	08
(1-II)	دورة المعالجة الحرارية	19
(2-II)	المعالجة الحرارية في دورتين	20
(3-II)	درجات المراجعة	22
(4-II)	رسم تخطيطي يوضح مسارات المعالجات الحرارية لحديد الصلب	28
(1-III)	عينات الفولاذ الكربوني منخفض الكربون مربعة الشكل	30
(2-III)	عينات دائرية الشكل من الفولاذ الكربوني منخفض الكربون	31
(3-III)	ورق الصقل	31
(4-III)	الة الصقل باسطواتين	32
(5-III)	فرن المعالجات الحرارية	33
(6-III)	المجهر الضوئي	36
(7-III)	مخطط يوضح انعكاس الاشعة السينية عبر عائلة مستويات	37
(8-III)	صورة لجهاز انعراج الاشعة السينية	38
(9-III)	الهرم الماسي المستخدم في اختبار فيكرز	38
(10-III)	جهاز قياس الصلادة	39
(11-III)	صورة مجهرية لاثر فيكرز	39
(12-III)	جهاز الجهد الكهربائي voltalab-PGN 201- Potentiostat-Galvanostat	41
(13-III)	صورة مدخلات بيانات العينة المختبرة في جهاز الكومبيتر	41
(1-IV)	منحنى بياني يمثل نتائج الصلادة بدلالة زمن المراجعة	43
(2-IV)	صورة معاينة مجهرية لعينة بدون مراجعة قبل الغمس في محلول نيتال	44
(3-IV)	صورة مجهرية بتكبير X 50لعينة بدون مراجعة بعد الغمس في محلول النيتال	45
(4-IV)	صورة مجهرية بعد معالجة min30 قبل الغمس في محلول النيتال	45
(5-IV)	صورة مجهرية لعينة مراجعة min30 بعد الغمس في محلول النيتال	46
(6-IV)	صورة مجهرية لعينة بعد ساعتين من المراجعة	46

(7-IV)	أطياف حيود الأشعة السينية لعينات الفولاذ قبل وبعد المراجعة عند (60و120دقيقة)	47
(8-IV)	تكبير لأطياف حيود الأشعة السينية للفولاذ منخفض الكربون قبل المراجعة وبعدها عند ازمنة مختلفة (60,120)دقيقة للمستوي (211)	47
(9-IV)	منحنى الاستقطاب الكهروكيميائي لعينة تمت مراجعتها لمدة30 دقيقة	49
(10-IV)	منحنى تافل لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعته لمدة دقيقة30	50
(11-IV)	منحنى الاستقطاب لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعتها لمدة ساعة	50
(12-IV)	منحنى تافل لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعته لمدة 60دقيقة	51
(13-IV)	منحنى استقطاب لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعته لمدة 90دقيقة	51
(14-IV)	منحنى لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعتها لمدة 120دقيقة	52
(15-IV)	منحنى استقطاب لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعتها لمدة120دقيقة	52
(16-IV)	منحنى تافل لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعته لمدة120دقيقة	53
(17-IV)	منحنيات تافل لكل العينات المراجعة لمدة بين 30 و 120	53
(18-IV)	منحنى سرعة التآكل بدلالة زمن المراجعة لفولاذ منخفض الكربون	54

فهرس الجداول

الجدول	عنوان الجدول	صفحة
(1-I)	أنواع الصلب الكربوني	6
(2-I)	أهم الخصائص الميكانيكية	9
(3-I)	تأثير نسبة الكربون على البنية والخصائص	10
(4-I)	العناصر وتأثيرها مع النسب	13
(1-II)	أنواع واهداف كل عملية من عمليات المعالجات الحرارية ونوع التبريد مع الاطوار الناتجة	18
(2-II)	عمليات المعالجات الحرارية واهم استعمالاتها	19
(1-III)	العينات مع ازمنة المراجعة	31
(1-IV)	التركيب الكيمائي لفولاذ منخفض الكربون	41
(2-IV)	قيم الصلادة المقاسة عند ازمنة مختلفة	42
(3-IV)	قيم الصلادة المسجلة في ازمنة مختلفة من المراجعة	43
(4-IV)	نتائج التجارب الكهروكيميائية لتأكل العينات في وسط حمضي	54

مقدمة عامة

مقدمـــــــــة عامـــــــــة:

يعتبر الفولاذ من أكثر المواد المعدنية استخدامًا في التطبيقات الهندسية بفضل ما يتميز به من خصائص ميكانيكية مهمة كالمتانة وقابلية التشكيل نظير تكلفته المنخفضة نسبيًا. ومن بين كل انواعه، يحتل الفولاذ الكربوني مكانة مركزية في قطاعات مثل البناء والنقل والتصنيع الميكانيكي والطاقة، حيث تتعرض المكونات غالبًا لأحمال معقدة وظروف تشغيل قاسية. في العديد من هذه التطبيقات، لا يعتمد أداء وموثوقية الأجزاء الفولاذية على تركيبها الكيميائي وبنيتها المجهرية الأولية فحسب، بل يعتمد أيضًا على المعالجات الحرارية المطبقة أثناء التصنيع.

تُعد المعالجة الحرارية وسيلة أساسية لتعديل البنية المجهرية للفولاذ الكربوني، والتحكم في خصائصه الميكانيكية والوظيفية. اذ تُستخدم على نطاق واسع عمليات المعالجة التقليدية، مثل التصليد والتطبيع، للحصول على توازن بين الصلابة والقوة والمتانة في مكونات مثل الأعمدة والتروس والعناصر الإنشائية. يُنتج التبريد السريع من نطاق الأوستنيت بنى مجهرية مارتنسيتية صلبة وهشة أو بنى مجهرية مختلطة، وغالبًا ما يصاحبها إجهادات داخلية كبيرة نتيجة التبريد السريع غير المنتظم وتحول الطور. هنا يأتي دور عملية المراجعة وهي عبارة عن تسخين مُتحكَّم به لمدة معينة لتقليل الهشاشة، وضبط الصلابة، وتحسين الأداء العام. تتضمن هذه العملية إعادة تسخين المادة المُقسَّاة إلى درجة حرارة أقل من درجة حرارة التحول اليوتكتويدي، مع تثبيتها عند هذه الدرجة لفترة زمنية محددة، ثم تبريدها بمعدل معتدل. خلال هذه العملية، تحدث عدة عمليات مجهرية، تؤثر بشكل كبير على الخواص الميكانيكية خصوصا الصلادة، ويعتمد حجم هذا التأثير بشكل اساسي على درجة حرارة التلدين، ومدة التثبيت، وتاريخ المعالجة الحرارية السابقة.

بالتوازي مع تطور الصلادة، تُمثّل الإجهادات المتبقية جانبًا حاسمًا آخر من سلوك الفولاذ الكربوني المُعالج حراريًا. تنشأ الإجهادات المتبقية غير مرغوب فيها من التدرجات الحرارية، والتحولات الطورية، والتشوه اللدن الذي يحدث أثناء خطوات المعالجة مثل التشكيل، واللحام، والتبريد السريع، والتشغيل الآلي. إذا لم يتم التحكم بها بشكل صحيح، يُمكن أن تُحفّز إجهادات الشد المتبقية بدء التشققات، وتُسرّع تلف الإجهاد، وتشققات التآكل الإجهادي

لذا، يُعد فهم التأثير المراجعة على الصلادة المجهرية والإجهاد المتبقي أمرًا بالغ الأهمية لتحسين أداء ومتانة مكونات الفولاذ الكربوني. فظروف التلدين التي تُوفر صلادة كافية قد تُخلّف حالات إجهاد متبقي غير مرغوب فيها، بينما قد تُؤدي المعالجة التي تُخفف الإجهادات المتبقية بكفاءة إلى انخفاض مفرط في الصلادة

والمتانة. لذا، فإن تحديد علاقات واضحة بين معايير المراجعة، وتطور الصلادة المجهرية، وتوزيع الإجهاد المتبقي ضروري لتحديد نطاقات المعالجة التي تضمن السلامة الميكانيكية والاستقرار البُعدي أثناء تشغيل القطع المصنعة من الفولاذ الكربوني.

في هذا السياق، نسعى في دارسنا هاته ان نعالج هذه الإشكالية، الى أي مدى تساهم عملية المراجعة الحرارية بالتأثير على الصلادة المجهرية والإجهادات المتبقية في الفولاذ الكربوني؟ كما تهدف هده الدراسة الى التعرف على تأثير عوامل المراجعة، وخصوصا مدة التلدين على استجابة الصلادة المجهرية وحالة الإجهاد المتبقي للمادة وعلاقته بخاصية أساسية الا وهي مقاومة الفولاذ الكربوني للتأكل في حامضي، لمعرفة مدى نجاعة المعالجة الحرارية بالمراجعة

وللوصول الى هذا ارتئينا ان تنقسم هذا العمل الى أربعة فصول:

- الفصل الأول "الصلب الكربوني تعريفه وانواعه: يتطرق هذ الفصل الى تعريف الصلب الكربوني وانواعه وخصائصه المجهرية والميكانيكية والتشغيلية وتأثير عناصر السبائك ونسبة الكربون عليه
- الفصل الثاني: " تأثير المعالجات الحرارية على خصائص الصلب الكربوني ": يتطرق الى المعالجات

الحرارية تعريفها وانواعها وتعريف المراجعة وتأثيرها وتأثير درجة الحرارة ومدة الحفظ ومعدل التسخين والتبريد

- الفصل الثالث: والذي يمثل "الجزء التطبيقي "وفيه نتطرق الى مختلف الخطوات العملية لتحضير عينات الصلب منخفض الكربون المستعملة في دراستنا، ابتداء من القص، الصقل، والتنظيف، مرورا ب تطبيق المراجعة في ازمنة مختلفة واخيرا عرض الطرق التجريبية التي تسمح لنا بمعاينة تأثير تغير زمن المراجعة على خصائص فولاذ مثل الصلادة، الاجهادات الداخلية ومقاومة للتأكل.
- الفصل الرابع: والذي نعرض فيه النتائج المتحصلة بعد تطبيق المراجعة على العينات ومقارنة الخصائص مع العينة الخام كما ونحاول مناقشها هذه النتائج ومقارنتها بالدراسات السابقة

و أخير نختم بالخلاصة عامة و التوصيات

الفصل الأول :

الصلب الكربوني تعريفه وأنواعه

I -1 مقدمـــة:

الصلب الكربوني هو سبيكة مكونة من الحديد والكربون تتراوح نسبة عنصر الكربون فيها بين(2_0,2)% بحيث اذ زادت هذه الأخيرة عن 2% تصنف السبيكة على انها حديد زهر أي ان نسبة الكربون هي من تحدد نوع السبيكة . كما تحتوي سبيكة الصلب على عناصر أخرى بنسب ضئيلة مثل :

النيكل والكروم والسيليكون والفسفور .... وغيرها من العناصر الأخرى. [1] الفولاذ ذو أهمية بالغة اذ يدخل في جميع المجالات تقريبا وهو أساس جميع الثورات العلمية والصناعية ويعود هذ التقدم أساسا الى وجود مجموعة واسعة من عمليات التصنيع التي تسمح بتنويع كبير فالخواص الميكانيكية للفولاذ.[7]

I-2 الحديد وسبائكه:

تُعد سبائك الحديد والكربون حجر الزاوية في الصناعات المعدنية، ويتم تصنيفها بشكل أساسي بناءً على نسبة الكربون الموجودة في السبيكة:

- الحديد النقي :(Pure Iron) هو الحديد الذي لا يحتوي على إضافات، ولكن نادرا ما تُطبق عليه المعالجات الحرارية بمفرده لغرض تحسين الخواص الميكانيكية، بل تُطبق غالباً على سبائكه.
- الصلب :(Steel) هو سبيكة من الحديد والكربون تتراوح فيها نسبة الكربون عادةً بين 1.7%و في بعض المراجع قد تصل إلى).2% يتميز الصلب بقدرته العالية على التجاوب مع المعالجات الحرارية لتغيير بنيته المجهرية وخواصه الميكانيكية).

حديد الزهر (Cast Iron): يحتوي على نسبة كربون أعلى من 2% وتصل إلى 6.67% يمتاز بقابلية جيدة للسكب ولكنه يختلف عن الصلب في استجابته الميكانيكية وبنيته الداخلية [6].

I-3 تعريف الصلب الكربوني:

الصلب الكربوني هو النوع الذي تعتمد خواصه بشكل أساسي على كمية الكربون، دون وجود عناصر سبائكية أخرى بكميات مؤثرة (باستثناء المنجنيز والسيليسيوم بنسب ضئيلة).

الخصائص: يتميز بقساوة عالية جداً بعد المعالجة الحرارية ومقاومة كبيرة للبري، ولكنه يفتقر للمطيلية ويكون أكثر هشاشة.

I-3-1 التصنيف حسب نسبة الكربون:

يتم تقسيم الصلب الكربوني إلى ثلاث فئات رئيسية تؤثر بشكل مباشر على استخدامه وقابليته للمعالجة:

1. الصلب منخفض الكربون:(Low Carbon Steel)

- النسبة: يحتوي على نسبة كربون منخفضة (أقل من (0.3.(%
- الخصائص: يتميز بمطيلية عالية وقابلية جيدة للحام والتشكيل البارد.
- الاستخدام: يستخدم في هياكل السيارات، الأنابيب، والمسامير.

2. الصلب متوسط الكربون:(Medium Carbon Steel)

- النسبة: تتراوح نسبة الكربون فيه تقريباً بين 0.3% و0.6%.
- الخصائص: يجمع بين القوة والمطيلية بشكل متوازن. هذا النوع هو الأكثر استخداماً في الأبحاث المتعلقة بتأثير المعالجات الحرارية على مقاومة التآكل والقساوة.
- الاستخدام: يدخل في صناعة التروس، المحاور، وأجزاء الماكينات التي تتطلب متانة متوسطة.

3.الصلب عالي الكربون:(High Carbon Steel)

- النسبة: تتراوح نسبة الكربون فيه بين 0.6% و1.7%.
- الاستخدام: يُستخدم في صناعة العدد القاطعة، النوابض(Springs) ، والسكاكين.

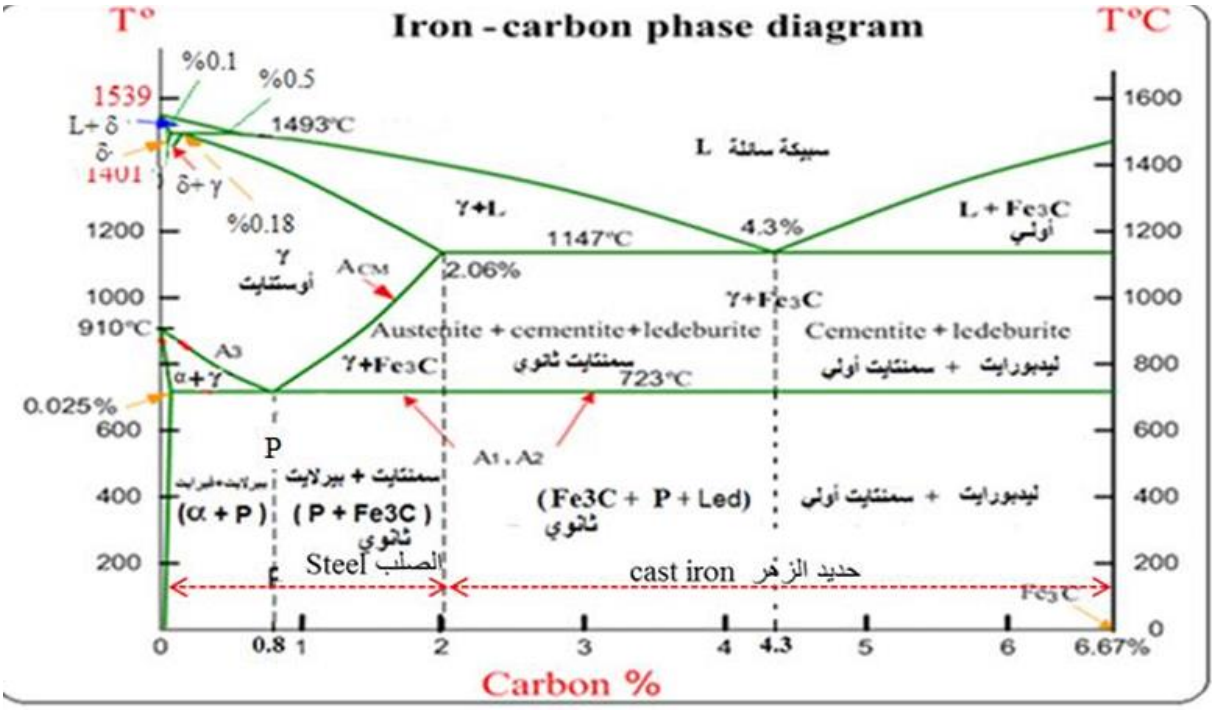
I-3-2 التصنيف المجهري (حسب البنية عند التوازن) :

- بناءً على موقع السبيكة من نقطة "اليوتكتويد (Eutectoid) "في مخطط توازن الحديد والكربون، يُصنف إلى:
- صلب تحت اليوتكتويد :(Hypoeutectoid Steel) يحتوي على أقل من 0.8% كربون، وتتكون بنيته عند التبريد البطيء من "الفريت" و"البرليت."
- صلب فوق اليوتكتويد (Hypereutectoid Steel): يحتوي على أكثر من 0.8% كربون، وتتكون بنيته من "السيمنتيت" و"البرليت." [2]

يصف مخطط التوازن الحراري للحديد _كربون سبائك الحديد والتي تحتوي على ما يصل الى 6,67% من الكربون نسمي المركب الناتج عن الحديد والكربون بنسبة وزنية ثابتة مقدارها 6,67 % بالسمنتايت(Fe_3C) بحيث يبين الشكل (2.I) مخطط التوازن الحراري تركيب السبائك بمراحلها ويدرس هذ المخطط السبائك سبائك الحديد والكربون لحد 6,67%حيث تنقسم حسب نسبة الكربون الى صلب كربوني وحديد زهر من(0 الى 2)% صلب ومن (2, 6,67)% حديد زهر .[6]

I-4 انواعه:

نوع الفولاذ	%نسبة الكربون	الصلابة	الاستخدمات
الفولاذ منخفض الكربون	0,2	قابل للتشكيل بسهولة	هياكل السيارات-الاسلاك- الانابيب-الدراجات
الفولاذ متوسط الكربون	0,6-0,3	صلب	النوابض- الجسور
الفولاذ عالي الكربون	1,5-0,6	صلب جدا	المقادح -المطارق



الشكل(I-1): مخطط التوازن الحراري حديد - كربون

I-5 الصلب منخفض الكربون:

يُعرف هذا النوع تقنياً بالصلب الطري(Mild Steel) ، وهو النوع الأكثر إنتاجاً واستخداماً عالمياً. ترجع خصائصه الميكانيكية المحدودة من حيث القساوة والإجهاد بشكل مباشر إلى بنيته التي يهيمن عليها الحديد

النقي (الفريت). نظراً لنسبة الكربون التي لا تتجاوز 0.3%، فإنه لا يستجيب بفعالية لعمليات التصليد (Quenching)التقليدية لتكوين "المارتنزيت"، لذا يُستخدم غالباً في حالته الملدنة أو المشغولة على البارد.

- أهم التطبيقات: بالإضافة إلى ما ذكرت (السلاسل والبراشيم)، يُستخدم بشكل واسع في الصفائح المعدنية للأجهزة المنزلية، والأسلاك، والجسور والمنشآت المعدنية البسيطة نظراً لسهولة تشكيله وتوفره الاقتصادي [3].

I-6 خصائصه:

من خصائص الصلب منخفض الكربون ليونة ومتانة ممتازتين وكذلك من بين جميع أنواع الصلب الأقل تكلفة في الإنتاج إضافة الى سهل التشغيل واللحام ويستخدم فالصناعة كهياكل السيارات والاشكال الانشائية والانابيب وغيرها [4].

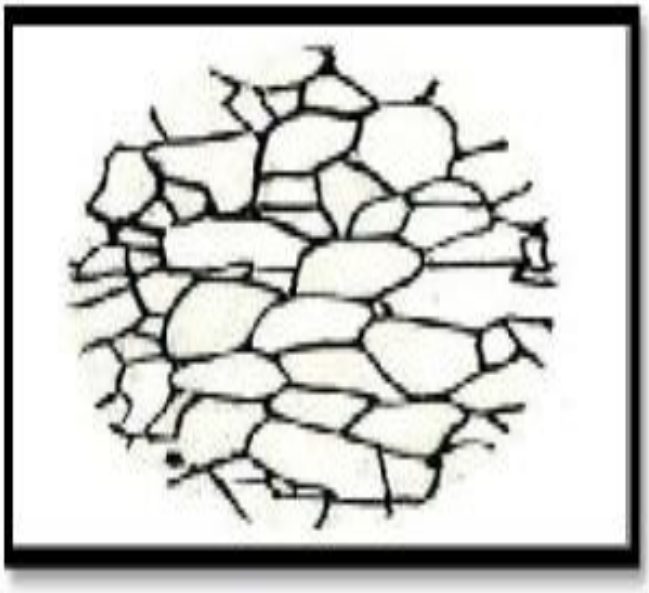
I-7 الخصائص المجهرية:

لقد ذكرت بشكل صحيح أن البنية تتكون من الفريت (Ferrite) كطور مهيمن و البرليت (Pearlite) كطور ثانوي. للتوسع:

- **الفريت :(Ferrite - α)** قابلية ذوبان الكربون في الحديد BCC منخفضة جدًا (0.022% كحد أقصى عند (727 °C وتنخفض إلى 0.008% في درجة حرارة الغرفة). هذا يعني أن معظم الكربون في السبيكة لا يبقى في الفريت بل يُطرد منه ليشكل السمنتيت. هذا هو السبب الجذري لليونة الفريت العالية.

- **البرليت :(Pearlite)** لا يظهر فقط كبقع داكنة، بل هو عبارة عن خلايا رقائقية من الفريت والسمنتيت (Fe_3C).السمنتيت صلب وهش جدًا صلادته ~800 HV. في الصلب منخفض الكربون، هذه الرقائق رفيعة ومتباعدة. كلما زاد الكربون نحو 0.3%، تزداد كمية البرليت، وتقل المسافة بين رقائقه، مما يزيد الصلادة والقوة لكنه يقلل المطيلية.

الحد الأعلى 0.3%: هذا الرقم ليس عشوائيًا. فوق 0.3%، تبدأ كمية البرليت بالزيادة بشكل ملحوظ، وتصعب عملية اللحام وتزداد احتمالية تكوين المارتنزيت في المنطقة المتأثرة بالحرارة (HAZ) عند التبريد السريع وغيرها [2].



الشكل(I-2): البنية المجهرية للفريت والبرليت

الشكل(I-3): البنية المجهرية البرليت

I-8 الخصائص الميكانيكية لصلب منخفض الكربون:

الجدول(I-2): اهم الخصائص الميكانيكية

الخاصية	القيمة التقريبية	ملاحظات توسعية
مقاومة الشد(UTS)	400 - 550 MPa	منخفضة مقارنة بـ 700 MPa +للصلب متوسط الكربون. تظهر ظاهرة نقطة الخضوع (Yield Point Phenomenon)بوضوح، حيث يبدأ التشكل فجأة بعد إجهاد الخضوع العلوي.
إجهاد الخضوع(YS)	220 - 350 MPa	يحدث تشوه لدن بعد هذه القيمة. قابلية التصلد بالتشغيل (Work Hardening)عالية، مما يسمح بزيادة القوة حتى 2-3 مرات بالدرفلة على البارد.
الاستطالة عند الكسر	(25% - 15على 50 مم)	قيمة عالية جدًا، تعكس مطيلية ممتازة. هذا هو السبب في قدرته على امتصاص الطاقة في المنشآت (خاصية مهمة في المناطق الزلزالية).
معامل يونغ(E)	200 GPa	ثابت لجميع أنواع الصلب تقريبًا، بغض النظر عن نسبة الكربون (لأنه يعتمد على قوى الترابط بين ذرات الحديد).
الصلادة برينل (HB)	120 - 160 HB	منخفضة جدًا. يمكن زيادتها إلى ~200 HB بالتشغيل البارد. لا تستجيب للمعالجة الحرارية) التصلب بالتبريد (Quenchingلتشكيل المارتنزيت.
متانة الكسر (Impact Toughness)	) 200 J <شاربي (Vفي درجة حرارة الغرفة	ممتازة. لكنها تنخفض بشدة عند درجات حرارة أقل من درجة حرارة الانتقال من مطيلي إلى قصيف (DBTT) والتي تتراوح بين -20 °Cإلى +20°C، مما يجعله غير مناسب للتطبيقات القطبية بدون إضافات.
مقاومة القص	≈ 0.6 × UTS ~ 240-330 MPa	مهم في تصميم الوصلات (البراشيم، المسامير).
مقاومة الضغط	~ 1.2 × UTS	أعلى من مقاومة الشد، لأن الفشل يحدث بالتحدب (Barreling)وليس بالانفصال.

I-9 خصائص تكنولوجية:

- **الطروقية** :(Malleability) هذه الخاصية تجعل منه المادة المثالية لعمليات الدرفلة على الساخن والبارد، وسحب الأسلاك، وتشكيل الصفائح بالكبس العميق (Deep Drawing) مثل هياكل السيارات والأجهزة المنزلية.

- **قابلية اللحام :(Weldability)** أفضل أنواع الصلب من حيث قابلية اللحام. السبب: قيمة الكربون المكافئة

(Carbon Equivalent - CE)منخفضة جدًا عادة <0.35%. هذا يعني:

- لا حاجة للتسخين المسبق (Preheating) إلا للألواح السميكة جدًا (>30 مم.
- خطر تكون الشقوق الباردة (Hydrogen-Induced Cracking) ضئيل جدًا.
- المنطقة المتأثرة بالحرارة (HAZ) لا تصبح هشة أو صلبة بشكل مفرط.
- **قابلية التشغيل (Machinability)**: قدرة المعدن على التشغيل والقطع والتشكيل [5].

I-10 تأثير عناصر السبائك على خصائص الصلب:

أولا : انها تقلل من حساسية الصلب لفعل العالية فتجعله يحتفظ بخواصه كالصلادة في درجات الحرارة المرتفعة

ثانيا : بعض العناصر مثل الكروم والالمنيوم والسليكون والنحاس تكون طبقة رقيقة من اوكسيدها على سطح الصلب مما يزيد من مقاومته للصدأ والتأكل ثالثا يمكن التأثير على الصلب وجعله نظيفا ويخلصه من الشوائب وذلك بإضافة كمية قليلة من الفناديوم عناصر التسابك وتأثيرها على الصلب:
الكروم , التنجستن ,المولبيديوم ,الفناديوم ,التيتانيوم وهذه عناصر تميل الى تكون كربيدات عناصر تميل الى تحليل كربيدات وانفصال الكربون على شكل جرافيت مثل السليكون,الكوبلت , الالمنيوم والنيكل اما بالنسبة ل المنجنيز ,النيكل ,الكوبلت ,النحاس تزيد من استقرار الاستنايت بينما الكروم التنجستن , المولبيديوم ,الفناديوم, السليكون تزيد من استقرار الفريت [3]

I-11 تأثير نسبة الكربون:

I-11-1 علاقة الكربون بالخواص الميكانيكية (قيم تقريبية للصلب غير المعالج حرارياً):

الجدول(I-3): تأثير نسبة الكربون على البنية والخصائص

نسبة الكربون(%)	البنية المجهرية	مقاومة الشد(MPa)	الصلادة (HB)	الاستطالة (%)	التطبيق النموذجي
0.05 - 0.15	فريت + برليت قليل	300 – 450	80 - 130	25 - 40	صفائح السيارات، الأسلاك
0.15 - 0.30	فريت + برليت(15-25%)	400 – 550	120 - 160	15 - 25	حديد التسليح، الكمرات
0.30 - 0.50	فريت + برليت(30-50%)	550 – 750	160 - 210	10 - 20	أعمدة، تروس (غير مصلد)
0.50 - 0.80	برليت دقيق	700 – 900	200 - 250	8 - 15	سكك حديد، أزاميل يدوية
0.83	برليت كامل(100%)	~900	~250	~8	أقصى قوة شد
0.83 - 1.20	برليت + سمنتيت شبكي	750 – 850	250 - 300	3 - 8	أدوات قطع بسيطة

I-11-2 تفسير انخفاض مقاومة الشد فوق 0.83% كربون (مهم جداً):

من المهم معرفة لماذا تنخفض المقاومة رغم زيادة الصلادة؟ لأن شبكة السمنتيت (Fe_3C) المتصلة عند حدود الحبيبات تمثل مناطق ضعف مستمرة. تحت تأثير إجهاد الشد، تبدأ الشقوق عند هذه الحدود قبل أن تتمكن الحبيبات البرليتية من مقاومة الإجهاد بالكامل.

الصلادة تزداد: بينما تنخفض مقاومة الشد، تستمر الصلادة السطحية في الزيادة (حتى ~HB 800 للصلب فوق اليوتكتويد) بسبب وجود السمنتيت الصلب جدًا.

تطبيق عملي: هذه الخاصية تجعل الصلب فوق اليوتكتويد (C %1.2-1.0) مثاليًا للأدوات التي تحتاج مقاومة للتآكل السطحي ولكنها لا تتعرض لقوى شد كبيرة (مثل ملفات البرادة، أدوات القطع اليدوية).

- معادلة باين (Paine) التقريبية لعلاقة الكربون بالخواص

يمكن تقدير مقاومة الشد (UTS) للصلب الكربوني غير المعالج حرارياً (حتى C %0.8) بالعلاقة التقريبية:

$$UTS(MPA) \approx 300 + 700 \times (\%C)$$

عند C: UTS ≈ 300 + 140 = 440 MPa %0.2

عند 0.5% C: UTS ≈ 300 + 350 = 650 MPa [3].

I-12 تأثير بقية العناصر:

تتمثل هذه التأثيرا في ما يلي :

1 . الفسفور:

الآلية: للفسفور قابلية ذوبان محدودة في الحديد (≈0.1% في درجة حرارة الغرفة). الفائض يترسب على حدود الحبيبات كمركب (Fe_3P) الهش.

تأثير درجة الحرارة: الهشاشة الباردة تصبح خطيرة جدًا تحت -20°C. في درجة حرارة الغرفة، تأثير الفسفور أقل وضوحًا.

الحد المسموح: في الصلب العادي ≤ 0.04% P. في الصلب عالي الجودة ≤ 0.02% P.

استثناء: يضاف الفسفور أحيانًا بنسب صغيرة (0.05-0.10%) لتحسين قابلية التشغيل (Machinability) في الفولاذ الحر التشغيل (Free-cutting steels) مع تعويض الهشاشة بإضافة الكبريت أيضًا. [6]

2. الكبريت (S) - تفصيل "الهشاشة الحمراء" :

الآلية: يتكون كبريتيد الحديد (FeS) الذي يشكل مع الحديد يوتكتيك منخفض الذوبان (≈985°C مقارنة بـ 1538°C للحديد النقي). أثناء التشكيل على الساخن (بين 1000-1200°C)، ينصهر هذا اليوتكتيك مسببًا تشققات بين الحبيبات.

الحل: إضافة المنغنيز (Mn) الذي يتفاعل تفضيليًا مع الكبريت مكونًا كبريتيد المنغنيز (MnS) الذي ينصهر عند درجة حرارة أعلى (≈1600°C). هذا هو السبب في أن جميع أنواع الصلب تقريبًا تحتوي على Mn بنسبة تزيد عن نسبة S بـ 5-10 مرات. الحد المسموح: في الصلب العادي ≤ 0.05% S. في الصلب عالي الجودة ≤ 0.025% S.

3. السيليكون (Si) :

كمزيل للأكسجين: يضاف بنسبة 0.15-0.35% للصلب "المهدأ" (Killed Steel) لمنع تكون فقاعات الغاز أثناء الصب.

لزيادة المرونة: في صلب النوابض (Spring Steel) تصل نسبته إلى 1.5-2.0%، لكن يجب الحذر لأنه يقلل المطيلية واللحامية عند النسب العالية.

4. النحاس (Cu) :

مقاومة التآكل الجوي: يضاف بنسبة 0.2-0.5% لتحسين مقاومة التآكل الجوي (مثل صلب الكورتين Cor-ten). يشكل طبقة أكسيد كثيفة ومتماسكة تمنع التآكل العميق.

تحذير: فوق 0.5% يسبب "هشاشة النحاس" أثناء التشكيل على الساخن بسبب ترسب النحاس على حدود الحبيبات.

5. الفاناديوم (V) :

آلية تثبيت الحبيبات: يشكل كربيدات فاناديوم (VC) دقيقة جدًا (نانومترية) تترسب عند حدود الحبيبات وتمنع نموها عند درجات الحرارة المرتفعة. هذا يطبق مبدأ هول-بيتش (Hall-Petch):

$$\sigma_y = \sigma_0 + k\sqrt{d}$$

حيث

- d هو حجم الحبيبة. كلما صغرت الحبيبات، زاد إجهاد الخضوع.
- كمية الإضافة: تتراوح بين 0.05% و 0.15% في الصلب عالي المقاومة منخفض السبائك (HSLA).

تحسين الاستجابة للتصليد العميق: يعمل الفاناديوم مع الكروم والموليبدنوم لتأخير التحولات الأوستنيتية، مما يسمح بتكوين المارتنزيت بشكل أعمق في القطع السميكة.

الجدول(I-4): العناصر وتأثيرها مع النسب

العنصر	النسبة النموذجية(%)	التأثير الرئيسي	التأثير السلبي عند الزيادة
C	0.05 - 1.2	يزيد القوة والصلادة	يقلل المطيلية واللحامية
Mn	0.3 - 1.5	يثبت الكبريت، يزيد القوة	يقلل المطيلية
Si	0.15 - 0.35	يزيل الأكسجين، يزيد المرونة	يقلل اللحامية
P	<0.04	يزيد قابلية التشغيل (قليلاً)	هشاشة باردة
S	<0.05	يزيد قابلية التشغيل معMn	هشاشة حمراء
Cu	0.2 - 0.5	مقاومة التآكل الجوي	هشاشة التشكيل الساخن
V	0.05 - 0.15	يصغر الحبيبات، يزيد المتانة	غالي الثمن

مراجع الفصل الأول

المراجع بالعربية:

[1] ع بن حامد, منحنيات مطيافية الكترون اوجي مسجلة على طبقات رقيقة من التيتان مرسبة على مساند من الفولاذ , مذكرة ماستر اكاديمي , جامعة ورقلة 2016.

[2] أ سليماني , مساهمة في دراسة طبقات رقيقة معدنية من مركب التيتان مرسبة على مساند فولاذية , مذكرة ماستر أكاديمي , جامعة ورقلة 2014.

[3] قسم التقنيات الميكانيكية , المعهد التقني , جامعة الفرات الأوسط التقنية.

[5] ر. محمد منير , قسم التقنيات الميكانيكية المرحلة الثانية ,المعهد التقني كربلاء, جامعة الفرات التقنية.

[6] د.محمد ياسين خواص مواد هندسية , قسم الميكانيك , المعهد التقني بعقوبة.

المراجع باللاتينية:

[4] Callister, W.D. ,& Rethwisch , D. G .Materials Science and Engineering An introduction 9th ed . New York :Wiley 2014

[7] Ch.Naima. B.chafia. Influence des Traitements thermiques sur Les Propriétés Mécaniques d'un Acier a outils pour travail a chaud (X38 Cr Mo Vs-1) Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou Faculte du Génie de la Construction Département de Génie Mécanique Octobre 2016

الفصل الثاني :

تأثير المعالجات الحرارية على خصائص الصلب الكربوني

II-1 مقدمة :

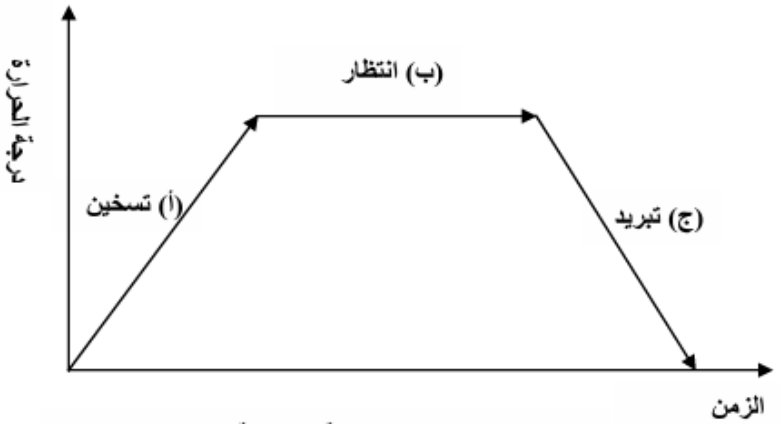
المعالجات الحرارية للسبائك والفلزات هي عمليات تبريد وتسخين لهذه السبائك من اجل تحسين بعض من خواصها كتحسين قابليتها للتشغيل ورفع صلادة الصلب الابتدائية بواسطة عملية التصليد. وكما يمكن زيادة مقدار الاستطالة ومقاومة الشد الى حد كبير يعني ان المعالجات الحرارية يمكنها تغيير الكثير من خواص الى الصلب في حدود واسعة. [2] ان الدور الذي يلعبه علم المعالجات الحرارية في علم الهندسة الميكانيكية أصبح ذو أهمية بالغة جدا وذلك التأثير البالغ للمعالجة الحرارية في خواص المعدن [1]

II -2 المعالجات الحرارية تعريفها وانواعها :

II-2-1 المعالجة الحرارية (Heat Treatment):

هي مجموعة من العمليات التقنية المُتحكم بها تهدف إلى تغيير البنية المجهرية للمواد الصلبة (خاصة المعادن والسبائك)، وبالتالي تعديل خواصها الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية بشكل مقصود [3]. ، من خلال تعريضها لدورة حرارية محددة تشتمل على ثلاث مراحل أساسية:

- **التسخين :(Heating)** رفع درجة حرارة المادة إلى قيمة معينة (غالباً فوق درجة التحول الطوري الحرجة) بمعدل محكوم.
- **المكوث أو النقع :(Soaking / Holding)** تثبيت درجة الحرارة عند القيمة المطلوبة لفترة زمنية كافية لضمان تجانس البنية واكتمال التحولات الطورية.
- **التبريد (Cooling):** خفض درجة حرارة المادة بمعدل محكوم (بطيء، متوسط، أو سريع جداً) يحدد الأطوار النهائية المتكونة وبالتالي الخواص النهائية للمادة.



الشكل(II-1): دورة المعالجة الحرارية

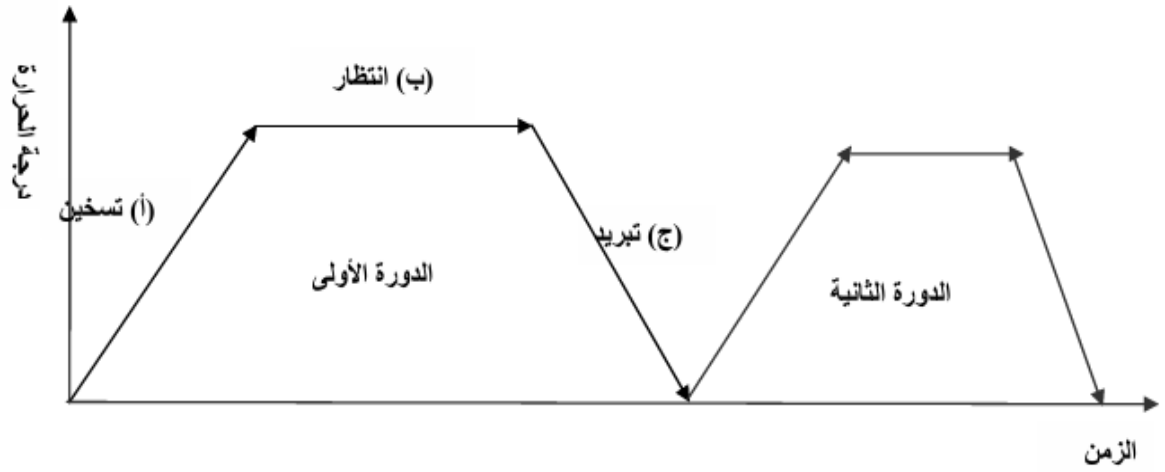
ا_ تسخين عينة الاختبار بمعدل محدد الى درجة حرارة معينة حسب نوع المعالجة

بالاحتفاظ بالعينة عند درجة الحرارة هذه لفترة من الزمن حسب ابعاد العينة والهدف التأكد من وصول درجة الحرارة الى جميع أجزاء العينة

ج_ تبريد العينة ويعتمد على نوع العملية ويكون في احد الأوساط التالية: هواء , ماء , زيت, محلول ملحي او تبريد داخل الفرن

في المعالجات الحرارية الصناعية الكبرى يمكن تكرار المراحل الثلاث السالفة الذكر عدة مرات يعني

تتكون المعالجات من اكثر من دورة كما هو موضح فالشكل (II.2)



الشكل(II-2): المعالجة الحرارية في دورتين

II-2-2 أنواعها :

هناك عدة أنواع من المعالجات الحرارية شائعة الاستعمال لكل منها خصائصها والاهداف

المرجوة منها نذكر ابرزها :

بناءً على الدورة الحرارية والهدف، تقسم إلى:

1. التلدين (Annealing)

- الهدف: تليين المعدن، إزالة الإجهادات الداخلية، تحسين قابلية التشغيل.
- الدورة: تسخين ← مكوث طويل ← تبريد بطيء جدًا (في الفرن).
- النتيجة: بنية برليتية خشنة، أقرب ما يكون للتوازن الحراري.

2. التطبيع (Normalizing)

- الهدف: تجانس البنية، تحسين الخواص الميكانيكية العامة، تصغير حجم الحبيبات.
- الدورة: تسخين فوق A_3 ← مكوث قصير ← تبريد في الهواء (بطيء نسبيًا).
- النتيجة: بنية برليتية دقيقة أقوى من التلدن، وأفضل من الصب أو الدرفلة مباشرة.

3. التصلب (Hardening) بالتبريد المفاجئ

- الهدف: تكوين المارتنزيت للحصول على أقصى صلادة وقوة.
- الدورة: تسخين فوق A_3 ← مكوث قصير ← تبريد سريع جدًا (ماء، زيت، محلول بوليمري).
- النتيجة: مارتنزيت (بني إبرية)، صلد جدًا لكنه قصيف.

4. المراجعة (Tempering)

- الهدف: تخفيف القصافة الناتجة عن المارتنزيت مع الحفاظ على أكبر قدر ممكن من الصلادة.
- الدورة: إعادة تسخين المارتنزيت إلى درجة حرارة منخفضة (150-650°C) ← تبريد بطيء.
- النتيجة: مارتنزيت مراجَع (Tempered Martensite) - صلادة أقل لكن متانة أعلى.

5. المعالجة بالمحلول الجامد والتبريد الفجائي للسبائك (Solution Treatment & Aging)

لسبائك غير الحديدية (مثل الألومنيوم والتيتانيوم) - ليست للصلب الكربوني العادي. يلخص لنا الجدولين (II-1) وII-2) النقاط المهمة لكل عملية من عمليات المراجعة التي تم التطرق اليها

الجدول(II-1): أنواع واهداف كل عملية من عمليات المعالجات الحرارية ونوع التبريد مع الاطوار الناتجة

النوع	الهدف الأساسي	دورة التبريد	الطور الناتج
1.التلدين (Annealing)	تليين المعدن، إزالة الإجهادات، تحسين قابلية التشغيل	بطيء جداً في الفرن	برليت خشن (Coarse Pearlite)
2.التطبيع (Normalizing)	تجانس البنية، تصغير حجم الحبيبات، تحسين الخواص العامة	بطيء في الهواء الساكن	برليت دقيق (Fine Pearlite)
3.التصلب (Hardening)	تحقيق أقصى صلادة وقوة عن طريق تكوين المارتنزيت	سريع جداً ماء، زيت، محلول ملحي	مارتنزيت (Martensite)
4.المراجعة (Tempering)	تخفيف القصافة الناتجة عن التصلب مع الحفاظ على صلادة مقبولة	بطيء بعد التسخين إلى درجة حرارة منخفضة	مارتنزيت مراجع (Tempered Martensite)
5.المعالجة السطحية (Case Hardening)	تصلب السطح فقط مع بقاء القلب مطيلياً (للتطبيقات التي تحتاج سطح صلد وقلب مطيل)	حسب العملية	

الجدول(II-2): عمليات المعالجات الحرارية واهم 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

3-II تعريف المراجعة :

تُعد المراجعة عملية حرارية تكميلية لا يمكن الاستغناء عنها بعد عملية التصليد (Quenching)، حيث أن الصلب المصلد يكون في حالة من الإجهاد الشديد والهشاشة العالية التي تمنع استخدامه عملياً[3]

أولاً: التعريف الإجرائي هي عملية إعادة تسخين الصلب الذي سبق تصليده (أي الذي يمتلك بنية مارتنزيتية) إلى درجة حرارة أقل من درجة التحول الحرجة السفلى (A1)، والتي تتراوح عادةً بين200 C و 650 ° Cحسب الغرض المطلوب، ثم البقاء عند هذه الدرجة لفترة كافية، يتبعها تبريد بمعدل مناسب (غالباً في الهواء أو الزيت، وأحياناً الماء كما أشار المرجع [3]).

ثانياً: الأهداف والنتائج المجهرية تتمثل الغاية من المراجعة في إحداث تغييرات بنيوية تهدف إلى:

• تقليل الهشاشة (Brittleness): تحويل المارتنزيت غير المستقر (BCT) إلى "مارتنزيت مراجع" (Tempered Martensite)، وهو طور أكثر استقراراً يجمع بين الصلادة والمتانة.

• إزالة الإجهادات الداخلية: التخلص من الضغوط الذرية الناتجة عن التبريد المفاجئ في عملية التصليد، مما يحمي القطعة من التصدع أو التشوه التلقائي.

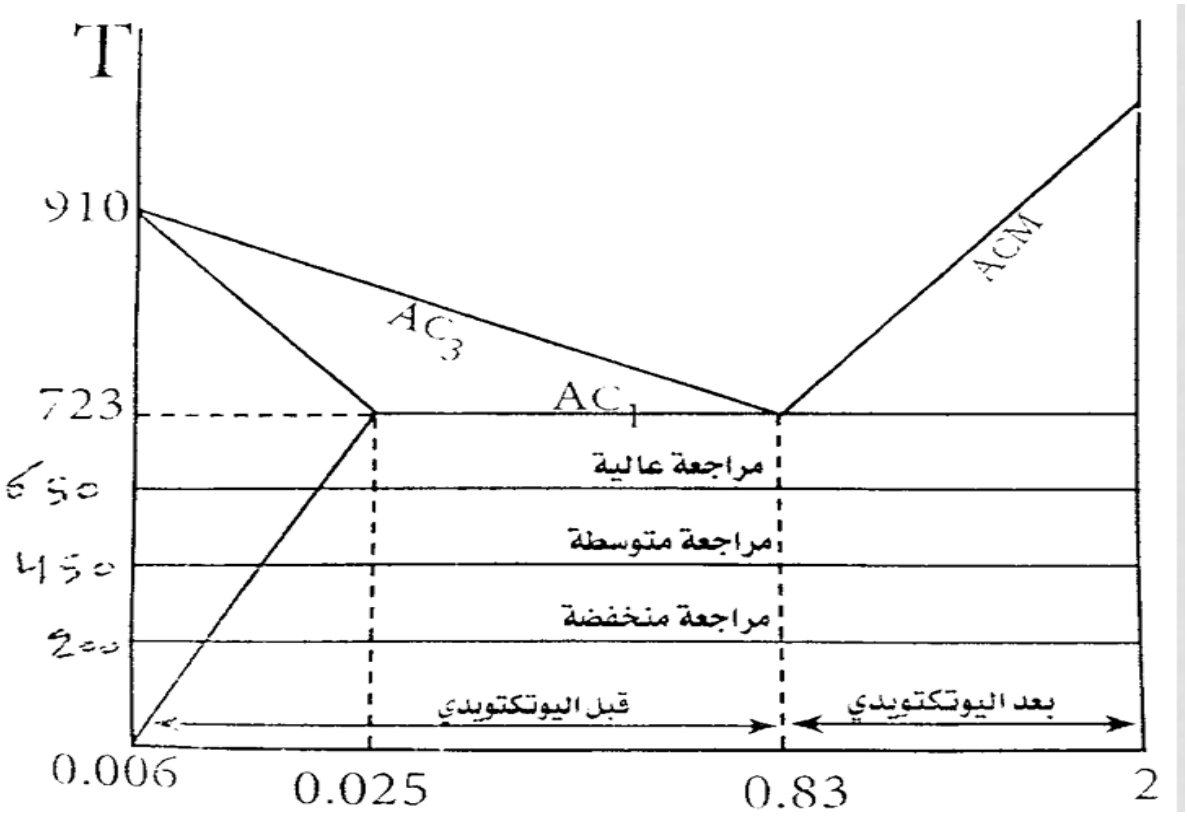
• تحسين المطيلية وقابلية التشكيل: زيادة قدرة المعدن على تحمل الصدمات (Impact Resistance) على حساب انخفاض طفيف ومسيطر عليه في القساوة.

ثالثاً: العلاقة بين درجة الحرارة والزمن (كما يوضح الشكل II.4) وفقاً للمرجع [1]، يعتمد نجاح العملية على التحكم الدقيق في:

1درجة حرارة المراجعة: كلما زادت درجة الحرارة، زادت الليونة وانخفضت القساوة. (مثلاً: المراجعة عند درجات منخفضة 220ه-320ه م تهدف للحفاظ على قساوة عالية مع تقليل الهشاشة فقط).

2. **المكوث**: لضمان وصول الحرارة إلى قلب المعدن وإتمام التحولات البنيوية.

يشير الشكل (II.3) في دراستنا إلى المنحنى الزمني-الحراري الذي يوضح كيف يبدأ التسخين من حالة الصلادة القصوى ليصل إلى استقرار الخواص الميكانيكية المطلوبة للتطبيق الصناعي المستهدف. [1]



شكل(II-3): درجات المراجعة

II-4 تأثير المراجعة :

تُعد عملية المراجعة هي الضابط النهائي للخواص الميكانيكية للصلب بعد التصليد؛ فبينما يمنح التصليدُ الصلبَ "القوة"، تمنحه المراجعة "الصلاحية للاستخدام". ويظهر تأثيرها في النقاط التالية:

زيادة المتانة (Increasing Toughness): تعتبر زيادة المتانة الهدف الأسمى للمراجعة. فالمعدن بعد التصليد يمتلك بنية مارتنزيتية هشة لا تتحمل الصدمات. أثناء المراجعة، تمتص المادة الطاقة الحرارية مما يسمح بإعادة ترتيب الذرات وتخفيف حدة الهشاشة، وبالتالي تزداد قدرة المعدن على امتصاص الطاقة ومقاومة الكسر عند التعرض لأحمال مفاجئة.

التخلص من الإجهادات الداخلية (Stress Relief): يؤدي التبريد السريع جداً في عملية التصليد إلى حبس ذرات الكربون داخل الشبكة البلورية للحديد، مما يخلق ضغوطاً داخلية هائلة (Internal Stresses) قد تؤدي لتشوه القطعة أو تشققها تلقائياً. المراجعة تعمل على "استرخاء" هذه الشبكة وتصريف هذه الإجهادات، مما يضمن استقراراً أبعادياً للقطعة الصناعية.

تقليل الصلادة والهشاشة (Reducing Hardness and Brittleness): هناك علاقة عكسية بين درجة حرارة المراجعة والصلادة؛ فكلما ارتفعت درجة حرارة المراجعة، انخفضت الصلادة (Hardness) لصالح تحسن المطيلية. هذا "التنازل" المدروس عن جزء من الصلادة ضروري جداً لجعل المعدن أقل هشاشة (Less Brittle)، حيث تتحول بنية المارتنزيت الإبرية الحادة إلى بنية حبيبية أكثر استقراراً تسمى "المارتنزيت المراجع".

ملاحظة إضافية من واقع المراجع (أهمية الزمن والحرارة): يشير البحث في المرجع [1] إلى أن اختيار درجة حرارة المراجعة يعتمد على التطبيق النهائي:

1مراجعة منخفضة (200°C - 300°C): للحفاظ على صلادة عالية جداً مع تحسين طفيف في المتانة (تستخدم لسكاكين القطع).

2مراجعة مرتفعة (أعلى من 500°C): للحصول على متانة عالية جداً وقابلية للتشكيل (تستخدم لأجزاء المحركات والتروس). [1].

II-5 تأثير درجة الحرارة:

تُعد درجة الحرارة "المتغير الحاكم" في عملية المراجعة، حيث تحدد نوع التحولات الطورية ومستوى الطاقة الحركية المتاحة لذرات الكربون المذابة في المارتنزيت. يتم تقسيم تأثيراتها إلى ثلاثة نطاقات رئيسية:

1. المراجعة بدرجة حرارة منخفضة (100°م - 250°م):

• التأثير الميكانيكي: لا يحدث تغيير جوهري في قيم الصلادة (Hardness) ومقاومة الشد، بل تظل قريبة من قيمها بعد التصليد مباشرة.

• الهدف التقني: الهدف الأساسي هنا هو إزالة الإجهادات الداخلية (Internal Stresses) الناتجة عن التبريد السريع دون فقدان القساوة.

• البنية المجهرية: يبدأ الكربون بالتحلل الجزئي من المارتنزيت لتكوين كربيدات دقيقة جداً (مثل كربيد إبسيلون ε)، مما يقلل من هشاشة المعدن ويحميه من التصدع التلقائي.

2. المراجعة بدرجة حرارة متوسطة (250°م - 450°م):

• التأثير الميكانيكي: يبدأ منحنى الصلادة بالانخفاض الملحوظ مقابل زيادة واضحة في المتانة (Toughness) والمطيلية.

• الهدف التقني: تُستخدم هذه الدرجات لتصنيع الأجزاء التي تتطلب توازناً بين القوة والقدرة على امتصاص الصدمات، مثل النوابض (Springs) والسكاكين المتينة.

• البنية المجهرية: يتحول المارتنزيت إلى بنية تسمى "التروستيت المراجع" (Tempered Troostite)، وهي بنية حبيبية ناعمة جداً تمنح المعدن مرونة جيدة.

3. المراجعة بدرجة حرارة عالية (450°م - 650°م):

• التأثير الميكانيكي: تصل المتانة والمطيلية إلى أقصى قيمها، بينما تنخفض الصلادة إلى أدنى مستوياتها في هذا النوع من المعالجة.

• الهدف التقني: تُخصص هذه المعاملة للأجزاء التي تتعرض لظروف تشغيل قاسية وإجهادات ديناميكية عالية (متغيرة باستمرار)، مثل الأعمدة المرفقية (Crankshafts) وأذرع التوصيل، حيث يكون الكسر المفاجئ مرفوضاً تماماً.

البنية المجهرية: تندمج الكربيدات لتكون حبيبات كروية من السيمنتيت داخل أرضية من الفريت، وتسمى هذه البنية "السوربيت المراجع" (Tempered Sorbite)، وهي المسؤولة عن المتانة العالية جد [1].

يشير المرجع [1] إلى أن اختيار الدرجة المناسبة يعتمد كلياً على التوازن المطلوب (Trade-off) بين القساوة واللدونة. فكلما ارتفعت درجة الحرارة، زاد تحلل المارتنزيت المشوه ذرياً إلى بنية أكثر استقراراً وهدوءاً ميكانيكياً، وهو ما يفسر انخفاض معدل فقدان الوزن عند اختبار التآكل في الأوساط المختلفة بزيادة درجة حرارة المراجعة في بعض الحالات.

II-6 مدة الحفظ:

بناءً على ما ورد في المرجع [1] والمرجع [3]، إليك توسعاً تقنياً دقيقاً حول تأثير مدة الحفظ (Holding Time/Soaking Time) في المعالجات الحرارية

II-6-1 تأثير مدة الحفظ (Holding Time):

تُعد مدة الحفظ، أو ما يُعرف زمنياً بـ "زمن النقع"، الركيزة الثالثة في دورة المعالجة الحرارية بجانب درجة الحرارة ومعدل التبريد. لا تكتمل التحولات البنيوية بمجرد وصول سطح القطعة إلى درجة الحرارة المطلوبة، بل يجب الحفاظ عليها لفترة زمنية محددة لتحقيق الآتي:

تجانس درجة الحرارة (Thermal Equilibrium): تنتقل الحرارة من الوسط الخارجي (الفرن) إلى سطح العينة ثم إلى لبها (Core) عبر التوصيل. تضمن مدة الحفظ أن تصل كامل القطعة، بغض النظر عن سمكها، إلى درجة حرارة موحدة. أي عدم كفاية هذا الزمن يؤدي إلى تفاوت في الخواص الميكانيكية بين السطح والقلب.

إتمام التحولات الطورية (Structural Transformation): لكي تتحول البنية المجهرية بالكامل (مثلاً من الفريت والبرليت إلى الأوستنيت في عملية التصليد، أو تحلل المارتنزيت في المراجعة)، تحتاج ذرات الكربون إلى زمن كافٍ للانتشار (Diffusion) داخل الشبكة البلورية. مدة الحفظ هي التي تسمح لهذه التغيرات الكيميائية والمجهرية بالحدوث بشكل مستقر وشامل.

ذوبان العناصر السبائكية والكربيدات: في حالات الصلب الكربوني أو السبائكي، توجد كربيدات معقدة تحتاج إلى زمن عند درجة حرارة عالية لتذوب تماماً في المحلول الجامد. مدة الحفظ تضمن تفكك هذه التجمعات وتوزيع الكربون بانتظام، مما يعطي صلادة متجانسة بعد التبريد.

II-6-2 العوامل المؤثرة على تحديد مدة الحفظ :

• سمك القطعة (Section Thickness): القاعدة العامة غالباً ما تقدر بـ 20 إلى 30 دقيقة لكل 25 ملم من السمك لضمان التغلغل الحراري.

• نوع الفرن: تختلف مدة الحفظ في أفران الهواء عنها في أفران الأملاح المنصهرة (التي تنقل الحرارة بشكل أسرع).

• التركيب الكيميائي: وجود عناصر تعيق الانتشار (مثل الكروم أو الفناديوم) قد يتطلب زيادة في مدة الحفظ.

ملاحظة تحذيرية: الزيادة المفرطة في مدة الحفظ (Over-soaking) قد تؤدي إلى نتائج عكسية، مثل نمو الحبيبات البلورية (Grain Growth) بشكل كبير، مما يؤدي إلى انخفاض المتانة وزيادة هشاشة المعدن، أو قد تسبب ظاهرة إزالة الكربون (Decarburization) من السطح[1].

II-7 تأثير معدل التسخين و التبريد:

تعتبر سرعة انتقال الحرارة من وإلى العينة العامل الحاسم في تشكيل البنية المجهرية النهائية، وتعتمد هذه العملية على التوازن بين الظروف الخارجية للفرن والخصائص الفيزيائية للمعدن نفسه.

أولاً: مرحلة التسخين (Heating Stage)

يعتمد امتصاص العينة للحرارة على خاصيتين فيزيائيتين أساسيتين تضمنان وصول العينة إلى حالة التوازن الحراري دون إحداث عيوب:

1. **حالة السطح (Surface Absorption):** يلعب السطح دور المستقبِل الأول للطاقة الحرارية. السطح الذي يتمتع بقدرة امتصاص عالية يقلل من الزمن اللازم لرفع درجة حرارة القشرة الخارجية.

2. **الناقلية الحرارية (Thermal Conductivity):** هي قدرة المادة على نقل الحرارة من السطح إلى اللب (Core). في الصلب الكربوني، تضمن الناقلية الجيدة تجانس الحرارة في كامل أجزاء القطعة،

مما يمنع حدوث "إجهادات حرارية" ناتجة عن تمدد السطح بسرعة أكبر من القلب، وهو ما قد يؤدي إلى حدوث تشققات دقيقة (Micro-cracks) قبل البدء بالتبريد.

ثانياً: مرحلة التبريد (Cooling Stage)

تعتبر هذه المرحلة هي "المصنع" الذي تتشكل فيه الأطوار المجهرية. وتختلف أنواع التبريد حسب "شدة التبريد" (Severity of Quench) والهدف من المعالجة:

1. التبريد داخل الفرن (Furnace Cooling):

النوع: تبريد بطيء جداً.

الغرض: عملية التخمير (Annealing).

النتيجة: الحصول على بنية مستقرة تماماً (فريت وبرليت خشن)، مما يمنح المعدن أقصى درجات الليونة.

2. التبريد في الهواء الساكن (Air Cooling):

النوع: تبريد متوسط السرعة.

الغرض: عملية المعادلة (Normalizing).

النتيجة: الحصول على بنية برليت ناعم، مما يحسن الخواص الميكانيكية ويزيد من تجانس الحبيبات.

3. التبريد في الزيت (Oil Quenching):

النوع: تبريد سريع.

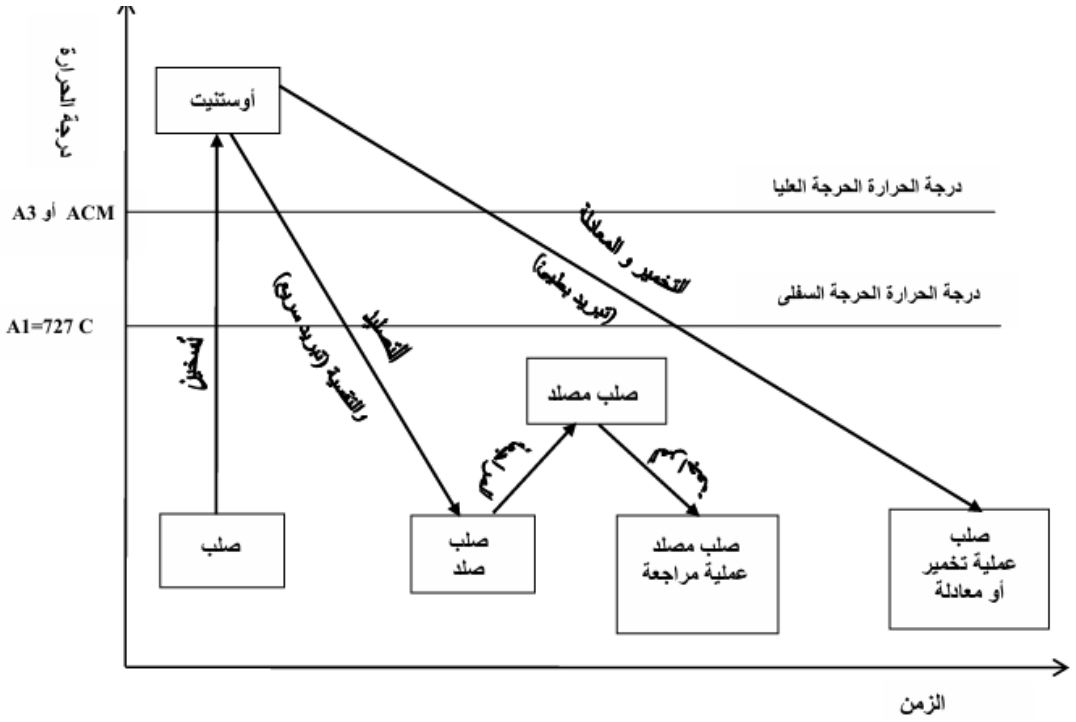
الغرض: عملية التصليد (Hardening) للأنواع الحساسة من الصلب.

النتيجة: يقلل من مخاطر التشوه والتصدع مقارنة بالماء، مع إعطاء صلادة عالية.

4. التبريد في الماء (Water Quenching):

النوع: تبريد سريع جداً.

الغرض: عملية التصليد للصلب الكربوني البسيط. النتيجة: الحصول على بنية المارتنزيت الصلبة جداً، لكنه يتطلب حذراً بسبب الإجهادات العالية التي يولدها. [1]



الشكل(II-4): رسم تخطيطي يوضح مسارات المعالجات الحرارية لحديد الصلب

II-8 الخاتمة:

تطرقنا في هذ الفصل الى المعالجات الحرارية وانواعها وتأثيرها على الصلب الكربوني بحيث عرفنا ان الهدف الرئيسي من أي عملية معالجة هو تحسين خواص محددة فالمعدن وذلك عن طريق احداث تغيرات مطلوبة في بنية المعدن ويتم ذلك بعملية تسخين المعدن

مراجع الفصل الثاني

[1] ر. محمد منير , قسم التقنيات الميكانيكية المرحلة الثانية ,المعهد التقني /كربلاء, جامعة الفرات الأوسط التقنية. 2023

[2]: تخصص ميكانيك الإنتاج , المعالجات الحرارية لسبائك الصلب الكربوني , علم المواد الوحدة السادسة

[3] : كتاب اساسيات تكنولوجيا التصنيع (تشكيل المعادن بدون قطع) للمؤلف احمد زكي دار النشر القاه

الفصل الثالث :

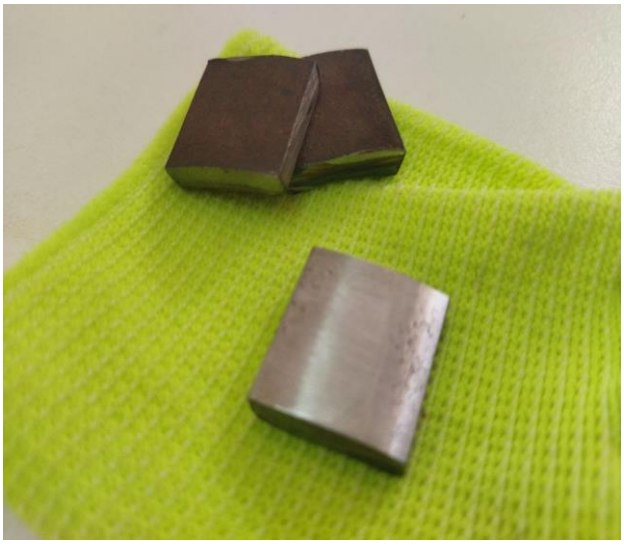
الجانب التطبيقي (التحضير والتجريب)

1- مقدمـــــــــــــــــة:

في هذ الفصل نتطرق الى الجانب التطبيقي للدراسة حيث تم تطبيق المعالجة الحرارية بالمراجعة على الفولاذ منخفض الكربون من خلال تثبيت درجة الحرارة للفرن وتغيير زمن البقاء وبعدها تم تحليل تأثير هذه التغيرات على الخصائص البنيوية والميكانيكية باستعمال تقنيات تحليل مختلفة. من بين اهداف هذ العمل يتمثل الهدف الأول في دراسة تأثير المعالجات الحرارية على بنية وخواص الفولاذ منخفض الكربون ولتحقيق هذه الغاية استخدمت عدة تقنيات بما في ذلك المجهر الضوئي وحيود الاشعة السينية و اختبار الصلابة .[5] الهدف الثاني هو الى أي مدى يؤثر زمن البقاء على المعالجة و الخصائص , و لتحقيق الأهداف استخدمنا في هذه الدراسة فولاذ منخفض الكربون وهو فولاذ شائع الاستخدام بحيث قمنا بقص وصقل عينات محضرة ثم قمنا بعملية المراجعة فالفرن بتغيير الزمن وثبتنا الحرارة 400 درجة المئوية .

III-2 المادة الخام المستعملة (فولاذ منخفض الكربون):

نظرا لانتشار الواسع لفولاذ منخفض الكربون في التطبيقات الصناعية وسهولة تأثره بالمعالجات الحرارية وتكلفته المناسبة تم في هذه الدراسة استعماله كعينة أساسية للتجارب حيث حظرنا 5 عينات بشكل أقراص قطرها 1سم و5 اخرين مربعين الشكل قطرهم 2سم من محل التلحيم بن كينة لتلحيم الانابيب , وذلك لتسهيل اجراء التجارب وضمان تجانس المعالجة الحرارية .



الشكل(III-1): عينات فولاذ كربوني منخفض الكربون مربعة الشكل

الشكل(III-2): عينات دائرية الشكل من الفولاذ الكربوني منخفض الكربون

III-3 تحضير العينة:

القص:

تم قطع عينات قطرها 1سم بشكل أقراص وأخرى مربعة الشكل بقطر 2سم وذلك لتسهيل لتسهيل التعامل معها اثناء التجارب .

الصقل :

قمنا بصقل سطح العينات وذلك باستخدام أوراق صنفرة بدرجات خشونة مختلفة 60,80, 100,,120180, 1200 بهدف إزالة الشوائب السطحية بواسطة الة الصقلFM.300 Polisseuse.عادة عملية ما يتم الصقل تحت الماء لتجنب تسخين سطح العينة وتغير الاطوار الموجودة . الصقل من المراحل الحاسمة في تحضير العينات لأنها تؤثر بشكل مباشر على دقة النتائج التجريبية .

الشكل(III-3): ورق الصقل

الشكل(III-4): الة الصقل باسطواتين

التنظيف :

تم تنظيف العينات باستخدام ماء مقطر والايثانول لإزالة بقايا الشوائب وبقايا ميكانيكية او ملوثات سطحية قبل اجراء عملية المراجعة

تلميع :

تم تلميع السطح للحصول على سطح خال من الخدوش وهو شرط ضروري لرؤية البنية المجهرية بوضوح .بعد التلميع , تم اجراء عملية الحفر الكيميائي باستعمال كاشف مناسب مثل محلول النيتال نسبة 2% (حمض النتريك مع الايثانول) وتركيبه كالاتي : حمض النتريك 2% (HNO_3) , ايثانول

%98(CH3-CH2OH)حيث يعمل هذ الكاشف على اظهار حدود الحبيبات والاطوار المختلفة داخل البنية . تعتبر هذه المرحلة حساسة جدا , اذ ان مدة الحفر وتركيز المحلول يؤثران بشكل مباشر على وضوح النتائج . ويستغرق التفاعل الكيميائي بضع ثوان ثم تغسل العينات بالماء المقطر وتجفف باستخدام ايثاتول. تصبح العينات جاهزة للفحص المجهري .

III-4 تطبيق المعالجة الحرارية المراجعة على فولاذ منخفض الكربون:

كما سبق وتعرفنا عن مفهوم المراجعة في الفصل الثاني وهي عملية تجرى عادة بعد عملية التصليد بهدف تصحيح العيوب الناتجة عن عملية التصليد للفولاذ (الاجهادات الداخلية و الهشاشة) يسخن الفولاذ المبرد (بحسب القوة المطلوبة) ثم يثبت عند تلك الدرجة ويبرد الى درجة حرارة الغرفة ,[6] وفي دراستنا قمنا بتطبيق المعالجة الحرارية بالمراجعة على عينات الفولاذ منخفض الكربون بهدف دراسة تأثير زمن البقاء على خصائصه الميكانيكية والبنيوية

III-4-1 شروط المعالجة الحرارية :

قمت بوضع العينات فالفرن عند درجة حرارة ثابتة ¬400°c حيث تم تثبيت درجة الحرارة طوال التجربة مع ضبط توقيت لمدة ساعتين وكل نصف ساعة نقوم بإخراج عينة من الفرن لتبريدها فالهواء

الشكل(III-5): فرن المعالجات الحرارية

III-4-2 تأثير زمن البقاء :

تم تغيير زمن البقاء داخل الفرن على فترات زمنية منتظمة حيث تم اخراج العينات كل نصف ساعة وذلك وفق الأزمنة التالية:

الجدول(III-1): العينات مع ازمنة المراجعة

الزمن (دقيقة)	درجة الحرارة (C°)	العينة
30	400	A1
60	400	A2
90	400	A3
120	400	A4

وبعد ذلك تم تبريد جميع العينات في الهواء عند درجة حرارة الغرفة

III-4-3 درجة الحرارة:

رغم تثبيت درجة الحرارة في هذه الدراسة لاكن لها تأثير في عملية المراجعة بحيث تختلف درجات حرارة المراجعة حسب الهدف منها فنجد درجة حرارة بين °100و200°تكفي لإزالة الاجهادات ولا تؤثر على الخواص الميكانيكية بينما اذ كانت تتروح بين 200 و450 درجة مئوية فانها تعمل على زيادة المتانة وتخفيض الصلادة , وإذ كانت بين 450و600 درجة مئوية في هذه الدرجة تعمل على زيادة المتانة الى القيمة القصوى.[3]

III-5 معاينة تأثير تغير الحرارة والزمن على خصائص فولاذ منخفض الكربون المدروس :

III-5-1 فلورية الاشعة السينية :(XRF):

تم استعمال الاشعة السينية لتحديد التركيب الكيميائي الصلب منخفض الكربون , حيث تنشأ الاشعة السينية عندما يصدم الكترون مسرع في مجال كهربائي بهدف مصنوع من مادة معدنية يسمى الهدف بالمصعد ولا تتحول كل طاقة الكترون الى طاقة اشعاعية ولذلك سميت الاشعة السينية .

يستعمل التحليل الكيفي والكمي للأشعة السينية للكشف عن البنية البلورية لجميع المعادن ومعرفة المركبات الكيميائية لها , وتتمثل الأهداف الأساسية من الدراسة التحليلية لهذه الاطياف في :

- تحديد مواقع النهايات العظمى والتي من خلالها نتعرف على بنية وطبيعة المعدن بالإضافة لمعرفةجميع اطواره.
- انزياح الطيف بقيمة 2θ دليل على وجود اجهادات داخلية للمعدن المدروس .
- تحديد تركيز او كثافة الاطوار المشكلة للمعدن بمعرفتنا لشدة النهايات العظمى لأي طيف .
- التغير في الشدة $I\Delta$ للنهايات العظمى يحدد النسيج البلوري للمعدن . [2]

في دراستنا قمنا بتعريض العينة لأشعة سينية بواسطة جهاز XRFمما أدى الى انبعاث اشعاع تم التقاطها من الجهاز لتحليلها وتحديد نوع العناصر الموجودة وتركيزها النسبي بدقة عالية .وتحسب طاقة الفوتون في الأشعة السينية بوحدات eVوالذي طول موجته بالانقستروم Å من العلاقة :

$$\mathbf{E = \frac{12400}{\lambda}}$$

ويتراوح الطول الموجي للأشعة السينية المستخدمة في مجال دراسة التراكيب البلوري بين 0,5 Åو2,5 Å.[1]

III-5-2 التركيبة الدقيقة (الميكروبنيوية) للعينة:

تعد دراسة التركيبة الدقيقة ضرورية لفهم العلاقة بين البنية المجهرية والخصائص الميكانيكية خاصة أثير المعالجة الحرارية على تطور البنية حيث تشمل التركيبة الدقيقة الى البنية الداخلية يعني على المستوى المجهري من حيث حجمها وشكل الحبيبات وتوزيع الأطوار المختلفة داخل الفولاذ .

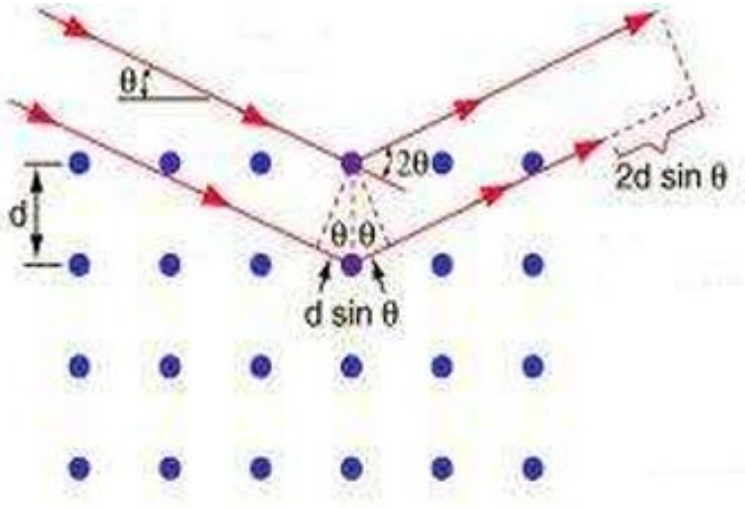
III-5-3 المعاينة بالمجهر الضوئي (OM):

بعد الانتهاء من عملية الصقل لكل العينات تم فحصها باستخدام المجهر ال ضوئي (OM) مزود بنظام تصوير يتم التحكم فيه بواسطة الكمبيوتر وذلك من اجل ملاحظة البنية المجهرية بتكبير يصل الى 1200والتأكد من جودة تحضير السطح المصقول الشكل (III.6). سمح هذ الفحص بالكشف عن الخصائص البنيوية الأولية قبل اجراء المعالجة الحرارية مما يساهم في تسهيل تحليل التغيرات التي تطرأ لاحقا. حيث عند فحص العينات تحت المجهر لوحظ ان التركيبةالمجهرية الصلب منخفض الكربون تتكون أساسا من طورين اساسين : الفريت والبرليت كما يظهر تغير تدريجي في شكل وتوزيع هذه الاطوار مع زيادة زمن المراجعة .كما تم استعمال المجهر الضوئي للمقارنة بين الصورة المجهرية للعينة قبل وبعد المعالجات الحرارية حيث يمكن ملاحظة تغيرات واضحة فالبنية مثل نمو الحبيبات وإعادة توزيع الأطوار

الشكل(III-6): المجهر الضوئي

III-5-4 ا الأشعة السينية (XRD):

تعتمد هذه التقنية على التفاعل المرن لحزمة أحادية اللون من فوتونات الأشعة السينية مع المادة البلورية .[5] يعد حيود الأشعة السينية طريقة شائعة الاستخدام لدراسة البنية البلورية وتحديد الاطوار البلورية الموجودة في العينة حيث بعد تحضير سطح العينة بشكل جيد من صقل وتنظيف قمنا بوضع العينة داخل جهاز XRD كما هو موضح في الشكل (III.8)وتم اجراء المسح الزاوي (θ2) ضمن مجال مناسب بعدها تم تسجيل شدة الأشعة المنعكسة بدلالة الزاوية θ2. ويوضح الشكل (III.7) مخطط الاشعة السينية المنعكسة



الشكل(III-7): مخطط يوضح انعكاس الاشعة السينية عبر عائلة مستويات

كما يعطى قانون براغ بالعلاقة التالية :

$$2dsin\theta = n\lambda$$

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

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2} + L^2} \ (\text{Å})$$

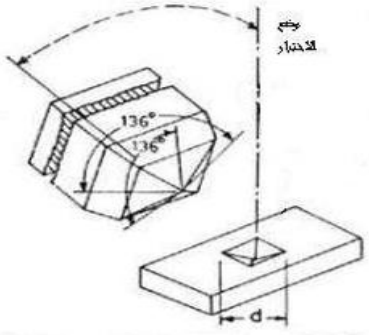
في الشبكة المكعبة

الشكل(III-8): صورة لجهاز انعراج الاشعة السينية

III-5-5 قياس الصلادة HV:

هي مقاومة المادة للخدش و الاختراق بمادة أخرى وتقاس مقاومة الخدش وفق سلم موس وهو سلم وضعه فريدريك موس (1839_1773) والذي اختار عشرة معادن كنقاط مرجعية بدءا من الطلق الذي صلادته1الى الماس الذي صلادته 10 ويستخدم حاليا سلم موس المعدل مضاف اليه 9 معادن أخرى كنقاط مرجعية وتقاس مقاومة التلثيم وفق سلالم أخرى مثل برينل و روكوبل و فيكرز وغيرها.

في اختبار فيكرز للصلادة يستخدم مبين او مخترق مصنوع من الماس قاعدته على شكل هرم يكون بين الوجه والوجه المقابل له 136 درجة كما هو موضح فالشكل ادناه .[2]



الشكل(III-9): صورة لجهاز انعراج الاشعة السينية

ويقدر رقم الصلادة كالاتي:

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

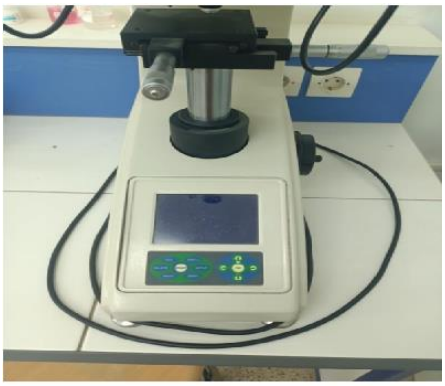
VHN: رقم فيكرز للصلادة

P : الحمولة المؤثرة بالكيلوغرام

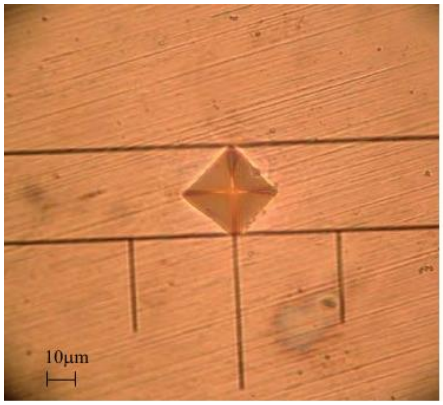
d : قطر الأثر

α : زاوية بين كل وجهين متقابلين من المخترق الماسي

في هذه الدراسة تم استخدام جهاز قياس الصلادة التالي:



الشكل(III-10): صورة لجهاز انعراج الاشعة السينية



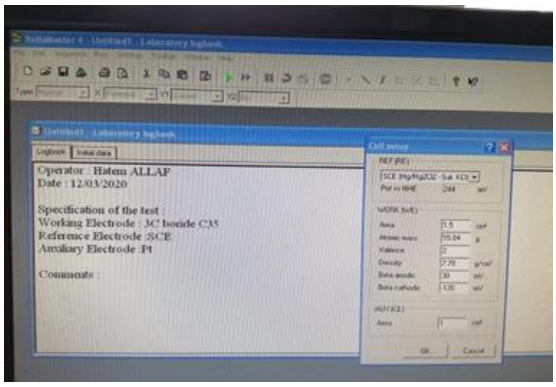
الشكل(III-11): صورة لجهاز انعراج الاشعة السينية

III-6 قياس التأكل:

التأكل هو السبب الرئيسي لتلف وتدمير معظم المواد الطبيعية او المصنعة وكل شي يتأكل وكل بيئة مسببة للتأكل [7]. ولقياس سرعة التأكل استخدمنا طريقة التأكل الكهروكيميائي بحيث تتم عن طريق الحصول على القياسات الكهروكيميائية من خلال اعداد خلية التأكل للعينة واستخراج البيانات المحوسبة وهي منحنيات الاستقطاب الكهروكيميائي , كما يحدد معدل التأكل من منحنى تافال (taffal)(لوغاريتم التيار مقابل الجهد) ويؤخذ بعين الاعتبار في هذه الطريقة سمك القطع للعينات حيث تحدد في هذهالتجربة ب$1,5cm^2$. مبدأ هذه التقنية الكهروكيميائية يعتمد على تطبيق قيم متغيرة للكمون من خلال Voltalab

201 على العينة المختبرة وهي) Electrode (Working بحيث يتم غمرها في محلول حمض الكلور HClفي وعاء بيشر بوجود الكترود كمسرى مرجعي والالكترود المساعد من البلاتين بحيث يتم توصيل جميع المساري الى الجهاز voltalab.PGN 201 ثم يتم التأكد من توصيل الالكترودات واعداد خلية التأكل بشكل صحيح. وكذلك يتم ادخال العينة المختبرة ويتم اعداد مدخلاتالتجربة في برنامج volta master 4 بعدها نقوم بإدخال المعلومات الخاصة بالعينة كما يظهر فالشكل (12.III)[4].

الشكل(12-III): جهاز الجهد الكهربائي voltalab.PGN 201. Potentiostat-Galvanostat



الشكل(13-III): صورة مدخلات بيانات العينة المختبرة في جهاز الكومبيتر

مراجع الفصل الثالث

المراجع بالعربية:

[1] ع بن حامد, منحنيات مطيافية الكترون اوجي مسجلة على طبقات رقيقة من التيتان مرسبة على مساند من الفولاذ , مذكرة ماستر اكاديمي , جامعة ورقلة 2016 .

[2] أ سليماني , مساهمة في دراسة طبقات رقيقة معدنية من مركب التيتان مرسبة على مساند فولاذية , مذكرة ماستر اكاديمي , جامعة ورقلة 2014.

[3] ر. محمد منير , قسم التقنيات الميكانيكية المرحلة الثانية ,المعهد التقني /كربلاء, جامعة الفرات الأوسط التقنية.

[4] ح. شتاتي, دراسة مقاومة تأكل الصلب الكربوني المعالج C35 في أوساط مختلفة ,المجلة الدولية للعلوم والتقنية , قسم الفيزياء , مخبر العلوم التطبيقية والتعليمية المدرسة العليا للأساتذة الاغواط

المراجع باللاتينية:

[5] Ch.Naima. B.chafia. Influence des Traitements thermiques sur les Propriétés Mécaniques d'un Acier a outils pour travail a chaud (X38 Cr Mo Vs1) Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou Faculte du Génie de la Construction département de Génie Mécanique Octobre 2016

[6] Traitement thermique de aciers.

[7] CH . Koceila Effet d'un traitement thermique sur les propriétés mécaniques et la résistance à piqûre d'un soudure d'un acier à haute limite élastique APIX52 dans un milieu industriel simulé. Ecole Nationale Polytechnique . Département de Métallurgie juin 2014.

الفصل الرابع :
النتائج والمناقشة

IV-1 مقدمـــــــــــــــــــة:

يتناول هذ الفصل عرض وتحليل النتائج المتحصل عليها من مختلف التجارب التي أجريت على الفولاذ منخفض الكربون وذلك بهدف بدراسة تأثير المعالجة على خصائصه الميكانيكية . وبالتالي في هذ الفصل نعتمد على عرض النتائج وتفسيرها وربطها بالتحولات البنيوية التي تحدث داخل المادة مع الاعتماد على المعارف النظرية لفهم التغيرات المسجلة. ولتقييم تأثير عامل الزمن على تطور البنية المجهرية وانعكاسه على الخواص خاصة الصلادة اعتمدنا على تثبيت درجة الحرارة وتغيير زمن البقاء داخل الفرن. وفي هذ الإطار تم استخدام مجموعة من التقنيات للتحليل من بينها تحليل التركيب الكيمائي وقياس الصلادة بالإضافة الى المعاينة المجهرية.

IV-2 تحليل المواد الخام:

تم استخدام جهاز XRF لتحليل العينات المحضّرة مسبقًا، حيث وُضعت العينة بشكل مباشر داخل حجرة التحليل دون الحاجة إلى تحضير معقد، مما يحافظ على سلامتها. يقوم الجهاز بإرسال حزمة من الأشعة السينية نحو سطح العينة، ثم يلتقط الإشعاع المنبعث ويحلله لتحديد نوع العناصر الموجودة وتركيزها النسبي بدقة عالية.

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.

من مزايا هذه التقنية أنها سريعة، غير مدمرة، ولا تتطلب تحضيرًا معقدًا للعينات، إضافة إلى دقتها العالية في تحليل معظم العناصر. ومع ذلك، فإنها تكون أقل دقة في قياس العناصر الخفيفة جدًا مثل الكربون، لذلك غالبًا ما تُستخدم كأداة تأكيد عامة للتركيب الكيميائي وليس لقياس دقيق جدًا لنسبة الكربون.

وبالتالي، سمح استخدام تقنية فلورية الأشعة السينية في هذا العمل بالحصول على تحليل التالي :

الجدول (IV-1): التركيب الكيمائي لفولاذ منخفض الكربون

العنصر	Fe	C	Mn	P	S	Ti	V	Ni
النسبة %	98	0,22	1,2	0,03	0,02	0,04	0,05	0,15

IV-3 تأثير المعالجة الحرارية على الخواص الميكانيكية :

تؤثر المعالجات الحرارية بشكل مباشر على الخواص الميكانيكية للفولاذ وذلك نتيجة التغيرات التي تحدث في البنية المجهرية اثناء عمليات التسخين والتبريد. حيث من خلال مشاهدتنا لصور المعاينة المجهرية قبل وبعد المراجعة للعينات لاحظنا تغيرات داخل البنية المجهرية مع زيادة زمن المراجعة عند درجة حرارة ثابتة قدرها 400c.° تؤدي المعالجة الحرارية الى تغير في توزيع أطوار الفريت والبرليت وحجم الحبيبات داخل البنية المجهرية مما ينعكس على خواص المادة كالصلادة والليونة والمتانة وتساهم في تخفيف الاجهادات الداخلية المتبقية داخل المعدن. ومن خلال النتائج التجريبية المتحصل عليها لوحظ ان زيادة زمن المراجعة تؤدي الى تقليل كثافة العيوب

البلورية بالإضافة الى نمو الحبيبات مع الزمن. في حالة المراجعة يؤدي رفع زمن البقاء عند درجة حرارة ثابتة الى تغيرات تدريجية في البنية الداخلية للفولاذ ,وبالتالي فان التحكم في شروط المعالجة الحرارية يسمح بالحصول على الخواص الميكانيكية المناسبة تتوافق مع طبيعة التطبيق الصناعي المطلوب.

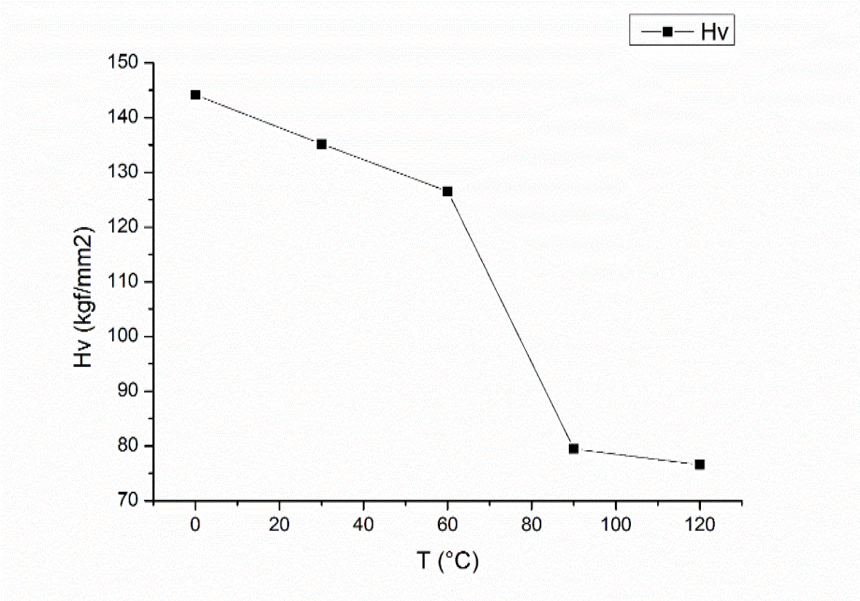
IV-4 اختبار الصلابة :

قمنا باختبار الصلادة على العينات المدروسة باستعمال اختبار فيكرز بحيث تم تكرار القياس اربع مرات لكل عينة ثم حساب القيمة المتوسطة للصلادة من اجل الحصول على نتائج اكثر دقة وتمثيلا يبين الجدول التالي قيم الصلادة (HV) المقاسة عند ازمنة مختلفة من المراجعة مع قيم d1وd 2 كما تم ادراجهم في برنامج Excel وحساب المتوسط d moyen وHV moyen

الجدول (IV-2): قيم الصلادة (HV) المقاسة عند ازمنة مختلفة

A1	d1	d2	d moyen	HV	HV moyen
30	117,17	117,5	117,335	134,7	135,175
30	115,34	119,32	117,33	134,6	
30	116,54	117,96	117,25	134,8	
30	116,7	116,34	116,52	136,6	
60	128,93	118,03	123,48	121,6	126,5
60	119,82	121,64	120,73	127,3	
60	117,22	120,61	118,915	131,1	
60	118,85	124,32	121,585	126	
90	155,8	158,09	156,945	75,2	79,475
90	147	153,22	150,11	82,2	
90	149,54	152,9	151,22	81	
90	150,39	154,98	152,685	79,5	
120	137,69	136,33	137,01	98,7	76,525
120	170,13	165,48	167,805	65,8	
120	160,18	160,09	160,135	72,3	
120	160,86	166,12	163,49	69,3	

انطلاقا من القيم المتوسطة للصلادة (HV moyen) لكل زمن مختلف تمكنا من رسم منحنى تغير الصلادة بدلالة الزمن (t) باستعمال برنامج origin



الشكل (IV-1): منحنى بياني يمثل نتائج الصلادة بدلالة زمن المراجعة

الجدول (IV-3): قيم الصلادة المسجلة في ازمنة مختلفة من المراجعة

درجة حرارة المراجعة (دقائق)	الصلادة على سلم فيكرز
0	144,13
30	135,175
60	126,5
90	79,475
120	76,525

من خلال المنحنى والنتائج المحصل عليها نلاحظ ان قيم الصلادة تنخفض تدريجيا مع زيادة زمن المراجعة عند درجة حرارة ثابتة 400°C أي هناك تناسب عكسي بين قيم الصلادة وزمن المراجعة يمكن تفسير هذ السلوك بتأثير المعالجة الحرارية بحيث تؤدي الى تخفيف الاجهادات الداخلية أي زيادة زمن المراجعة يسمح بزيادة استرخاء الاجهادات المتبقية داخل المعدن وزيادة المرونة وبالتالي تقليل مقاومة اختراق المادة ومنه انخفاض

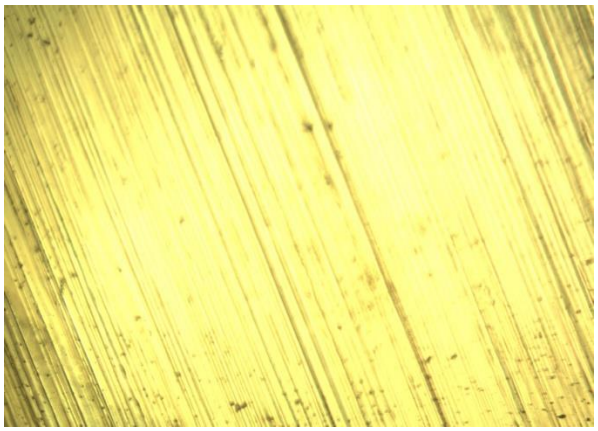
الصلادة .كما ان زيادة زمن المراجعة يساهم في نمو الحبيبات أي ان كلما زاد الزمن الحبيبات تكبر وعدد الحدود الحبيبية ينقص يعني حدود اقل تؤدي الى مقاومة وصلادة اقل وكذلك زيادة زمن المراجعة يساهم في تقليل العيوب البلورية وهذ يؤدي الى انخفاض مقاومة المادة للاختراق .

5-IV الخواص الفيزيائية :

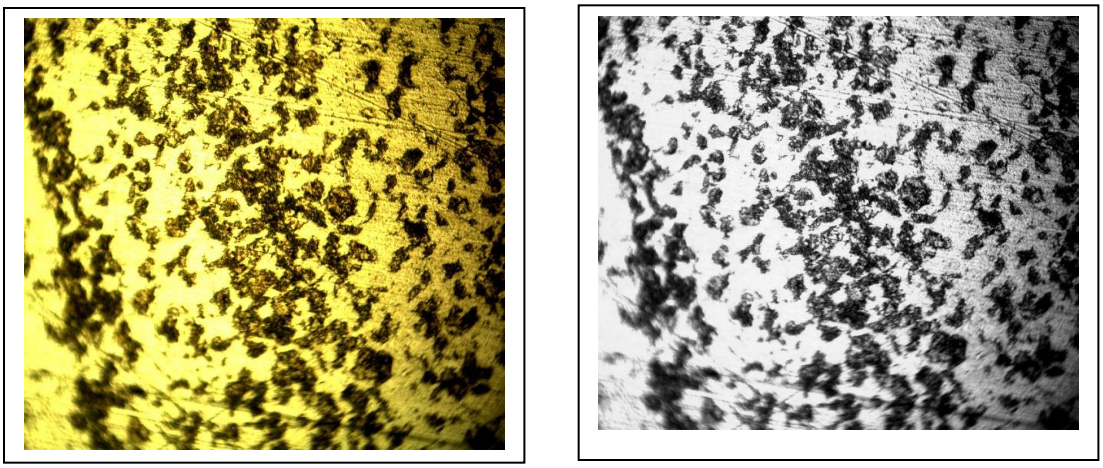
تؤثر المعالجات الحرارية على الخواص الفيزيائية للفولاذ منخفض الكربون وهذ من خلال التغيرات التي تحدث في بنيته المجهرية اثناء عملية المراجعة .ان تغير زمن المراجعة عند درجة حرارة ثابتة يؤدي الى إعادة توزيع وتنظيم الاطوار داخل الفولاذ , كما تساهم المعالجة الحرارية في تقليل الاجهادات الداخلية , وكل هذ ينعكس على الخواص الفيزيائية المتعلقة بتجانس البنية واستقرارها أي يساعد على زيادة استقرار المادة وتخسين سلوكها اثناء الاستعمال .كما لاحظنا من خلال المعاينة المجهرية تطور تدريجي مع زيادة زمن المراجعة حيث أصبحت البنية اكثر تجانسا واستقرارا مع نمو الحبيبات وتوزيع أوضح لأطوار الفريت والبرليت .

6-IV اختبار المجهر الضوئي:

تم اجراء المعاينة بالمجهر الضوئي (OM) بعد عمليات الصقل وذلك من اجل دراسة البنية المجهرية ومتابعة التغيرات الناتجة عن المعالجة الحرارية بالمراجعة عند درجة حرارة 400°c



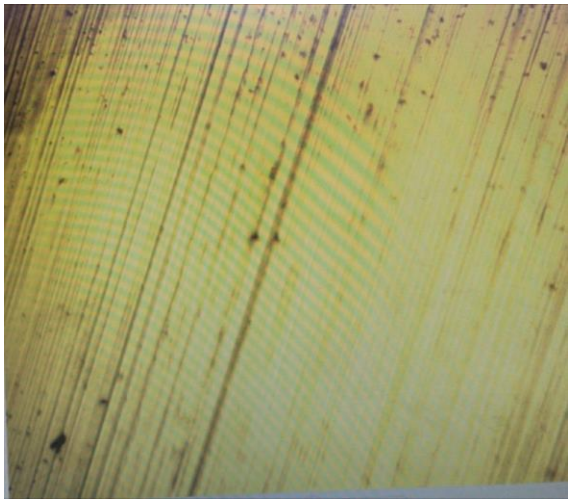
الشكل (IV-2): صورة معاينة مجهرية لعينة بدون مراجعة قبل الغمس في محلول نيتال ّ2 بالمئة



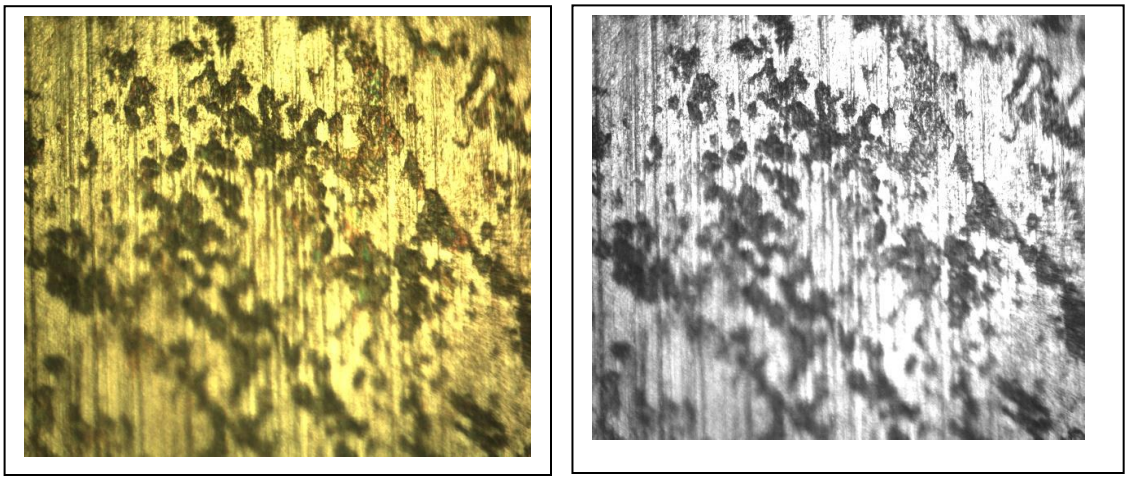
الشكل (IV-3): صورة مجهرية بتكبير X 50لعينة بدون مراجعة بعد الغمس في محلول النيتال

الصورة التي على اليسار هي الصورة التي يظهرها المجهر و على اليمين هي صورة معدلة بواسطة برنامج imagej من خلال الشكل نلاحظ ظهور بقع داكنة و اخرى فاتحة اللون حيث البقع الداكنة تمثل طور البرليت وهو خليط من الفريت والسمنتيت , بينما اللون الفاتح يمثل طور الفريت ويشكل البنية الأكبر .هذ التوزيع يتوافق مع البنية المنخفضة للكربون , ويفسر التوازن بين لليونة والصلابة في هذ النوع من الفولاذ لأن البرليت يساهم في زيادة الصلادة والفريت يعكس الليونة العالية للمادة.

يسمح لنا برنامج imagej بتحديد نسبة البرليت و الفريت المتواجدة في الصلب الكربوني و التي تقدر على الترتيب ب 65 و 35 %، على الترتيب



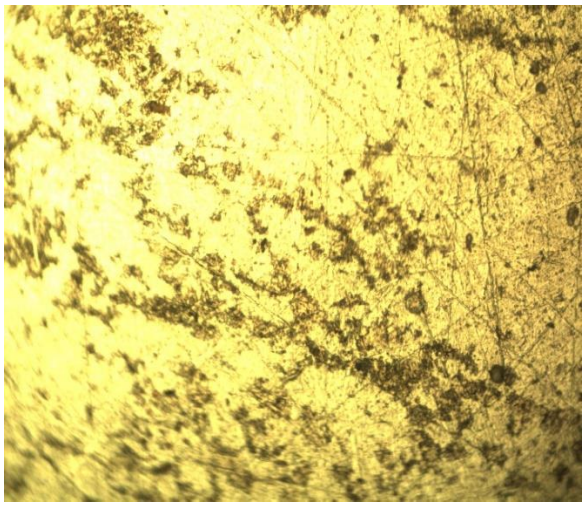
الشكل (IV-4): صورة مجهرية بعد معالجة min30 قبل الغمس في محلول النيتال



الشكل (IV-5): صورة مجهرية لعينة مراجعة

min30 بعد الغمس في محلول النيتال

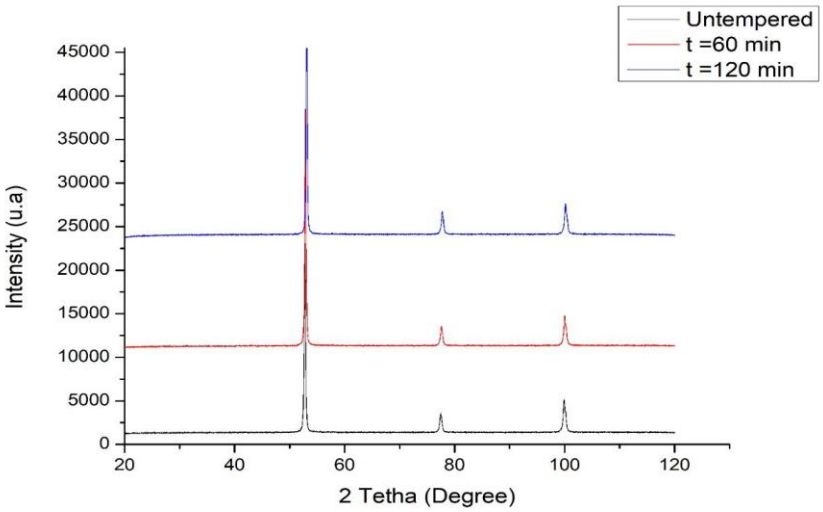
نلاحظ طور الفريت يتمثل فالمناطق الفاتحة في حين تمثل المناطق الداكنة البرليت بحيث يلاحظ توزع البرليت داخل المصفوفة الفريتية مع بداية تأثير المراجعة على البنية المجهرية , كما نرى ان الهجوم الكيميائي بمحلول النيتال سمح بتوضيح الحدود والبنية العامة المجهرية . كما تشير هذه الملاحظة الى ان المراجعة لمدة 30 دقيقة لم تؤد الى تغير كبير مقارنة بالحالة الابتدائية قبل المراجعة وانما ساهمت أساسا في تخفيف الاجهادات الداخلية واستقرار البنية. اضافة الى ذلك تظهر بعض اثارالصقل على سطح العينة



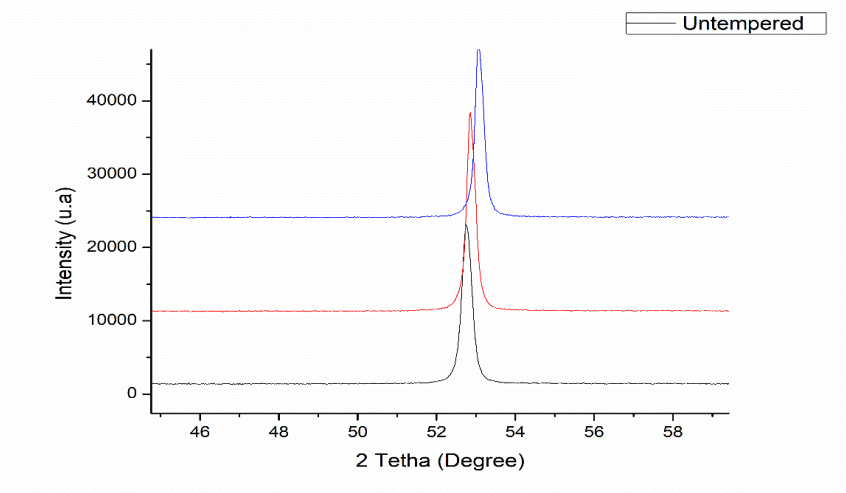
الشكل (IV-6): صورة معاينة مجهرية لعينة بعد ساعتين من المراجعة

تظهر الصورة المجهرية بنية تتكون من مناطق فاتحة تمثل طور الفريت (ferrite) ومناطق داكنة تمثل مستعمرات البرليت (pearlite) , كما نلاحظ زيادة زمن المراجعة مع استمرار تأثير المراجعة ساهم في تحسين استقرار البنية وتخفيف الاجهادات وإعادة ترتيب العيوب مقارنة بالمراجعة ب الازمنة الأقل وهو ما يفسر انخفاض الصلادة المسجل تجريبيا تظهر الصورة اثار الصقل وبعض الخدوش نسبيا مع ذلك يلاحظ تجانس اكبر للبنية

7-IV تحليل أطياف الاشعة السينية:



الشكل (7-IV): أطياف حيود الأشعة السينية للفولاذ منخفض الكربون قبل المراجعة وبعدها عند ازمنة مختلفة(60,120)دقيقة



الشكل (8-IV): تكبير لأطياف حيود الأشعة السينية للفولاذ منخفض الكربون قبل المراجعة وبعدها عند ازمنة مختلفة (60,120)دقيقة للمستوي (211)

يبين الشكل أطياف حيود الاشعة السينية للفولاذ منخفض الكربون قبل المراجعة وبعدها عند زمنين مختلفين(60و120)دقيقة .

تظهر الاطياف قمم حيود رئيسية عند 52°و78°و100° عند زوايا 2θوهي قمم مميزة للبنية البلورية للفولاذ المتكون أساسا من طور الفريت .

من خلال الشكل (IV.8)المقارنة نلاحظ ان مواقع القمم بقيت تقريبا ثابتة يدل على عدم تغير بنية الفولاذ قبل وبعد المراجعة بينما نلاحظ انزياح وتغير في شدة القمم مع زيادة زمن المراجعة بحيث أصبحت بعض القمم اكثر وضوحا وارتفاعا خاصة عند زمن 120دقيقة وذلك يرجع الى انخفاض الاجهادات الداخلية المتبقية الناتجة عن المعالجة الحرارية .

كما ان ازدياد حدة القمم و انخفاض عرضها النسبي يعكس تحسن درجة التبلور وازدياد حجم الحبيبات البلورية , يعني تؤكد نتائجXRD ان المعالجة الحرارية بالمراجعة أدت الى تقليل الاجهادات الداخلية وتحسين استقرار البنية البلورية .

IV-8 تحليل بعد الحبيبات:

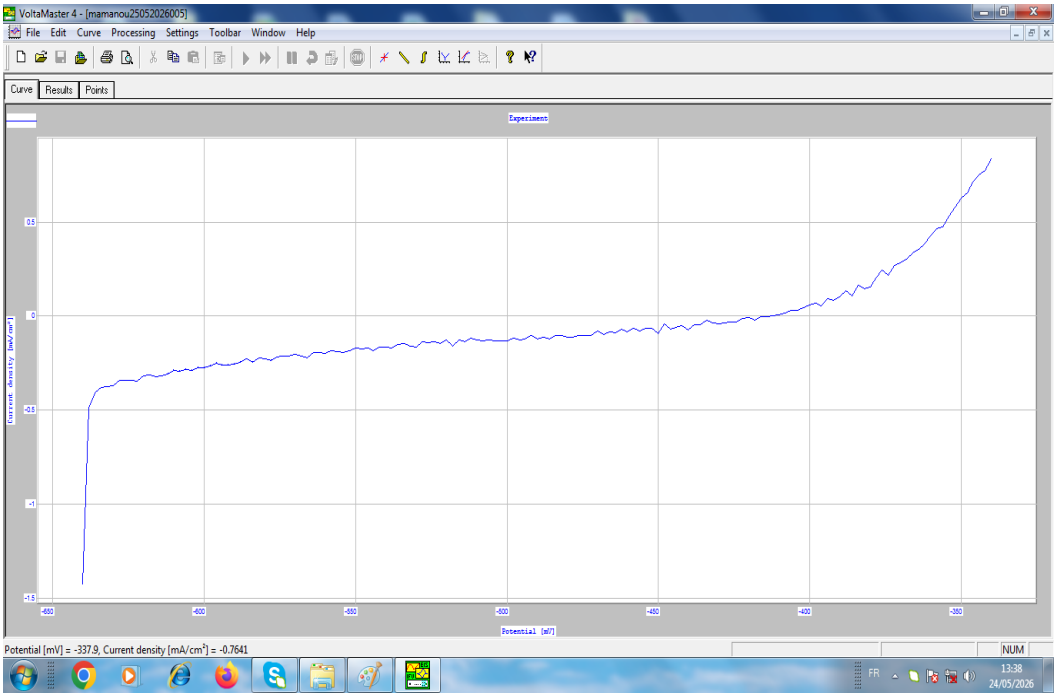
تم الاعتماد على الصور المجهرية لتقييم تطور أبعاد الحبيبات بعد المعالجة الحرارية بالمراجعة عند درجة حرارة 400c° في ازمنة مختلفة . من خلال الصور المجهرية لاحظنا تغيرا تدريجيا في البنية المجهرية مع زيادة زمن المراجعة بحيث لوحظ نمو الحبيبات نتيجة عمليات الانتشار الذري داخل المادة .كما أظهرت الصور المجهرية تخفيف الاجهادات الداخلية وتحسين استقرار البنية المجهرية ودلك نتيجة نمو الحبيبات أدى الى تقليل مساحة حدود الحبيبات . كما يمكن ربط هذه الظاهرة بالانخفاض التدريجي في قيم الصلادة المسجلة مع زيادة زمن المراجعة

IV-9 تحديد الاجهادات :

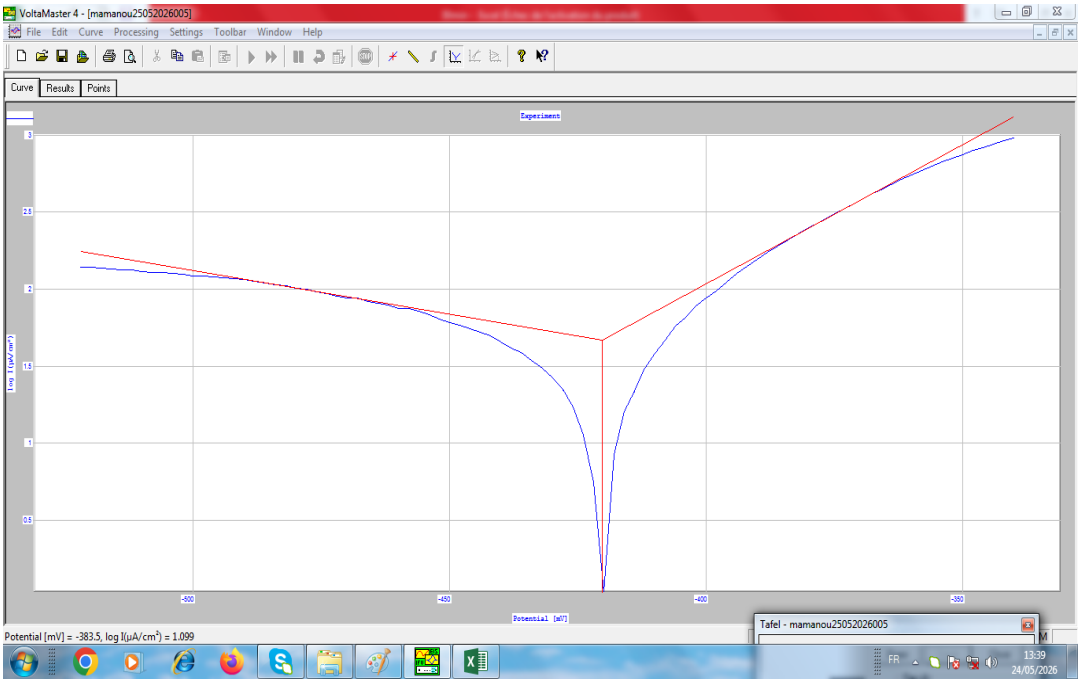
تعد الاجهادات المتبقية من العوامل المؤثرة في سلوك المعادن , بحيث تهدف عملية المراجعة الى تخفيف هذه الاجهادات وتحسين استقرار البنية الداخلية للمادة .ومن خلال النتائج المتحصل عليها ظهر ان الزيادة في زمن المراجعة عند درجة حرارة ثابتة 400 C°ساهمت في تقليل الاجهادات المتبقية داخل الفولاذ منخفض الكربون وذلك نتيجة استرخاء تدريجي للتشوهات الداخلية , كما تؤكد الصور المجهرية حدوث تغيرات بنيوية تشير الى تحسن تجانس البنية واستقرارها , كما ينعكس هذ التأثير على انخفاض قيم الصلادة المسجلة مع زيادة زمن المراجعة مما يدل على تحرر المادة من جزء من الاجهادات المتبقية المخزنة فيها

IV-9 استقراء تافل :

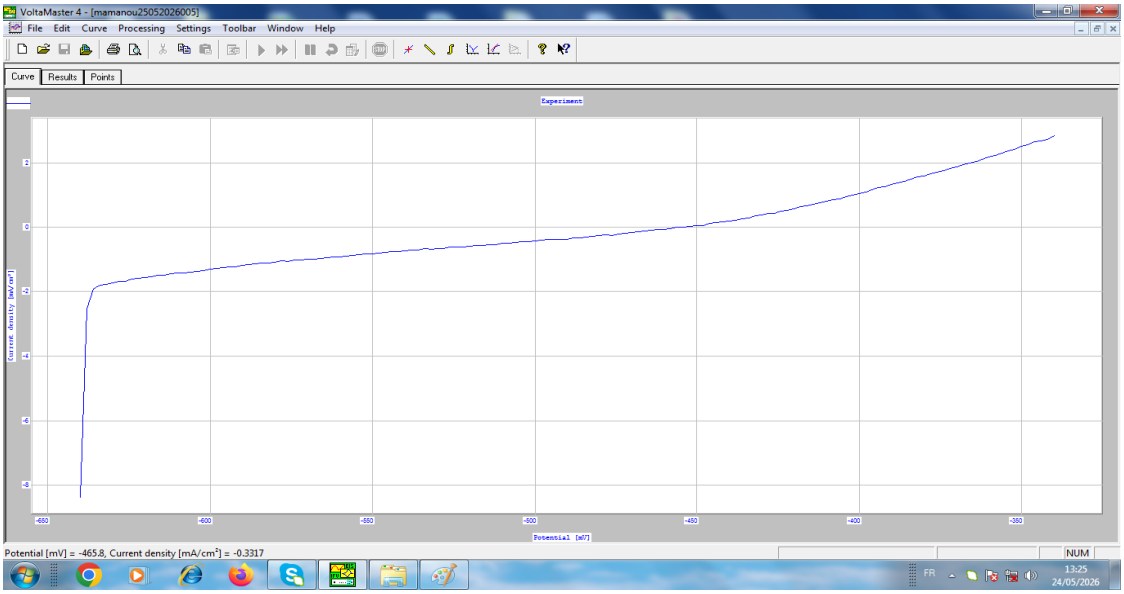
تم دراسة السلوك الكهروكيميائي لعينات فولاذ منخفض الكربون بعد عملية المراجعة في ازمنة مختلفة ودرجة حرارة ثابتة باستعمال تقنية التأكل الكهروكيميائي , حيث تم الحصول على منحنيات تافل للعينات بعد المعالجة الحرارية بالمراجعة . بحيث تسمح طريقة تافل بتحديد معاملات التأكل الكهروكيميائي , والمتمثلة في جهد التأكل وتيار التأكل , ويعتبران من المؤشرات الأساسية لتقييم سرعة التأكل ومقاومة المادة للتأكل .



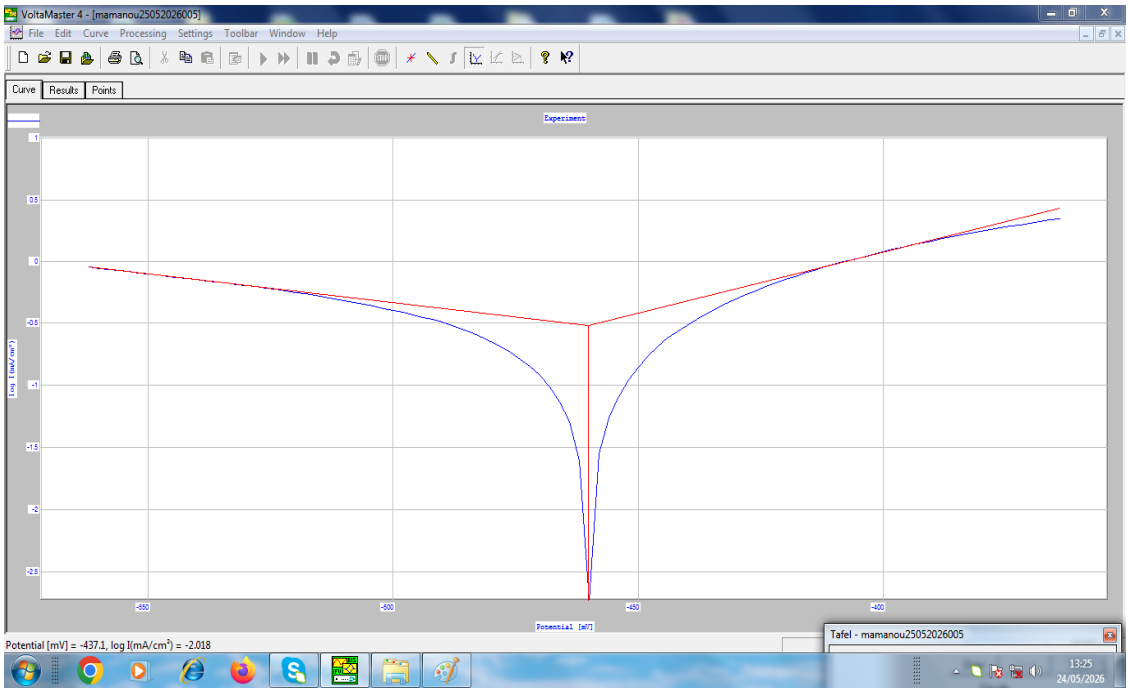
الشكل (IV-9): منحنى الاستقطاب الكهروكيميائي لعينة تمت مراجعتها لمدة30 دقيقة



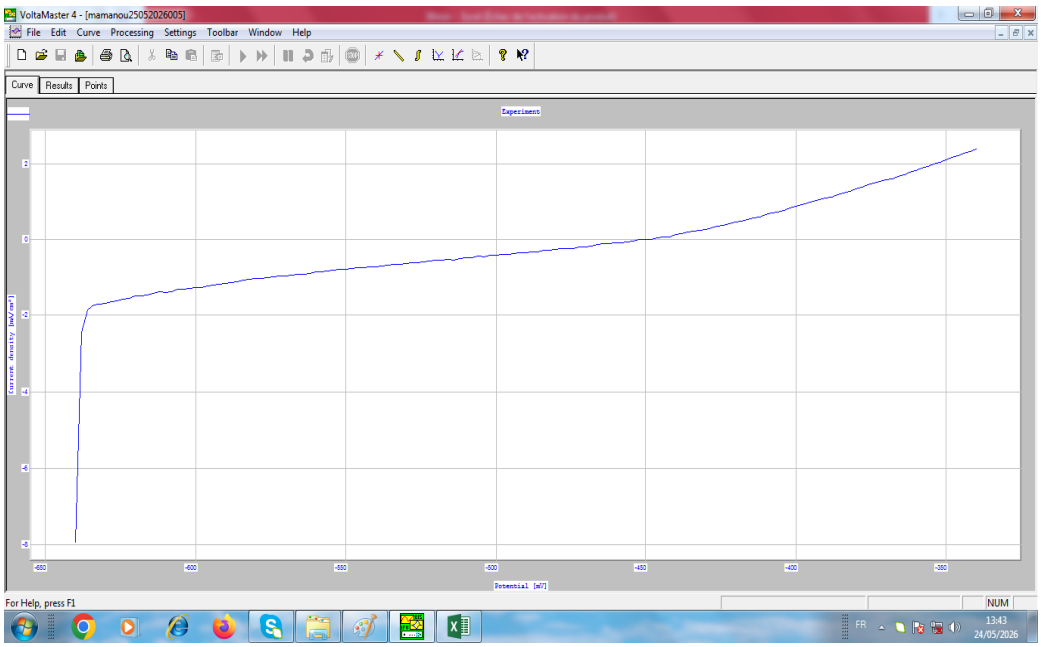
الشكل (IV-10): منحنى تافل لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعته لمدة دقيقة30



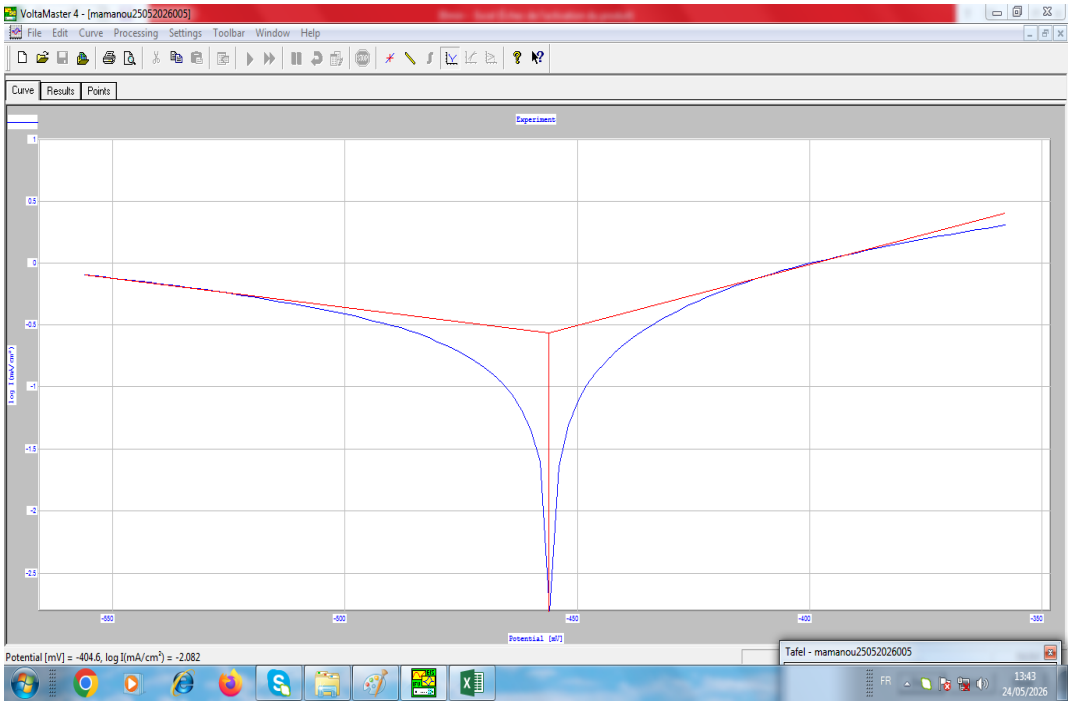
الشكل (IV-11): : منحنى الاستقطاب لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعتها لمدة ساعة



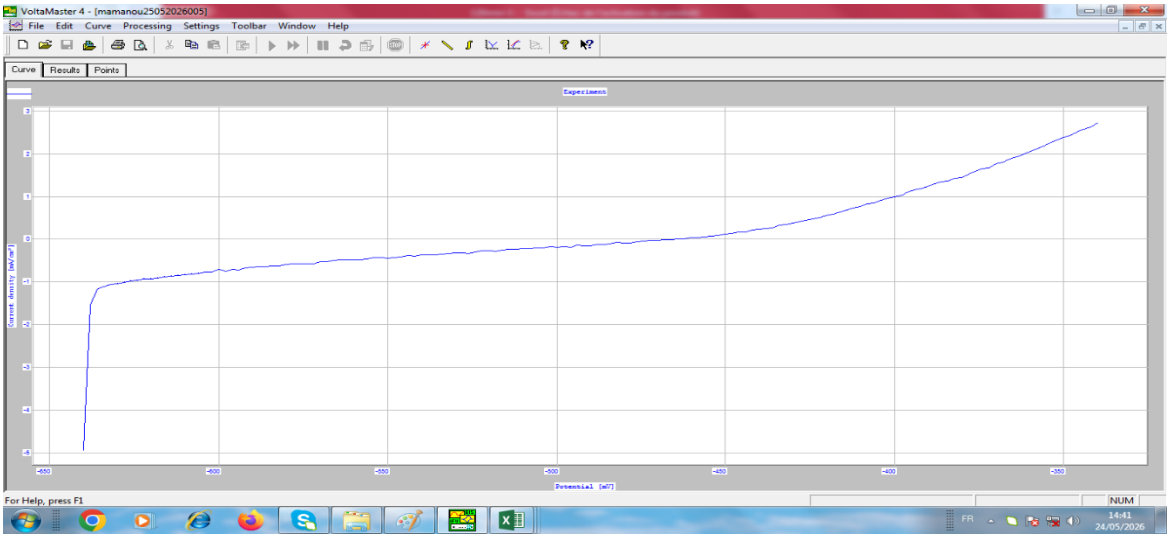
الشكل (IV-12): منحنى تافل لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعته لمدة 60دقيقة



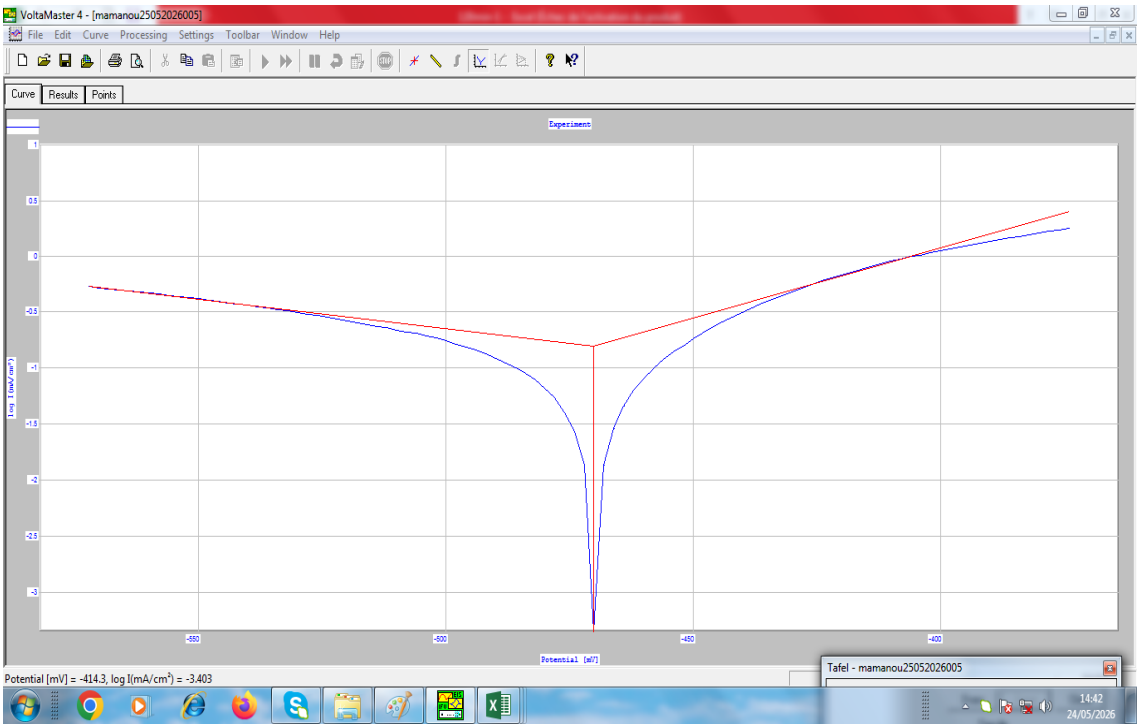
الشكل (IV-13): منحنى استقطاب لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعته لمدة 90دقيقة



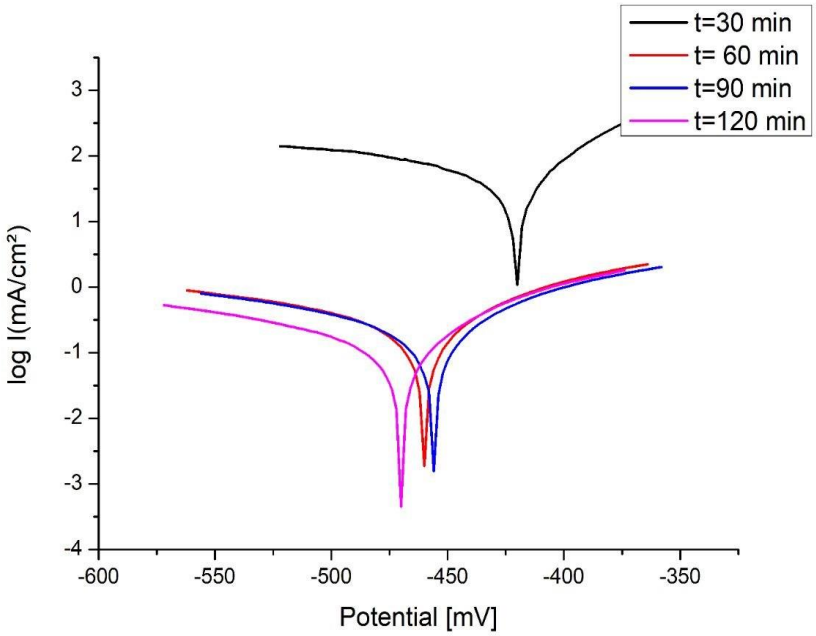
الشكل (IV-14): منحنى لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعتها لمدة 120دقيقة



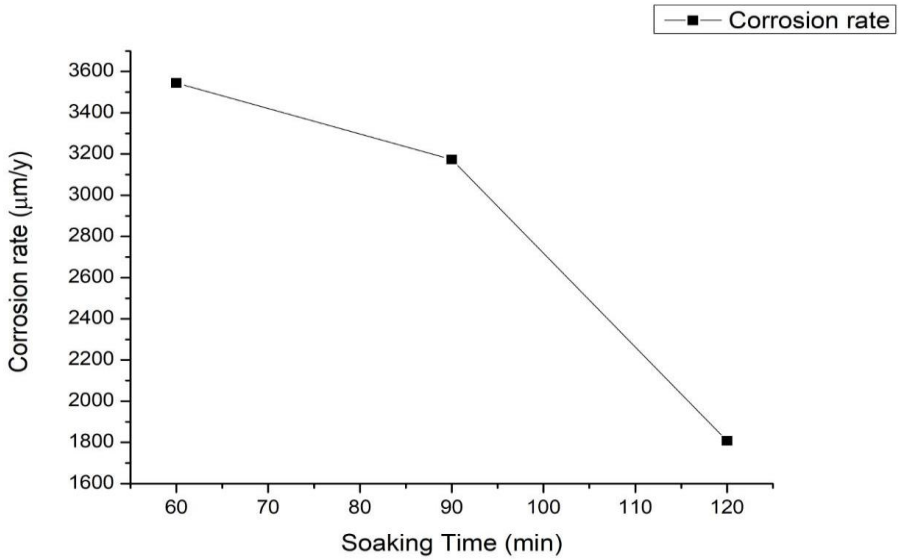
الشكل (IV-15): منحنى استقطاب لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعتها لمدة 120دقيقة



الشكل (IV-16): منحنى تافل لعينة فولاذ منخفض الكربون تمت مراجعته لمدة120دقيقة



الشكل (17-IV): منحنيات تافل لكل العينات المراجعة لمدة بين 30 و 120



الشكل (18-IV): منحنى سرعة التآكل بدلالة زمن المراجعة لفولاذ منخفض الكربون

الجدول (4-IV): نتائج التجارب الكهروكيميائية لتأكل العينات في وسط حمضي

	60 min	90 min	120 min
E(i0) mV	-460.1	-456.1	-470.1
i corrosion (µA/cm²)	0.3050	0.2730	0.1556
Rp (ohm.cm²)	78.79	89.60	140.57
Beta a (mV)	101.2	101.1	79.0
Beta c(mV)	-218.3	-213.3	-188.7
Coefficient	1.0000	0.9993	0.9994
Corrosion µm/y	3545	3173	1808

أظهرت نتائج اختبارات التأكل الكهروكيميائي في وسط حمضي HClالموضحة فالاشكال أعلاه ان زمن المراجعة الحرارية عند C400° يؤثر بشكل ملحوظ على مقاومة التأكل للفولاذ منخفض الكربون .فقد لاحظنا انخفاض تدريجي في معدل التأكل من mm/3,55 سنة عند زمن مراجعة 30دقيقة الى /mm1.80سنة عند زمن مراجعة 120دقيقة , أي بانخفاض نسبته49,3% .

يتوافق هذ الانخفاض مع النتائج المتحصل عليها من منحنيات الاستقطاب ومنحنيات تافل , حيث انخفض تيار التأكل Icorr المستنتج منحنيات تافل وانزاح جهد التأكل Ecorr نحو قيم اقل من -mV420 الى -mV470 مع زيادة زمن المراجعة.يعود هذ التحسن في مقاومة التأكل الى التغيرات البنيوية التي تحدث خلال

عملية المراجعة عند400C°بحيث تعمل المراجعة في ازمنة مختلفة على استرخاء الاجهادات الداخلية المتبقية وتقليل كثافة العيوب البلورية , والتي تعتبر مواقع استراتيجية لبداية التأكل في الوسط الحمضي , بحيث لا تتكون طبقة واقية في الوسط الحامضي على سطح العينة بسبب ذوبان نواتج التأكل Fe^{2+}مباشرة

في المحلول .كما يؤدي زيادة زمن المراجعة الى توزيع اكثر تجانسا للكربيدات $Fe_3\ C$ داخل مصفوفة الفريت .يؤدي التوزيع المتجانس الى تقليل تكوين خلايا التأكل دقيقة بين الفريت الغني بالحديد والكربيدات الغنية بالكربون , مما يبطئ التفاعل الانودي

$$Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2e$$

كما ان انخفاض الميول تافل βa و βc من خلال الجدول مع زيادة زمن المراجعة يدل على ان طبقة نواتج التأكل المتكونة , رغم ذوابانها , تعيق انتقال ايونات H^+ الى السطح وتعيق خروج ايونات Fe^{2+} مما يقلل سرعة التفاعلين الانودي والكاثودي $2H^+ + 2e = H_2$ ويشير الانزياح السالب لEcorr مع انخفاض Icorr الى ان التقدم في زمن المراجعة يؤثر بشكل اكبر على التفاعل الكاثودي اختزال الهيدروجين.بناء عليه يمكن الاستنتاج ان زمن المراجعة الأمثل عند درجة حرارة c400° في الوسط الحمضي HCL هو 120دقيقة . وان زمن المعالجة الحرارية لايقل أهمية عن درجة حرارة المعالجة الحرارية وتأثيره واضح اذ ان اكتمال استرخاء الاجهادات وتجانس توزيع الكربيدات عند زمن 120دقيقة يقلل من المواقع النشطة للتأكل , وبالتالي يخفض معدل التأكل مقارنة بزمن30دقيقة . كما ان تركيز الوسط الحمضي HCl اخذنا1M.

خاتمة عامة

خاتمة عامة:

يهدف هذ العمل التجريبي إلى دراسة تأثير عامل زمن البقاء أثناء المعالجة الحرارية بالمراجعة على الخصائص البنيوية والميكانيكية وسلوك التآكل الكهروكيميائي لصلب منخفض الكربون. حيث سمحت الدراسة بالربط بين التحولات الميكرو-بنيوية الداخلية والخصائص المقاسة. وقد أظهرت نتائج تحليل XRF أن المادة الخام المستعملة هي فولاذ منخفض الكربون يتكون أساسا من طورين رئيسيين هما الفريت والبرليت، حيث طرأت على هذه البنية تغيرات تدريجية مع زيادة زمن المراجعة في الفرن عند درجة حرارة ثابتة 400°C. فمن الناحية الميكانيكية، لاحظنا وجود تناسب عكسي واضحة بين زمن المراجعة وقيم الصلادة، إذ انخفضت قيم الصلادة تدريجيا مع زيادة زمن البقاء داخل الفرن مقارنة بالعينة الخام.

ويمكن تفسير هذ السلوك بتأثير المعالجة الحرارية بحيث تؤدي الى تخفيف الاجهادات الداخلية أي زيادة زمن المراجعة يسمح بزيادة استرخاء الاجهادات المتبقية داخل المعدن الناتجة عن عمليات التحضير الميكانيكي والقص، بالتزامن مع حدوث نمو الحبيبات البلورية مع الزمن وهذ يؤدي الى تقليل مساحة حدود الحبيبات يعني حدود اقل تؤدي الى مقاومة وصلادة اقل وزيادة المرونة.وقد تأكدت هذه التفسيرات بالتحليل البنيوي عن طريق حيود الاشعة السينية DRx ، حيث تبين أن زوال الاجهادات المتبقية والتشوهات الداخلية يرتبط مباشرة بانزياح قمم الحيود بزاوية 20 .وهذ الانزياح دليل على وجود اجهادات داخلية للمعدن وحدوث استرخاء مرن في المستويات البلورية وفقا لقانون براغ، مما أدى الى استقرار الشبكة البلورية وتقليل كثافة العيوب والخلوع البلورية مع زيادة زمن المراجعة.

هذ الاستقرار ظهر أيضا من خلال المعاينة بالمجهر الضوئي بعد الحفر الكيميائي بمحلول النيتال، حيث أدى رفع زمن البقاء الى حدوث عمليات الانتشار الذري داخل المادة مما ساهم في إعادة تنظيم الاطوار وتوزيعها بشكل اكثر تجانسا وخاصة مستعمرات البرليت وجزيئات الكربيدات خصوصا السيمنتيت وتجانسها داخل مصفوفة الفريت. ولم يقتصر دور هذا التوزيع المتجانس على الخصائص البنيوية والميكانيكية بل كان له دور كبير في تخفيف التأكل وتحسين السلوك الكهروكيميائي، حيث أظهرت نتائج الاستقطاب واستقراء تافل في الوسط الحمضي HCL انخفاض تدريجي ملحوظ في معدل التأكل وفي تيار التأكل المستنتج كلما زاد زمن المراجعة.

ويعود هذ التحسن في مقاومة التآكل الى أن التغيرات البنيوية وتوزيع الكربيدات والسيمنتيت بشكل متجانس في مصفوفة الفريت أدى الى تقليل تكوين خلايا التأكل دقيقة بين الفريت الغني بالحديد والكربيدات الغنية بالكربون، مما يبطئ التفاعل الانودي لذوبان الحديد.

اذ وجدنا انزياح جهد التأكل Ecorr نحو قيم اقل مع انخفاض تيار التأكل مما يدل على ان التقدم في زمن المراجعة يؤثر بشكل اكبر على كبح التفاعل اختزال الهيدروجين.بناء عليه استنتجنا ان زمن المراجعة يعد عاملا مهما في التحكم في خصائص الفولاذ منخفض الكربون، حيث يؤثر بتأثير لا يقل أهمية عن تأثير درجة الحرارة على الصلادة والبنية المجهرية ومقاومة التأكل، وان اكتمال استرخاء الاجهادات وتجانس توزيع الكربيدات والسيمنتيت عند الازمنة المتقدمة يقلل من المواقع النشطة للتأكل ويمنح المادة خواص مناسبة تتوافق مع طبيعة التطبيق الصناعي المطلوب.

نظراً للأهمية الصناعية والتطبيقية الكبيرة للفولاذ منخفض الكربون والمعالجات الحرارية، نقترح مجموعة من التوصيات والآفاق المستقبلية التي يمكن الاعتماد عليها لتوسيع نطاق هذه الدراسة وتعميقها وتتمثل في

دراسة تأثير درجات حرارة مختلفة للمراجعة: نقترح في الدراسات القادمة تغيير درجة حرارة المراجعة (عدم الاكتفاء بدرجة 400°C ومزجها مع تغيير أزمنة بقاء مختلفة، وذلك بهدف رسم مخطط كامل يوضح التداخل بين عاملي الزمن والحرارة وتأثيرهما المشترك على الخصائص الميكانيكية والتآكل.

تطبيق المعالجة على أنواع أخرى من الفولاذ: نقترح تطبيق نفس شروط هذه المعالجة الحرارية (المراجعة بأزمنة مختلفة) على عينات من الفولاذ متوسط أو عالي الكربون، أو الفولاذ السبائكي، للمقارنة بين مدى استجابة كل نوع وتأثير ذلك على تطور أطواره البلورية

في الختام نضع بين يدي الباحثين مجموعة من الآفاق والتطلعات المستقبلية المباشرة لهذا الموضوع:

- تطوير كفاءة وأمان الهياكل المعدنية: نأمل أن تساهم نتائج دراسة تأثير زمن المراجعة على الصلادة والإجهادات الداخلية في تحسين المعالجات الحرارية للصلب منخفض الكربون، مما يضمن سلامة المنشآت الحيوية التي تعتمد على هذه المادة بشكل أساسي.

– الاستدامة والحد من التآكل: إن تعميق فهمنا لآليات التآكل الكهروكيميائي لهذا الفولاذ يفتح آفاقاً عملية للحد من الهدر الاقتصادي وتآكل المعدات الصناعية، مما يصب في مصلحة استدامة الموارد وحماية البيئة.

– التكامل بين البنية المجهرية والخواص الميكانيكية: نتطلع إلى أن يفتح هذا العمل الباب لدراسات مكملة تبحث في العلاقة الدقيقة بين تطور الأطوار المجهرية (كالفريت والبرليت) والخواص الميكانيكية الأخرى كالمطيلية ومقاومة الصدم.

الملخص:

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير زمن المعالجة الحرارية بالمراجعة على الخواص البنيوية والميكانيكية والكهروكيميائية لفولاذ منخفض الكربون عند درجة حرارة ثابتة قدرها 400 °Cولمدد زمنية مختلفة (30، 60، 90 و120 دقيقة). استُخدمت تقنيات المجهر الضوئي(OM) ، حيود الأشعة السينية(XRD) ، قياس الصلادة (HV) والاختبارات الكهروكيميائية لدراسة تطور البنية المجهرية ومقاومة التآكل. أظهرت النتائج أن زيادة زمن المراجعة أدت إلى تخفيف الإجهادات الداخلية وإحداث تغيرات واضحة في البنية المجهرية والخواص الميكانيكية، كما ساهمت في تحسين مقاومة التآكل مقارنة بالعينة غير المعالجة. وتؤكد هذه النتائج أن التحكم في زمن المراجعة يعد عاملاً أساسياً لتحقيق توازن مناسب بين الصلادة والمتانة ومقاومة التآكل، مما يعزز كفاءة الفولاذ منخفض الكربون في التطبيقات الصناعية المختلفة.

الكلمات المفتاحية: الفولاذ منخفض الكربون، المراجعة الحرارية، الصلادة، البنية المجهرية، حيود الأشعة السينية (XRD)، مقاومة التآكل.

Abstract:

This study aimed to evaluate the effect of tempering heat treatment time on the structural, mechanical, and electrochemical properties of low-carbon steel at a constant temperature of 400°C for different holding times (30, 60, 90, and 120 minutes). Optical Microscopy (OM), X-ray Diffraction (XRD), Vickers Hardness (HV) measurements, and electrochemical tests were employed to investigate the evolution of the microstructure and corrosion resistance. The results showed that increasing the tempering time reduced residual stresses and induced significant changes in the microstructure and mechanical properties. Furthermore, corrosion resistance was improved compared with the untreated sample. These findings confirm that controlling the tempering time is a key factor in achieving a suitable balance between hardness, toughness, and corrosion resistance, thereby enhancing the performance of low-carbon steel in various industrial applications.

Keywords: Low-carbon steel, tempering heat treatment, hardness, microstructure, X-ray diffraction (XRD), corrosion resistance.