

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة منتوري قسنطينة

كلية العلوم الدقيقة

قسم الفيزياء

رقم الترتيب:.....

السلسلة:.....

رسالة

مقدمة لنيل شهادة الماجستير في الفيزياء

إختصاص : علوم المواد

فرع : التعدين

الموضوع

دراسة الخواص البنيوية والميكانيكية و حركية إعادة البلورة
الأولية لأسلاك فولاذية موجهة للغلنة

من طرف :

يخلف فارس

أمام لجنة المناقشة :

جامعة منتوري قسنطينة

أستاذة

الرئيس : رواق نجاة

جامعة منتوري قسنطينة

أستاذة

المقرر: لعروق زعدة

جامعة منتوري قسنطينة

أستاذ

المتحان : شكرود سعيد

جامعة منتوري قسنطينة

أستاذ

خير الدين محمد الهاشمي

شكر

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.

أجري هذا البحث في مختبر البنية المجهرية والعيوب في المواد بجامعة منتوري قسنطينة تحت إشراف الأستاذة زغدة لعروق أستاذة التعليم العالي التي أوجه لها أسمى معاني التقدير والاحترام على إشرافها على هذا العمل وتوجيهاتها ونصائحها القيمة.

الشكر الجزيل للأستاذة نجاه رواق أستاذة التعليم العالي بقسم الفيزياء جامعة منتوري قسنطينة, لقبولها رئاسة لجنة المناقشة. كما اشكر الأستاذ خير الدين محمد الهاشمي و الأستاذ شكرود سعيد, أستاذ التعليم العالي بقسم الفيزياء جامعة منتوري قسنطينة, لقبولهما مناقشة هذه الرسالة كمتحنيين.

أتوجه بالشكر إلى مدير مصنع TRIFISOU - العلة - سطيف على التسهيلات المقدمة لي أثناء فترة تربصي بالمصنع. كذلك أوجه شكري للسيد عبيد الطاهر لتزويده لنا بالعينات و مساعداته طوال فترة البحث. اشكر كثيرا السيد محمد رضوان بنفس المصنع على معلوماته ومساعداته وكذا الأخت مليكة وكل عمال المصنع.

أتوجه بالشكر الجزيل إلى كل أستاذة و طالبة مخبر البنية المجهرية و عيوب المواد (LMDM) و اخص بالذكر الأستاذ عمر خلف الله و الأستاذة نصيرة كغوش, أستاذة التعليم العالي بقسم الفيزياء جامعة منتوري قسنطينة, لمساعدتهما و تهيئتهما ظروف العمل الجيدة و السهر على صيانة و توفير الأجهزة. أخيرا أوجه التحية إلى زملائي من قسم الفيزياء سفيان ورضا وكذا زميلتي حنان و مريم على مساعداتهم و نصائحهم.

الصفحة

01 المقدمة العامة

الفصل الأول

I- الدراسة النظرية

1-I الخصائص البنيوية والميكانيكية للفولاذ

02 1- بيان الاتزان شبه المستقر Fe-Fe₃C

02 1-1 حديد الزهر

03 2-1 الفولاذ

03 2- جزء بيان الاتزان Fe-Fe₃C

04 1-2 الحديد النقي (Fe)

04 2-2 الكربون (C)

04 3-2 السمنتيت (Fe₃C)

04 4-2 المنحنيات A

05 5-2 البنى البلورية لجزء بيان الاتزان

05 الفريت (α)

06 الأستنتيت (γ)

06 البرليت (P)

06 3- تصنيف الفولاذ

07 4- الخصائص البنيوية للبرليت

07 1-4 تنوي ونمو البرليت

07 2-4 البنية المجهرية والبعد الشرائطي

07 3-4 تأثير العناصر السببكية على تكون البرليت

08 4-4 تأخير تنوي البرليت

08 5-4 تكوين بنية برليتية أخرى

- 5- الخصائص الميكانيكية للفولاذ 08
- 1-5 الصلادة 08
- 2-5 المرونة 08
- 3-5 اللدونة 08
- 4-5 الإنكسار 08
- 1-4-5 الإنكسار الهش 09
- 2-4-5 الإنكسار اللين 09
- 3-4-5 الإنكسار عن طريق انتشار الشقوق 09
- 5-5 إجهاد حد التجدد (endurance) 10

2-I التّقسية

- 1- آليات التّقسية 11
- 1-1 التّقسية بالذرات والشوائب 11
- 2-1 التّقسية بالترسبات 11
- 3-1 التّقسية الانخلاعات 13
- 4-1 التّقسية بالحجم الحبيبي 13
- 2- نماذج تفسير علاقة patch-Hall 14
- 1-2 نموذج التعب بالانخلاعات 14
- 2-2 نموذج التّقسية بالتشويه 14
- 3-2 نموذج اعتبار الحدود الحبيبية كمنابع للانخلاعات 14
- 3- تجربة الشّد 15
- 1-3 منحنى الشّد الإصطلاحي 15
1. التّشوه المرن 15
2. التّشوه اللدن 15
- 1- المقاومة الميكانيكية 15

- 16.....إجهاد حد الإنكسار 2- إجهاد حد الإنكسار
- 16.....التشوه (ε) 3- التشوه (ε)
- 17.....المطيلية (Z) 4- المطيلية (Z)
- 18.....منحني الشدّ الحقيقي 2-3 منحني الشدّ الحقيقي
- 19.....معامل التقسية 3-3 معامل التقسية

3-I المعالجات السطحية للفولاذ

- 21.....السمنتة 1- السمنتة
- 21.....التردد 2- التردد
- 21.....الغلفنة 3- الغلفنة
- 22.....1-3 طرق وضع طبقة الغلفنة 1-3 طرق وضع طبقة الغلفنة
- 22.....1-1-3 الطريقة الإلكتروليتية 1-1-3 الطريقة الإلكتروليتية
- 22.....2-1-3 الطريقة الكيميائية 2-1-3 الطريقة الكيميائية
- 22.....2-3 أنواع الحماية بوضع طبقة من الزنك 2-3 أنواع الحماية بوضع طبقة من الزنك
- 22.....1-2-3 الحماية الحاجزية 1-2-3 الحماية الحاجزية
- 23.....2-2-3 الحماية الإلكتروكيميائية 2-2-3 الحماية الإلكتروكيميائية
- 24.....3-3 الغلفنة الساخنة 3-3 الغلفنة الساخنة
- 24.....1-3-3 المراحل الرئيسية لآلية الغلفنة 1-3-3 المراحل الرئيسية لآلية الغلفنة
- 24.....1-1-3-3 تحضير السطوح 1-1-3-3 تحضير السطوح
- 24.....2-1-3-3 الغمس في حوض الغلفنة 2-1-3-3 الغمس في حوض الغلفنة
- 25.....3-1-3-3 الخروج من الحوض 3-1-3-3 الخروج من الحوض
- 25.....4-1-3-3 التبريد 4-1-3-3 التبريد
- 25.....2-3-3 طبقة الغلفنة 2-3-3 طبقة الغلفنة
- 25.....1-2-3-3 جزء بيان الإتران Fe-Zn 1-2-3-3 جزء بيان الإتران Fe-Zn
- 26.....2-2-3-3 البنية المجهرية لطبقة الغلفنة 2-2-3-3 البنية المجهرية لطبقة الغلفنة
- 27.....3-2-3-3 خصائص أطوار طبقة الغلفنة 3-2-3-3 خصائص أطوار طبقة الغلفنة

- 28..... 4-2-3-3 تشكيل الأطوار Fe-Zn
- 29..... 5-2-3-3 طبقة المنع
- 29..... 6-2-3-3 التفاعل (Outburst)
- 30..... 7-2-3-3 معامل الانتشار
- 30..... 3-3-3 تأثير مختلف العوامل على عملية الغلجنة
- 30..... 1-3-3-3 نوعية الفولاذ
- 31..... 1-1-3-3-3 تأثير السيليسيوم
- 31..... 2-1-3-3-3 تأثير الكربون
- 31..... 3-1-3-3-3 تأثير الفوسفور
- 32..... 2-3-3-3 نوعية الزنك (حوض الغلجنة)
- 32..... 1-2-3-3-3 تأثير الرصاص
- 32..... 2-2-3-3-3 تأثير النحاس
- 32..... 3-2-3-3-3 تأثير الألمنيوم
- 32..... 3-3-3-3 درجة حرارة حوض الغلجنة
- 33..... 4-3-3-3 زمن الغمس
- 33..... 5-3-3-3 التبريد

4-I الترميم وإعادة البلورة

- 34..... 1- الترميم
- 34..... 1-1 آليات الترميم
- 34..... 1- هجرة الإخلاعات واختفاؤها
- 35..... 2- ترتيب الإخلاعات في أشكال مستقرة
- 35..... - شكل متعدد الأضلاع (Polygone)
- 36..... - تكوين الحبيبات الفرعية
- 36..... 2-1 حركية الترميم
- 37..... 3-1 العوامل المؤثرة على الترميم

- 37 1- الإجهادات
- 37 2- درجة الحرارة
- 37 3- البنية المجهرية
- 37 4- وجود طور ثاني
- 37 2- إعادة البلورة
- 37 1-2 التئوي
- 37 - نماذج التئوي
- 38 1- التئوي الكلاسيكي
- 38 2- نموذج هجرة الحدود الحبيبية بالتحريض الاجهادي
- 38 3- نموذج التئوي الموجه
- 38 2-2 حركية إعادة البلورة
- 39 2-3 العوامل المؤثرة على إعادة البلورة
- 40 1- نسبة التشوه
- 40 2- اتجاهات الحبيبات
- 40 3- الحدود الحبيبية
- 40 4- الحجم الحبيبي الابتدائي
- 40 5- الشوائب
- 41 6- درجة الحرارة
- 41 7- شروط التلدين
- 42 2-4 النمو

الفصل الثاني

II- التقنيات

- 43 1- الفولاذ
- 43 2- المعالجات الحرارية للتلدين
- 44 3- التجارب الميكانيكية
- 45 4- تجارب الفحص المجهرية
- 47 5- صناعة الأسلاك
- 48 6- آلية الغلفنة في "TRIFISOD"

III- النتائج والمناقشة

1- الحالة الإبتدائية

- 1-1 قابلية التلحيم 51
- 2-1 قياس الصلادة 51
- 3-1 تجربة الشد 53
- 4-1 الفحص المجهرى 56
- 5-1 الخاتمة الجزئية 60

2- الحالة المشوّهة

- 1-2 قياس الصلادة 61
- 2-2 تجربة الشد 61
- 3-2 الفحص الماكروسكوبى 65
- 4-2 الفحص المجهرى 66
- 5-2 الخاتمة الجزئية 68

3- الحالة المغلفة

- 1-3 قياس الصلادة 69
- 2-3 تجربة الشد 69
- 3-3 الفحص الماكروسكوبى 74
- 4-3 الفحص المجهرى 74
- 5-3 طبقة الغلظة 76
- 6-3 الخاتمة الجزئية 82

4- إعادة البلورة الأولية

- 1-4 الدراسة المجهرية 83
- 2-4 حساب الصلادة 85
- 3-4 معاملا GMAK 88

- 4-4 تغيير النسبة الحجمية للطور الجديد بدلالة درجة حرارة عند زمن ثابت 89
- 5-4 حساب طاقة النشاط لإعادة البلورة الأولية 91
- 6-4 الخاتمة الجزئية 94

المقدمة العامة

تعتبر سبائك الحديد من أهم المعادن وأكثرها استعمالاً في الحياة اليومية. تتعدد استعمالاتها كالبناء ومد الجسور وصناعة السيارات وآلات الرفع. ازداد استخدام سبائك الحديد في القرن العشرين بشكل واسع. إلى أن تطور البحوث حول خواصها الميكانيكية والفيزيائية كان في الثلاثين سنة الأخيرة من القرن العشرين. تهدف هذه البحوث إلى الحصول على فواليد ذات خصائص فيزيائية و ميكانيكية جيدة و بأقل تكلفة ممكنة، فتتعدد استعمالاتها و بالتالي تصنيعها وكذلك حمايتها من التآكل الطبيعي. تتعدد طرق الحماية و تعتبر آلية الغلجنة على الساخن من أهم الطرق العملية التي يلجا إليها الصناعيين لحماية الفولاذ من الأكسدة لارتفاع المدة الزمنية لحياة الفولاذ عند مقارنتها بالطلاء مثلاً. تتمثل الغلجنة على الساخن في غمس أسلاك فولاذية (أو صفائح فولاذية) في حمام الزنك السائل. نتيجة لذلك تظهر طبقة الغلجنة على السطح فتعزل الفولاذ عن الوسط الخارجي و بالتالي تحميه من التآكل بواسطة الأكسدة. تتكون طبقة الغلجنة عادةً من أطوار مصدرها الانتشار المتبادل بين الحديد (Fe) و الزنك (Zn). تتطرق هذه الدراسة إلى الخصائص البنيوية و الميكانيكية لأسلاك مصنوعة من فواليد لينة تحتوي على 0.07% C . تستورد شركة القلد للشرق بالعلمة - سطيف- الجزائر الفولاذ على شكل سلك قطره 5.5mm ثم تقوم بصناعة أسلاك ذات أقطار 3mm و 2.7mm و 2.4mm. تقوم هذه الشركة بعد ذلك بتغطيتها بطبقة من الزنك (غلغنتها على الساخن). تعاني هذه الأسلاك عند استخدامها من الانكسارات وضعف التحام طبقة الغلجنة بالفولاذ. ينقسم هذا العمل إلى ثلاثة فصول رئيسية:

يهتم الفصل الأول بدراسة نظرية للفواليد اللينة و تحديد مختلف خواصها و مميزاتها البنيوية. كما يتطرق إلى تجربة الشد وتم التعرف إلى المقادير الفيزيائية التي يمكن استنتاجها. خصص جزء لوصف بيان الاتزان Fe-Zn وتم التعرف إلى المكونات الطورية لطبقة الانتشار التي تظهر بين الحديد و الزنك. وينتهي هذا الفصل بدراسة مراحل إعادة البلورة الأولية.

يتطرق الفصل الثاني إلى مختلف التقنيات المستعملة لانجاز هذه الدراسة.

تعرض الفصل الثالث إلى نتائج البنية المجهرية و الخواص الميكانيكية للأسلاك في الحالة الابتدائية و بعد التصنيع (الحالة المشوهة) و بعد غلغنتها. تم في هذا الفصل كذلك فحص طبقة الغلجنة و قياس سمكها. وجد أن سمكها غير منتظم في السلك الواحد وخلص هذا العمل إلى انه لم يتم إحترام شروط الغلجنة بالمصنع. أخيراً تم دراسة حركية إعادة البلورة الأولية للأسلاك (في الحالة المشوهة) و تأثير نسب التشوه و معاملات المعالجات الحرارية (درجة الحرارة و الزمن) على الطاقة اللازمة لإعادة البلورة الأولية. كما يضم هذا الفصل الأخير مناقشة لهذه النتائج مدعومة بمقارنات مع بعض الأبحاث أجريت على هذا النوع من الفواليد.

I- الدراسة النظرية

تلعب المواد بصفة عامة والمعادن خاصة دوراً رئيسياً في التطور الصناعي والتكنولوجي. حُصص جزء كبير من الأبحاث في الدول الصناعية الكبرى للجانب المرتبط بسبائك الحديد. يرجع سبب هذا الاهتمام المتزايد بسبائك الحديد إلى الخصائص البنيوية الميكانيكية الجيدة التي تتمتع بها. تهتم هذه الدراسة بسبائك الحديد بصورة خاصة سبائك Fe-C (أي الفولاذ). تُصنف الفولاذ إلى لينة وقاسية. ستتطرق هذه الدراسة إلى جزء من بيان الاتزان Fe-Fe₃. تتطرق الدراسة النظرية في هذا الشطر الأول إلى مختلف البنى البلورية للحديد النقي ثم إلى الفولاذ و مختلف أنواعه و خصائصه البنيوية والميكانيكية. تستعرض بعد ذلك الدراسة آليات التقسية و تجربة الشد ثم إلى المعالجات الحرارية للتلدين التي تتعرض لها الأسلاك بهدف عودتها إلى الاتزان الترموديناميكي. أخيراً نهتم باليات التغطية وخاصة الغلظة و ماهي المكونات الطورية التي تظهر نتيجة الغلظة على الساخن وكيف يتم التفاعل بين الزنك والحديد.

I-1 الخصائص البنيوية والميكانيكية للفولاذ :

يوجد هناك نوعين من بيانات الاتزان :

1- بيان الاتزان المستقر Fe-C.

2- بيان الاتزان شبه المستقر Fe-Fe₃C.

يتم التركيز في دراستنا على بيان الاتزان شبه المستقر Fe-Fe₃C.

1- بيان الاتزان شبه المستقر Fe-Fe₃C :

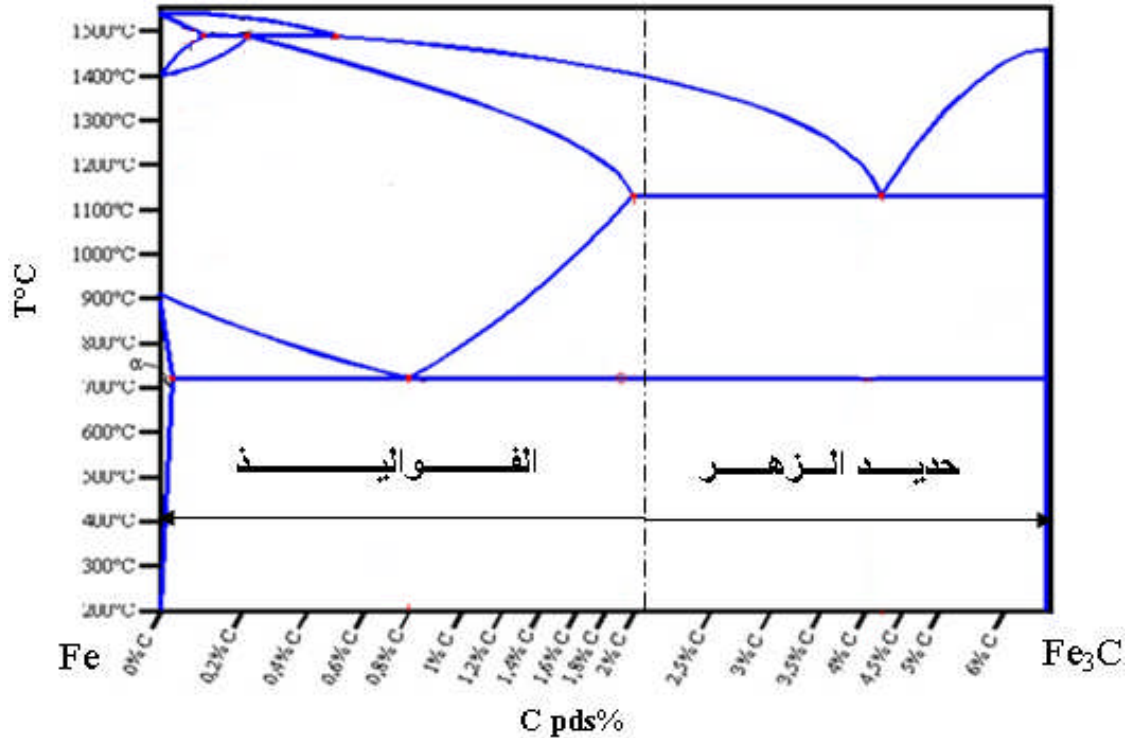
يبين الشكل (I-1) بيان الاتزان Fe-Fe₃C [1]. يمكن تقسيم بيان الاتزان حسب تركيز الكربون إلى جزئين:

1-1 حديد الزهر :

عبارة عن سبائك Fe-C تحتوي نسبة كربون أعلى من 2%. تنخفض إضافة نسبة C 4.3% من درجة حرارة الانصهار إلى 400°C. يسمح انخفاض درجة حرارة الانصهار بإعطاء سبائك اوتكتيكية مناسبة و تشكيل عينات ذات أشكال معقدة بواسطة الإذابة [2-3]. يوجد نوعان من حديد الزهر:

- **حديد الزهر الرمادي :** يحتوي على الغرافيت ذو الشكل الكروي أو يكون على شكل شرائط اوتكتيكية. ترفع شرائط الغرافيت الاوتكتيكية من هشاشة حديد الزهر الرمادي. يشجع وجود بعض الشوائب مثل السوفر على تشكيل البنية الشرائطية لحديد الزهر الرمادي. يمكن الحصول على خصائص معينة لحديد الزهر الرمادي بإضافة بعض العناصر السببكية. يشجع إضافة السيليوم تشكيل الغرافيت [4-5]. يساعد إضافة المنغنيز على تكوين حديد الزهر الرمادي

الكروي . يمكن تعويض الفولاذ بحديد الزهر الرمادي الكروي والذي يتمتع بلدونة جيدة في عدة تطبيقات [3].



الشكل (I-1) : بيان الاتزان Fe-Fe₃C

- **حديد الزهر الأبيض** : يكون الكربون مع ذرات الحديد شرائط او تكتبية لكربيد الحديد (Fe₃C). يشجع إضافة الكروم تكون السمنتيت (Fe₃C) و تشكيل حديد الزهر الأبيض خاصة عند تطبيق سرعة تبريد معتبرة. يمكن الرفع من لدونة حديد الزهر الأبيض بمعالجة حرارية تتراوح بين 900°C و 1000°C والتي تفكك السمنتيت غير المستقر إلى الأستنتيت و الغرافيت [4].

2-1 الفولاذ :

الفولاذ عبارة عن سبائك للحديد والكربون . يمكن أن تحتوي البنية المجهرية للفولاذ على الكربون النقي (graphite) أو على مركب كيميائي شبه مستقر يسمى السمنتيت (Fe₃C) وهو مركب غني بالكربون. تجدر الإشارة إلى إمكانية تفكك السمنتيت إلى الحديد و الغرافيت عند درجات الحرارة المرتفعة عندما يكون الزمن كافياً. يسمى المحلول الصلب للكربون في الحديد α بالفريت وفي الحديد γ بالأستنتيت. يمكن تشكل ترسبات أخرى داخل الفولاذ عدى السمنتيت و الغرافيت [6].

2- جزء بيان الإتزان Fe-Fe₃C :

يُبين الشكل (I-2) مختلف الأطوار بدلالة درجة الحرارة ونسبة ذوبانية الكربون في الحديد في جزء من بيان الإتزان Fe-Fe₃C. يلاحظ أنّ الذوبانية العظمى في الحديد γ (الأستنتيت) التي تمثل 2.11% وزناً

عند درجة حرارة 1145°C أعلى منها في الحديد α (الفريت) وهي 0.02% وزناً عند درجة حرارة 727°C .

1-2 الحديد النقي (Fe) :

الحديد معدن ذو لون ابيض فضي . ذو كتلة ذرية $M=55.85$ و عدد ذري $Z=26$. يقدر نصف قطره الذري بـ 1.27\AA . ينصهر عند درجة حرارة 1536°C [7] .

يتبلور الحديد النقي (Fe) على شكل ثلاثة بُنى بلورية مختلفة α و γ و δ [8].

- البنية البلورية (α) : بنية ممرضة الجسم (CC) . يرمز لهذا النوع من الحديد بـ (Fe_α) وهو مستقر عند درجة حرارة أدنى من 919°C .
- البنية البلورية (γ) : بنية ممرضة السطوح (CFC) . يرمز لهذا النوع من الحديد بـ (Fe_γ) و هو مستقر بين درجتى حرارة 910°C و 1390°C .
- البنية البلورية (δ) : بنية ممرضة الجسم (CC) . يرمز لهذا النوع من الحديد بـ (Fe_δ) وهو مستقر عند درجة حرارة أعلى من 1390°C و التي يحدث عندها التحول الطوري $\delta \leftrightarrow \gamma$.

2-2 الكربون (C) :

الكربون عبارة عن عنصر غير معدني . ذو كتلة ذرية $M=12.011$ و عدد ذري $Z=6$. يقدر نصف قطره الذري بـ 0.77\AA . تبلغ درجة حرارة انصهاره 3500°C [9] . يكون الحديد مع الكربون المركب الوسيطى السمنتيت Fe_3C .

3-2 السمنتيت (Fe_3C) : هو عبارة عن مركب كربوني وسيطي للحديد تركيبه الكيميائي (Fe_3C) . يحتوي على تركيز وزني للكربون يقدر بـ 6.67% [10] . ذو كثافة مرتفعة تقدر بـ 7.82 [11] . تبلغ درجة حرارة انصهاره 1252°C [3] . يتمتع بقساوة عالية تقدر بـ $H_v=1000$ [12] . ذو بنية بلورية معينة مستقيمة أبعادها هي $a=0.4523\text{nm}$ و $b=0.5089\text{nm}$ و $c=6.743\text{nm}$ [12].

4-2 المنحنيات A :

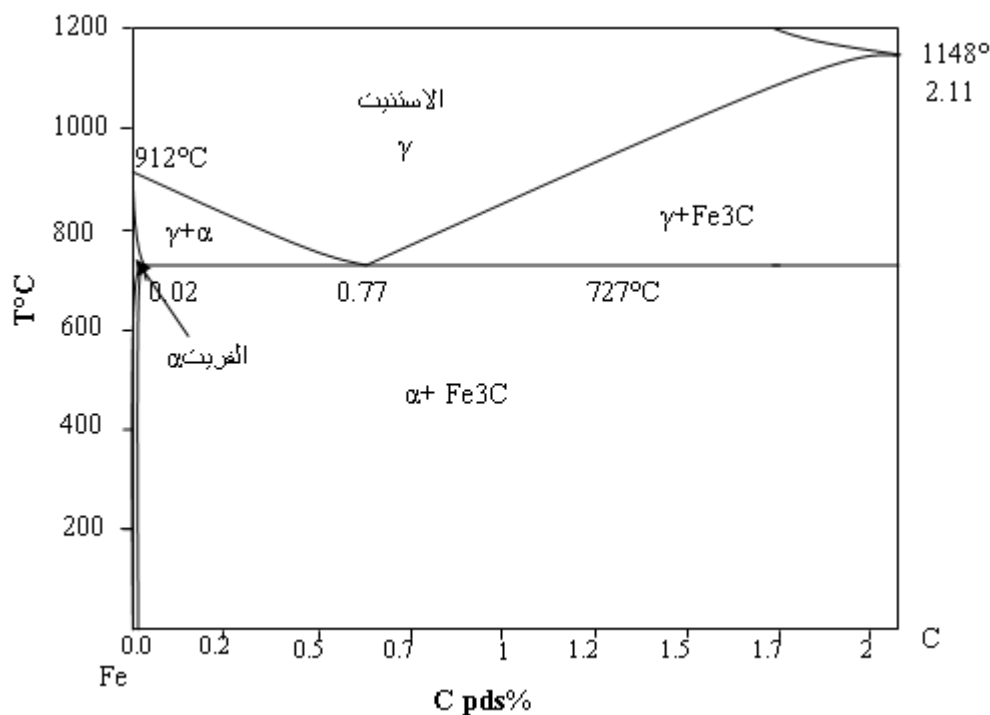
يحتوي بيان الاتزان على منحنيات معرفة بالحرف A تشير إلى حدوث التحولات الطورية.

A_3 : يوافق الحد الفاصل بين مجال الفريت-الاستنتيت ومجال الاستنتيت. تمثل A_3 درجة الحرارة التحول الطوري $\alpha \rightarrow \gamma$. يكون الطور الفيريتي المتشكل أثناء التبريد بارامانغناطيسي. يرافق التحول $\alpha \leftrightarrow \gamma$ (أثناء التبريد أو التسخين) إعادة توزيع ذرات الكربون بين الفريت والاستنتيت [6].

A_1 : يوافق درجة حرارة ثابتة تقدر بـ 727°C [2-6]. الحد الفاصل الأعلى بين مجال الفريت و السمنتيت.

A_{cm} : يوافق الحد الفاصل بين مجال الاستنيت - السمنتيت ومجال الاستنيت. يمثل A_{cm} حد ذوبانية الكربون في الاستنيت أثناء عملية التبريد و الموافق لبداية ظهور السمنتيت الثانوي داخل الاستنيت. يكون الاستنيت مشبع بالكربون عند درجة الحرارة الموافقة للمنحني A_{cm} . تتكون بنية مجهرية ثنائية الطور (الاستنيت و السمنتيت الثانوي) أسفل من المنحني A_{cm} . يؤدي تكوين السمنتيت الثانوي إلى انخفاض نسبة الكربون في الاستنيت [2-6-3].

تجدر الإشارة إلى أن مواقع هذه المنحنيات يمكن أن تتغير حسب شروط القياس سواءا عند التبريد أو التسخين. يبدأ تحول الاستنيت عند التبريد بتشكيل الفريت. تنخفض ذوبانية الكربون في الفريت الاوتكتويدي أسفل من درجة الحرارة 727°C مع انخفاض درجة الحرارة [13].



الشكل (I-2) جزء من بيان الاتزان Fe-Fe₃C (الفواليد)

5-2 البنى البلورية لجزء بيان الاتزان :

ينغرس الكربون في الفراغات البينية للحديد ليكوّن محاليل إنغراسية مختلفة . يتميّز كل محلول من هذه المحاليل ببنيته البلورية ودرجة حرارة الذوبانية العظمى للكربون . يحتوي جزء بيان الاتزان ثلاثة محاليل إنغراسية وهي :

الفريت (α) :

يحتلّ الكربون المواقع الإنغراسية في شبكة البنيتين α (الحديد Fe_α) وذلك لصغر حجمه. الفريت محلول جامد إنغراسي للكربون في الحديد α . تصل الدوبانية العظمى للكربون في (Fe_α) عند درجة حرارة $727^\circ C$ إلى 0.02% وزناً. بنية الطور الفيريتي بنية مكعبة مركزة الجسم (CC) [14].

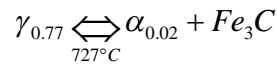
الأسنتيت (γ) :

يحتلّ الكربون المواقع الإنغراسية في شبكة البنيتين γ (الحديد Fe_γ) وذلك لصغر حجمه. السمنتيت محلول جامد إنغراسي للكربون في الحديد γ . تصل الدوبانية العظمى للكربون في (Fe_γ) إلى 2.11% عند درجة حرارة $1143^\circ C$. بنيته البلورية مكعبة مركزة الوجوه (CFC) [15]. يوضّح بيان الإيزان (الشكل I-1) أن طور الأسنتيت يمكن أن يستقر عند درجات الحرارة العالية [14].

يمكن تقسيم المنحني إلى قسمين حسب تركيز الكربون. حيث أكبر من 0.77% يُصنّف فولاذ فرط أوتكتويدي و أقل من 0.77% هبط أوتكتويدي.

البرليت (P) :

يتكوّن من خليط طوري من الفريت والسمنتيت. ينتج من التفاعل الأتكتويدي وفق المعادلة التالية :



تختلف الخصائص الميكانيكية والبنوية للبرليت (P) عن خصائص الفريت (α) والأسنتيت (γ) حيث تكون بنيته على شكل رقائق متناوبة من السمنتيت Fe_3C والفريت (Fe_α). أو تكون على شكل كروي [15,16]. يؤدي ارتفاع نسبة الكربون في الفولاذ إلى ارتفاع نسبة البرليت وبالتالي ارتفاع قيمة الصلادة وانخفاض لدونة الفولاذ ومقاومة الانكسار [17].

3- تصنيف الفولاذ :

يمكن تصنيف الفولاذ بطرق مختلفة حسب بعض الخصائص والاعتبارات أهمها [18,19]:

- 1- التركيب الكيميائي: يمكن تصنيفها إلى الفولاذ التي تحتوي نسبة معتبرة من العناصر السببكية والتي تحتوي نسبة ضئيلة من العناصر السببكية والتي لا تحتوي على العناصر السببكية.
- 2- تطبيقاتها وأهم خصائصها: تتميز الفولاذ بخصائصها البنوية والميكانيكية والفيزيائية التي تسمح باستعمالها في مجالات مختلفة.
- 3- طرق التصنيع: مثل استخدام الأفران الكهربائية أثناء مختلف مراحل تصنيع الفولاذ.
- 4- طرق التشكيل النهائي: تستخدم فيها الدرفلة على الساخن والبارد.
- 5- شكل الفولاذ: يمكن أن يكون الفولاذ على شكل قضبان أو صفائح أو أنابيب أو أسلاك..... الخ
- 6- المقاومة الميكانيكية: تصنف مختلف أنواع الفولاذ حسب مقامتها الميكانيكية وفق معايير (ASTM).

7- البنية المجهرية: توجد أنواع مختلفة من البنى المجهرية مثل البنية الفيبريتية والاستنتيتية والبرليتية.

4- الخصائص البنيوية للبرليت :

1-4 تنوي ونمو البرليت :

يكون الحد الفاصل بين البرليت المتشكل والطور الأم غير مترابط. يتنوي البرليت في الحدود الحبيبية بطريقة غير مستمرة وينمو على حساب الاستنتيت [20]. يكون نمو النوي الجديد متجانس مشكلا خلايا تسمى nodules أو colonies. تتكون الخلية الواحدة من فريت وحيد البلورة و سمنتيت وحيد البلورة وفق علاقة ارتباط محددة بدقة. تشكل الخلية الواحدة المتكونة من الفريت و السمنتيت ما يعرف بوحد بلورة ثنائي الطور أي البرليت. تجدر الإشارة إلى عدم وجود علاقة بين الاتجاهات البلورية المفضلة للبرليت والتركيب الكيميائي الابتدائي أو عمليات المعالجات الحرارية (التبريد). توجد علاقة واضحة بين الاتجاهات البلورية المفضلة في البرليت المتشكل وبين الطور الملامس لمنطقة تشكل البرليت. يؤدي تنوي البرليت انطلاقا من السمنتيت في الفولاذ الفرط او تكتويدية إلى تكوين برليت ذو الاتجاهات من النوع pitch/petch [21]. يسمح اختلاف جوار حبيبة الاستنتيت بظهور خلايا برليتية مختلفة الاتجاهات البلورية (يكون الجوار في الفولاذ الفرط او تكتويدية مثلا من النوع γ/γ أو γ/Fe_3C).

2-4 البنية المجهرية والبعد الشرائطي :

يمكن أن يتواجد البرليت على شكل شرائط منتظمة ومتوازية داخل الحبيبة أو على شكل حزمة شرائطية منحنية (Faisceaux de lamelles) [3,20]. يتم تشكل الخلايا الثنائية الطور أي البرليت عن طريق الانتشار بين البرليت والاستنتيت. وجد أن المسافة بين شرائط البرليت لها علاقة بفرق درجة الحرارة بين التحول الأوتكتويدي T_E ودرجة الحرارة الفعلية التي يحدث عندها التحول T [22]. يمكن أن يتشكل البرليت في درجة حرارة منخفضة جدا تقدر بـ $35^\circ C$ في حالة فولاذ ذو حجم حبيبي معتبر. تعطى المسافة بين الشرائط حسب العلاقة التالية [3]:

$$S = \frac{A}{T_E - T} \dots \dots \dots (I - 1)$$

A : ثابت يتعلق بالمقادير الترموديناميكية للنظام.

يؤدي تثبيت درجة حرارة التحول إلى ظهور بنية مجهرية برليتية ذات طاقة صغيرة بسبب انخفاض قيمة النسبة سطح/حجم لشرائط السمنتيت. تتحول عندئذ شرائط البرليت إلى الشكل الكروي (البرليت الكروي). يمكن الحصول على البرليت الكروي بتطبيق بعض المعالجات الحرارية.

3-4 تأثير العناصر السببكية على تكون البرليت :

تكون العناصر السببكية مثل المنغنيز و الفوسفور و الألمنيوم و السوفر موجودة دوما في الفولاذ كبقايا بعد عملية التصنيع. يؤدي وجود العناصر السببكية داخل الفولاذ إلى عرقلة تنوي البرليت وتعديل توازن

الأطوار. تخفض العناصر السببكية من النوع γ genne من درجة حرارة التحول الاوتكتويدي A_1 بينما ترفع العناصر السببكية من النوع α genne درجة الحرارة A_1 [3].

4-4 تأخير تنوي البرليت :

يؤخر إضافة العناصر السببكية من بداية التحول البريتي عن طريق ارتفاع زمن الحضانة اللازم لظهور البرليت. يؤخر كذلك كبر الحجم الحبيبي من بداية تنوي البرليت حيث تعتبر الحدود الحبيبية مواقع مفضلة للتنوي. يكون أحيانا تأخير تنوي البرليت بسبب وجود العناصر السببكية (مثلا النيكل) بكبح تشكيل احد الطورين المكونين للبرليت أي السمنتيت أو الفريت. يغير وجود البور في الحدود الحبيبية من القوة المحركة الكيميائية لتنوي الفريت في الحدود الحبيبية للاستنتيت [23].

5-4 تكوين بنية برليتية أخرى :

تسمى نواتج العديد من التفاعلات الاوتكتويدية بالبرليت. يمكن تكوين كربيرات أخرى غير السمنتيت Fe_3C في الفواليد التي تحتوي نسبة معتبرة من العناصر السببكية. يتكون نوعين آخرين من البرليت في مجال درجة حرارة تكون البرليت $\alpha + Fe_3C$ حسب التحولان $\gamma \rightarrow \alpha + M_{23}C_6$ (لفولاذ يحتوي 12% C) و $\gamma \rightarrow \alpha + M_7C_3$ (لفولاذ يحتوي 5% C) [24]. يمكن تشكل البرليت من النوع $\delta \rightarrow \alpha + M_6C$ في الفريت من النوع δ في الفواليد الغنية بالتنغستان أو الموليبدان عند درجة حرارة $800^\circ C$ أو $1100^\circ C$ [25].

5- الخصائص الميكانيكية للفواليد :

1-5 الصلادة :

تعبر الصلادة عن مقاومة المواد لتوغل الأجسام الصلبة في داخلها. يتم استعمال مؤثر ذو شكل هرمي أو كروي أو مخروطي للتوغل داخل الفولاذ بتطبيق قوة معينة في زمن محدد. تكون الصلادة معتبرة كلما كان الأثر الذي يتركه المؤثر صغير. تمثل الصلادة عادة ثلاثة أضعاف قيمة إجهاد حد المرونة. تجدر الإشارة إلى أن العلاقة بين قيمة الصلادة و إجهاد حد المرونة تقريبية و يقدر الخطأ الاعظمي بـ 20% [26,27].

2-5 المرونة :

يؤدي تطبيق اجهادات خارجية على الفولاذ إلى تحرك الذرات الموجودة داخله ويعرف هذا بالتشوه. يحدد هذا التشوه الخصائص الميكانيكية للفولاذ. يكون التشوه مرنا عندما ترجع العينة إلى أبعادها الابتدائية بعد نزع الإجهاد المطبق [28]. يمكن استخدام الفواليد ذات المرونة الجيدة في صناعة النوابض.

3-5 اللدونة :

يمكن أن يعبر عنها بنسبة التشوه الموافقة لنقطة الانكسار أي قدرة الفولاذ على التشوه. يتم التعبير عن لدونة الفولاذ بقياس التقلص في المقطع العرضي. تنخفض لدونة الفواليد بعد عمليات التشويه المطبقة

عليها[29]. يؤدي التخفيض في الحجم الحبيبي ووجود الترسبات داخل الفولاذ وارتفاع نسبة الانخلاعات إلى انخفاض لدونة الفولاذ. يمكن استخدام الفولاذ ذات اللدونة الجيدة في عمليات القلد [20].

4-5 الانكسار :

يمكن إرجاع أنواع الانكسارات في المواد إلى ثلاثة أسباب : حرارية أو تاكلية أو ميكانيكية [30]. يحدث الانكسار الميكانيكي عند ارتفاع قيمة الحمولة وحيدة الاتجاه أو بتطبيق حمولة دورية. يحدث الانكسار عند انفصال الروابط الذرية عن بعضها البعض [26-31]. يوجد ثلاثة أنماط أساسية لكيفية انكسار الفولاذ:

1-4-5 الانكسار الهش :

يحدث الانكسار الهش بالانفصال وفق مستوي عمودي على اتجاه الحمولة المطبقة. يكون التشوه في حالة الانكسار الهش متجانس بسبب عدم وجود ظاهرة التعنق. يساعد انخفاض درجة الحرارة و ارتفاع سرعة التشويه على حدوث الانكسار الهش [17-29]. تم ملاحظة الانكسار الهش بكثرة في البنى البلورية CC و HC (الفولاذ والحديد.....) بينما يكون حدوثه قليل في البنى البلورية CFC. يتميز الانكسار الهش بتشوه لدن صغير للفولاذ قبل الانكسار النهائي حيث تنكسر العينة مباشرة بعد التشوه المرن.

2-4-5 الانكسار اللين (المطيلي) :

يحدث الانكسار المطيلي في الفولاذ بعد التشوه اللدن. يؤدي التشوه اللدن المستمر إلى انخفاض في المقطع العرضي للعينة في المنطقة التي يحدث فيها الانكسار. تتوسع التشققات الصغيرة مكونة ثقب اهليجية عند الرفع من الإجهاد المطبق. تنمو الثقوب عن طريق انزلاق الانخلاعات على المستويات التي تمتلك إجهاد قص أعظمي (يميل إجهاد القص الأعظمي عادة بزواوية 45° عن اتجاه تطبيق الحمولة). تظهر التشققات في منطقة التعنق بسبب ارتفاع قيمة الاجهادات المطبقة. يحدث عادة الانكسار بالقص من خلال الحبيبات وأحيانا من خلال الحدود الحبيبية [17-29-30].

3-4-5 الانكسار عن طريق انتشار الشقوق :

يحدث الانكسار النهائي أحيانا بانتشار الشقوق تحت تأثير الطاقة المخزنة أثناء التشوه. يرتبط الإجهاد الحدي اللازم لانتشار التشققات بقيمة الحمولة المطبقة و الطول الابتدائي للتشق و المقاومة الذاتية لانتشار التشققات في الفولاذ. يعطى شرط Griffith لانتشار التشققات كالتالي:

$$K.y.\sqrt{\pi L} \geq K_c \dots \dots \dots (I-2)$$

K : معامل كثافة الاجهادات

y : معامل هندسي مرتبط بشكل الحمولة

L : الطول الابتدائي للتشق

K_c : معامل كثافة الاجهادات الحدي

يلاحظ من خلال العلاقة انه كلما كان حجم العينة معتبر كلما كان احتمال وجود شق طويل معتبر وبالتالي تحقيق شرط Griffith [27].

5-5 إجهاد حد التجلد (endurance) :

يسمح تطبيق إجهاد دوري على العينة بمعرفة إجهاد حد التجلد σ_D . يبدأ ظهور الشقوق وانتشارها في الفولاذ عند إجهاد حد التجلد. يكون إجهاد حد التجلد اصغر من إجهاد حد المرونة دائماً. تعطى العلاقة بين إجهاد حد التجلد σ_D وعدد العمليات الدورية المطبقة على الفولاذ N كالتالي [27]:

$$N(\sigma - \sigma_D)^b = C \dots \dots \dots (I-3)$$

حيث:

C : ثابت

$$2 \geq b \geq 1$$

2-I التفسية

1-آليات التفسية :

يتم تفسية الفولاذ لاستخدامها في بعض المجالات التي تتطلب خصائص ميكانيكية مرتفعة. يمكن تفسية الفولاذ باستعمال الآليات التالية:

- التفسية بواسطة الانخلاعات: يعتبر هذا النوع أساس التفسية بواسطة التشويه.
- التفسية بواسطة الحجم الحبيبي : يتغير إجهاد حد المرونة حسب قيمة الحجم الحبيبي تبعا لعلاقة
petch-hall.
- التفسية بواسطة العناصر المذابة : ترتفع الخواص الميكانيكية للفولاذ عند إضافة بعض العناصر السببكية.
- التفسية بواسطة الترسيبات : تشكل العناصر السببكية و الكربون و ذرات الحديد أنواع مختلفة من الترسيبات. ترفع هذه الترسيبات من الخصائص الميكانيكية للفولاذ.

1-1 التفسية بالذرات والشوائب (بإذابة العناصر المعدنية) :

يؤدي وجود الشوائب داخل الشبكة الأم إلى حدوث تشوهات في الشبكة في المناطق المحيطة أو القريبة من الشوائب. يتم تفسية الفولاذ نتيجة التفاعلات بين هذه التشوهات وحقول الاجهادات الناشئة حول الانخلاعات [32]. ترتبط عملية التفسية بالذرات بعدة عوامل:

- نسبة وحجم الذرات المذابة (التفسية بواسطة الذرات الانغراسية اكبر من التفسية بالذرات الاحلالية).
- الاختلاف بين خصائص المرونة بين الشبكة الأم والشوائب. تتجاذب الانخلاعات عندما تكون الشوائب اكبر ليونة من الشبكة الأم وتتنافر الانخلاعات عندما تكون الشوائب أكثر قساوة من الشبة الأم.
- المعامل الالكتروني للذرات المذابة.

تكون العلاقة بين نسبة الذرات المذابة ونسبة التفسية مرتبطة بنوع البنية المجهرية وطبيعة المعدن و الذرات المذابة. وجد من اجل الفريت علاقة خطية تربط بين نسبة الذرات المذابة والتغير في إجهاد حد المرونة [33]. يرفع الكربون و الازوت من إجهاد حد المرونة الفريت بصفة معتبرة مقارنة بالعناصر الأخرى مثل المنغنيز. تخفض بعض العناصر الأخرى (الكروم مثلا) من إجهاد حد المرونة.

1-2 التفسية بالترسيبات :

تعتبر آلية التفسية بالترسيبات معقدة جدا بسبب العوامل العديدة التي تتحكم في هذه الآلية. تكون هذه العوامل مرتبطة بخواص الترسيبات (حجمها و شكلها) و توزيعها داخل الشبكة الأم وكيفية تفاعلها مع الانخلاعات [32-33]. تتناقص سرعة الانخلاع المنزلق على المستوى البلوري عند اقترابه من الترسيب إلى أن يتوقف نهائيا. يجب الرفع من الإجهاد المطبق لتجاوز الترسيب. يتم تجاوز الترسيب عن طريق ثلاثة آليات مختلفة [34].

- آلية القص

- آلية الالتفاف حول الترسيب

- آلية تغيير مستوي انزلاق الانخلاع

اثبت Bacon [35] تفاعل الأجزاء المختلفة للانخلاعات التي تلتف حول الترسيب ويعرف بالتفاعل القطبي. يعطى الإجهاد الحدي اللازم كي يتخطي الانخلاع الترسيب عن طريق الالتفاف حول الترسيب بدون اعتبار للتفاعل بين مختلف أجزاء الانخلاع حسب علاقة Owron كالتالي [36]:

$$\tau_{orwon} = \frac{\mu b}{L_p} \dots \dots \dots (I-4)$$

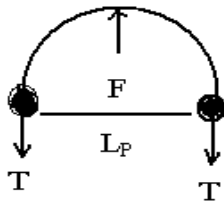
L_p : المسافة المتوسطة بين ترسيبين متجاورين على طول خط الانخلاع.

b : شعاع burgeurs.

μ : معامل القص.

تجدر الإشارة إلى انه يمكن تطبيق علاقة Owron عندما يكون حجم الترسيب صغير إمام المسافة المتوسطة L_p .

يوافق إجهاد Owron الحالة غير المستقرة بين القوة المطبقة F و توتر خط الانخلاع T وينتج عن حالة عدم التوازن الميكانيكي بين القوة المطبقة و توتر خط الانخلاع.



الشكل (I-3): رسم تخطيطي لنموذج حساب الاجهاد الحدي

T : توتر خط الانخلاع.

F : القوة المطبقة على الانخلاع.

يعطى T بالعلاقة التالية:

$$T = \frac{\mu b}{2} \dots \dots \dots (I-5)$$

تعطى العلاقة العامة للإجهاد الحدي من اجل المسافة المتوسطة بين ترسيبين متجاورين و موزعين بصفة عشوائية في مستوي الانزلاق كما يلي [36,37]:

$$\tau_c = 0.81 \frac{\mu b}{L_s} \dots \dots \dots (I-6)$$

حيث:

$$L_s = \frac{1}{\sqrt{n_s}} \text{ و } L_p = 1.25L_s$$

n_s : عدد الترسيبات في وحدة السطح.

تعتبر مختلف أجزاء الانخلاع غير مستقلة عن بعضها البعض وتتفاعل فيما بينها. أثبتت الدراسة [38] أن التفاعل بين مختلف أجزاء الانخلاع يؤثر على الإجهاد الحدي وكذا انحناء الانخلاع الموجود بين الترسيبات.

3-1 التقسية بالانخلاعات :

يؤدي التشويه اللدن إلى تغيير البنية المجهرية للمعادن و الرفع من كثافة الانخلاعات الموجودة داخلها [39]. يتطلب تحريك الانخلاعات الرفع من الاجهادات المطبقة في مستويات الانزلاق [32]. يؤدي تفاعل التجاذب بين الانخلاعات إلى ظهور ترتيب وتراكب جديد للانخلاعات وبالتالي تكوين خطوط انخلاعات جديدة. يظهر انحناء الانخلاع بين كل نقطتين من نقاط التفاعل بين الانخلاعات. يحدث التشوه اللدن للمعدن عندما يبلغ الإجهاد المطبق قيمة أعلى من قيمة التوتر T الموافق لانحناء الانخلاع. يرتبط الإجهاد الموافق للتشوه اللدن بالمسافة بين نقاط تفاعل الانخلاعات وبالتالي بكثافة الانخلاعات ρ حسب العلاقة التالية [40]:

$$\sigma_{dis} = \alpha \mu b \sqrt{\rho} (MPa) \dots \dots \dots (I-7)$$

b : طولية شعاع Burgers.

μ : معامل القص.

ρ : كثافة الانخلاعات.

α : معامل التفاعل ويعبر عن الشدة المتوسطة للتفاعلات بين الانخلاعات (يعطى بـ 0.3 بالنسبة للبنية الممركة الجسم CC [41]).

4-1 التقسية بالحجم الحبيبي :

تعتبر التقسية بواسطة حدود الحبيبات أهم العوامل في الفولاذ اللينة. يعطى الإجهاد حد المرونة σ حسب علاقة Petch و Hall كالتالي [42]:

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \dots \dots \dots (I-8)$$

k : ثابت.

d : الحجم الحبيبي.

σ_0 : إجهاد الشبكة.

2- نماذج تفسير علاقة Petch-Hall :

1-2 نموذج التعبنة بالانخلاعات:

تم اقتراح هذا النموذج من طرف Petch و Hall [42]. يكون الإجهاد الناتج عن توزيع الانخلاعات متناسب مع عدد الانخلاعات n المتشكلة في الحدود الحبيبية. يتم تنشيط منابع الانخلاعات في الحبيبة المجاورة (بداية التشوه اللدن) عندما يصل الإجهاد إلى قيمة حدية. يفرض هذا النموذج المقترح حدوث التشوه بطريقة واحدة فقط وهي الانزلاق المستوي بينما تكون علاقة Petch و Hall صالحة مهما يكن نوع التشوه.

2-2 نموذج التقسية بالتشويه (شبكة الانخلاعات) :

اعتبر هذا النموذج أن علاقة Petch و Hall تمثل تمديدا لنظرية التقسية بالانخلاعات (بشبكة الانخلاعات). يفترض نموذج التقسية بالتشويه وجود علاقة بين كثافة الانخلاعات ρ اللازمة لحدوث التشوه اللدن و الحجم الحبيبي d من الشكل $\rho \propto \frac{1}{d}$. تعطى علاقة Petch و Hall وفق نموذج التقسية بالانخلاعات كالتالي :

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} = \sigma_0 + \alpha M \mu b \sqrt{\rho} \dots \dots \dots (I-9)$$

تم تأكيد هذا النموذج من طرف Ashby [43] الذي بين وجود تناسب عكسي بين كثافة الانخلاعات و الحجم الحبيبي.

2-3 نموذج اعتبار الحدود الحبيبية كمنابع للانخلاعات :

توصلت دراسات إلى تأكيد عدم وجود علاقة خطية تربط بين كثافة الانخلاعات و إجهاد حد المرونة في بعض الحالات [44]. تمكن نموذج الحدود الحبيبية أن يبرهن إمكانية الحصول على علاقة Petch و Hall باعتبار الحد الحبيبي كمنبع للانخلاعات (أي تشكيل الانخلاعات و حركتها انطلاقا من الحد الحبيبي). تؤثر إذن البنية المجهرية و التركيب الكيميائي للحد الحبيبي على المعامل k و على العلاقة بين الحجم الحبيبي و إجهاد حد المرونة [45].

3- تجربة الشد :

يهتمّ الباحثون بإبراز كل الخصائص الميكانيكية التي تتمتع بها الفولاذ . لهذا قاموا بإجراء عدد كبير من التجارب لأجل تحديد الخواص الميكانيكية للمعادن , من بينها تجربة الشدّ التي تفضّل على تجارب أخرى لسهولة إضافة إلى إعطائها القيم الفعّالة للإجهاد والتشوّه (σ, ϵ) مباشرة [46] .

3-1 منحنى الشدّ الاصطلاحي :

يعطي منحنى الشدّ الاصطلاحي تغيّر الإجهاد المطبق $\sigma = F/S_0$ (الحمولة المطبقة F في وحدة السطح الابتدائي S_0) بدلالة التشوه $\epsilon = \Delta L / L_0$ (تغيّر الاستطالة $\Delta L = L - L_0$ في وحدة الطول الابتدائي L_0) , حيث L هو طول العينة عند تطبيق الحمولة F . تعطى قيمة التشوه و الإجهاد المطبق دون اعتبار للتغير المحلي في المقطع العرضي للعينة. يوضّح الشكّل (I-4) نموذج لمنحنى الشدّ الاصطلاحي [46]. يظهر التشوه المرن للسلك في منحنى الشد على المجال. يبدأ ظهور التشوه اللدن عند نهاية مجال التشوه المرن (النقطة A) .

1. التشوه المرن (المجال OA) :

يتميّز بسلوكه العكوس حيث عند نزع الحمولة المطبقة يعود السلك إلى أبعاده الابتدائية . يُحدّد نهاية المجال (OA) قيمة إجهاد حد المرونة σ_e , الذي يمثل أعلى إجهاد يمكن أن تتحمّله العينة مع إمكانية حفاظها على حالتها الابتدائية [46] . عادة ما يعطى الإجهاد σ_e بسبب صعوبة تحديده موافقا للتشوّه 0.2% وفق العلاقة التالية [46,47] :

$$\sigma_{e,0.2} = E\epsilon_{0.2} \dots \dots \dots (I-10)$$

2. التشوه اللدن (المجال BD) :

يكون التشوّه دائماً حيث لا يمكن رجوع السلك إلى حالته الابتدائية . يفسر وجود هذا المجال من وجهة النظر الميكروسكوبية بظهور الإنخلاعات . تلعب حركة الإنخلاعات دور رئيسي في آلية التشوّه في المواد ذات البنى الممركزة الجسم. تتوقف سهولة حركة الانخلاعات على مدى تفاعلاتها مع عناصر الشبكة والمتمثلة في الترسيبات والشوائب و الأطوار الموجودة في الشبكة . يتم التشوه بالية انزلاق الانخلاعات وفق مستويات واتجاهات بلورية محددة عندما تكون طاقة عيوب التعبئة (γ_{SFE}) معتبرة , و بالية التوأمة عندما تكون طاقة عيوب التعبئة (γ_{SFE}) صغيرة. يتميّز التشوه اللدن بمقداران رئيسيان هما :

1- المقاومة الميكانيكية (σ_m) : وهي أعلى قيمة إجهاد يمكن أن تتحمّله العينة دون أن تنكسر . يبدأ تحصرّ العينة بعد النقطة C الموافقة لأعلى قيمة للإجهاد نتيجة لظهور الفجوات التي يشكّلها تجمعّ الإنخلاعات في منطقة معيّنة .

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} \dots \dots \dots (I-12)$$

2- إجهاد حد الانكسار (σ_m): وهي أعلى قيمة إجهاد يمكن أن تتحمّله العيّنة دون أن تنكسر . يبدأ تخصّر العيّنة بعد النقطة C الموافقة لأعلى قيمة للإجهاد نتيجة لظهور الفجوات التي يشكّلها تجمّع الانخلاعات.

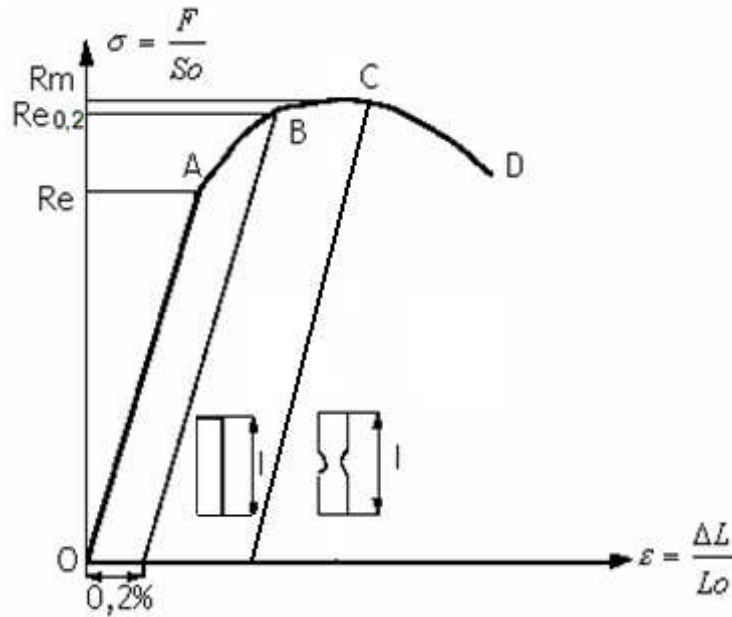
$$\sigma_r = \frac{F_r}{S_0} \dots \dots \dots (I-13)$$

تواصل الفجوات التي تشكّلها الانخلاعات في التوسّع حتّى يتمّ التقاؤها وتداخلها مع بعضها البعض ما يسمح بتفكك جميع الرّوابط وإنكسار العيّنة . يمرّ التخصّر بالمراحل التالية :

- تتجمّع الفجوات و تنتشر باتجاه الشّد لتكوّن الثّقوب .

- يحدث التشدّد بانفصال جزئي العيّنة وإنكسارها عند النقطة (D) .

يظهر الإنكسار المطيلي الناتج عن التعنّق على شكل كأس - مخروط (Cup- Cone) [48] .



الشكل (I-4) : الشّكل العام لمنحنى الشّدّ الإصطلاحي لمعدن مطيلي

يحدد منحنى الشّد الإصطلاحي كلا من نسبة التشوه (ϵ) و المطيلية (Z) وفق العلاقتان التاليتان :

3- التّشوّه (ϵ) :

$$\epsilon_c \% = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \dots \dots \dots (I-14)$$

4- المطيية (Z) :

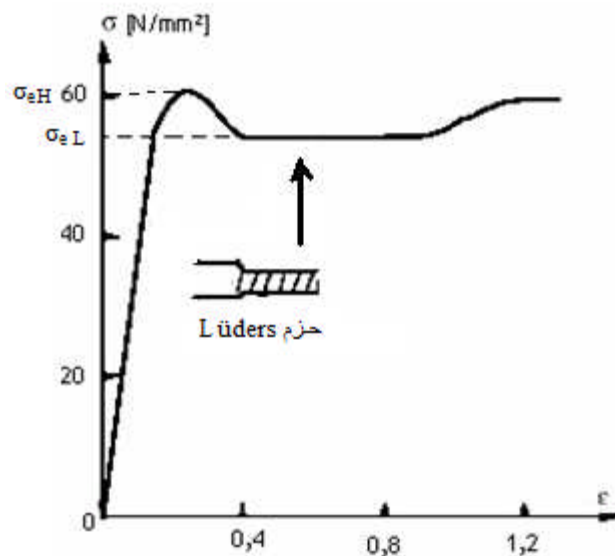
$$Z\% = \frac{Si - Sf}{Si} \cdot 100 \dots \dots \dots (I-15)$$

S_f : مقطع العينة بعد الإنكسار.

S_o : مقطع ابتدائي للعينة.

يظهر على منحنيات الشد الإصطلاحية لبعض الفولاذ اللينة مسطح مسنن ، يفصل بين التشوه المرن و التشوه الدائم (الشكل I-5) [46]. يوضح هذا الشكل المسطح قيمتين لإجهاد حد المرونة ، القيمة العليا σ_{eH} والقيمة الصغرى σ_{eL} [49]. يجب ارتفاع قيمة الإجهاد المطبق بعد مجال المسنن لمواصلة تشويه العينة وتسمى هذه الظاهرة بالتقسية [50]. يعبر في هذه الحالة عن إجهاد حد المرونة كما يلي :

$$\sigma_{emoy} = \frac{\sigma_{eH} - \sigma_{eL}}{2} \dots \dots \dots (I-16)$$



الشكل (I-5) : الشكل العام لمنحنى الشد

الإصطلاحي لفولاذ لين بوجود مسطح مسنن

تظهر على سطح عينة الاختبار حزم تشوه تدعى بحزم Lüders ابتداء من بداية المسطح الشكل (I-5) وهي تشوهات غير متجانسة [46,51]. تظهر هذه الآلية من اجل البنى الممركزة الجسم CC. تم مشاهدة هذا النوع من الشرائط أول مرة من طرف Biobert [52] ثم Lüders [53]. تجدر الإشارة إلى أن شرائط Lüders تبدأ عند طرف العينة ثم تنتشر إلى الطرف الآخر وتكون مائلة عن اتجاه السحب بزواوية

معينة [54]. قد يرافق حركة شرائط Lüders ظهور شرائط أخرى والتي يتوقف ظهورها عندما تصل شرائط Lüders إلى الطرف الثاني لعينة الاختبار.

2-3 منحني الشدّ الحقيقي :

إنّ المنحني الاصطلاحي المعطى من طرف جهاز الشدّ لا يعبر بصفة دقيقة على تجربة الشدّ , لأنّ المقطع الإبتدائي S_0 والطول الإبتدائي L_0 للعينة يتغيران أثناء عملية الشدّ لذا يجب إدخال بعض التصحيحات الرياضيّة بالإعتماد على مبدئين مهمين هما :

1- الحجم النوعي للعينة ثابت .

2- الإجهاد وحيد الإتجاه .

يعبر منحني الشدّ عن تغير الإجهاد الحقيقي (σ_v) بدلالة التشوّه الحقيقي (ε_v) الشكل (I-6) [55] . يمكن ربط المقادير $(\sigma_v, \varepsilon_v)$ بالمقادير الاصطلاحية $(\sigma_c, \varepsilon_c)$ إنطلاقاً من مبدأ ثبات الحجم النوعي للعينة قبل وبعد التشوّه :

$$S_0 L_0 = SL \dots \dots \dots (I-17)$$

S: مقطع العينة المتغيّر تبعاً للمدة الزمنية الموافقة لتطبيق الحمولة (F) .

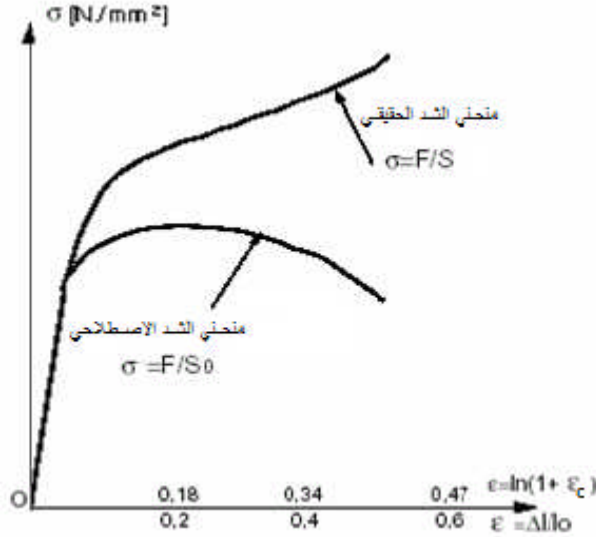
L: طول العينة المتغيّر تبعاً للمدة الزمنية الموافقة لتطبيق الحمولة (F) .

يعطى الإجهاد الحقيقي (σ_v) بدلالة الإجهاد الاصطلاحى (σ_c) بالعلاقة التالية :

$$\sigma_v = \sigma_c (1 + \varepsilon_c) \dots \dots \dots (I-18)$$

يعطى التشوّه الحقيقي (ε_v) بدلالة التشوّه الاصطلاحى بالعلاقة التالية :

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_c) \dots \dots \dots (I-19)$$



الشكل (I-6): الشكل العام لمنحنى الشد الحقيقي لمعدن مطيلي

3-3 معامل التقسية :

تبدأ تقسية الفولاذ عندما يتجاوز الإجهاد المطبق إجهاد حد المرونة (مجال اللدونة) σ_e . يلاحظ عندئذ تناقص في نسبة تغير الإجهاد إلى التشوه [56] و تعرف هذه الظاهرة بـ (L'écrouissage). يلاحظ أن تغير الإجهاد بدلالة التشوه لا يكون خطياً. أثبت كلا من Romberg و Osgood [57] انه يمكن كتابة الإجهاد الكلي (σ) كالتالي :

$$\sigma = \sigma_e + A \cdot \varepsilon_p^m \dots \dots \dots (I-20)$$

بالاعتماد على العلاقة :

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_e \dots \dots \dots (I-21)$$

يمكن كتابة المعادلة (I-20) كالتالي :

$$\ln \sigma_p = \ln A + m \ln \varepsilon_p \dots \dots \dots (I-22)$$

وهي معادلة مستقيم ميله m و يتقاطع مع محور الترتيب في النقطة $\ln A$.
حيث :

m : معامل التقسية.

A : المقاومة الميكانيكية للفولاذ.

σ_e : إجهاد حد المرونة.

σ_p : الإجهاد الموافق لمجال اللدونة.

ε_p^m : التشوه الموافق لمجال اللدونة.

افتراض تايلور أن الإجهاد في مجال اللدونة يتناسب طرذا مع الجذر التربيعي لكثافة الانخلاعات $\rho^{\frac{1}{2}}$ وفق العلاقة التالية [58]:

$$\sigma = Kb\rho^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (I - 23)$$

K : ثابت.

b : طولية شعاع Burgers.

باعتبار أن كثافة الانخلاعات (أو العيوب الأخرى) الابتدائية ρ_0 غير منعدمة داخل المعدن قبل التشويه تكون المعادلة السابقة كالتالي :

$$\sigma = \sigma_e + Kb(\rho - \rho_0)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (I - 24)$$

I-3 المعالجات السطحية للفولاذ

تتمثل المعالجة السطحية للفولاذ في تغيير طبقتها السطحية وإعطائها خصائص معينة. تتمتع العينات المعالجة سطحيا عموما بصلادة مرتفعة في السطح وقلب لين. تعتبر السمنتة والتتردة والغلفنة أهم المعالجات السطحية المستخدمة في المجال الصناعي.

1- السمنتة :

تتمثل السمنتة في تغيير التركيب الكيميائي لسطح فولاذ لين أو مرتفع الليونة (الفولاذ γ) بإضافة عنصر الكربون عند درجة حرارة تتراوح بين 900°C و 930°C [59]. يتم تسخين الفولاذ (γ) في محيط يحتوي غاز أكسيد الكربون أو هيدروكربيد السينوجان. تكون نسبة الكربون داخل الطبقة المسمنتة محصورة بين 0.85% و 1%. يمكن ان تتوغل طبقة السمنتة داخل الفولاذ حتى 0.15mm. يجب أن لا تتعدى نسبة الكربون في الطبقة المسمنتة المقدار 1% لتفادي تكون السمنتيت الحر الذي يصعب نزعها بعملية السقاية [59]. تؤدي عملية السمنتة إلى الرفع من صلادة سطح الفولاذ مع المحافظة على ليونة القلب. يستخدم هذا النوع من الفولاذ في صناعة القطع الميكانيكية التي تخضع في نفس الوقت إلى قوي ديناميكية واحتكاكات سطحية معتبرة (حماية الماكينات التي تعتمد مبدأ الاحتكاك). تتطلب السمنتة معرفة دقيقة لمختلف العوامل المؤثرة عليها مثل نوعية الفولاذ و حدود درجات الحرارة [60-61].

2- التتردة :

تتمثل التتردة في تقسية سطح الفولاذ باستخدام الازوت بدلا من الكربون (حالة السمنتة). يمكن تشكيل بعض المركبات في سطح الفولاذ مثل النيتريد Fe-N الذي يحتوي على نسبة 11.1%N و النترير Fe_4N الذي يحتوي على نسبة 5.9%N [59]. توجه هذه الفولاذ بعد عملية التتردة بالامونياك (NH_3) إلى بعض التطبيقات المستخدمة عند درجات حرارة مرتفعة مثل صناعة عنفات البخار والغاز.....الخ. يؤثر إضافة بعض العناصر إلى الفولاذ على خصائص طبقة التتردة. يخفض مثلا إضافة النيتروجين من صلادة طبقة التتردة. تستخدم الفولاذ التي تتعدى نسبة النيتروجين (Ni) النسبة الحدية في صناعة أحواض التتردة [59]. يكون الكروم (Cr) مع الازوت نيتريد الكروم الذي يرفع من صلادة طبقة التتردة. يساعد كل من الفاناديوم (Vn) والموليبدان (Mo) والتنجستان (Tw) على تقليص عمق توغل الازوت داخل العينات المتتردة. يرفع الالمنيوم الذي لا يجب أن تتعدى نسبته 1.3% من صلادة طبقة التتردة [59,60,61].

3- الغلفنة :

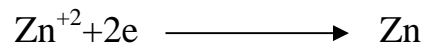
تُعاني الفولاذ من مشكلة التآكل (الصدأ) الذي يتسبب في إتلافها. يحدث تآكل الفولاذ عن طريق ظاهرة إلكتروكيميائية تُعرف بالأكسدة. يؤدي تفاعل ذرات الأكسجين الموجودة في المحيط مع ذرات حديد الفولاذ إلى تكوين الأكاسيد. تتمثل الغلفنة في تغطية سطح الفولاذ بطبقة من الزنك لحمايته من التآكل. تعطي

الغلفنة منظر جميل ولامع لسطح الفولاذ. يستخدم الزنك في حماية سطح الفولاذ بدلا من المعادن الأخرى مثل الرصاص والذهب بسبب انخفاض سعره. يفضل كذلك استخدام الزنك في الحماية بدلا من الطلاء بسبب مدة صلاحيته الطويلة.

1-3 طرق وضع طبقة الغلفنة :

1-1-3 الطريقة الإلكتروليتية :

تستعمل التغطية الإلكتروليتية للفولاذ للرفع من مقاومة الفولاذ ضد التآكل. تتمثل هذه العملية في وضع طبقة معدنية رقيقة على سطح معدن آخر لحمايته ولتحسين خصائصه السطحية كالصلادة مثلا. يتم تمرير تيار كهربائي ذو شدة معينة من خلال نظام مشكل من مهبط ومصعد داخل سائل يحتوي أيونات المعدن الذي يشكل طبقة الغلفنة (الزنك مثلا). تُربط العينة المراد غلفتها مع القطب السالب لمقوم التيار [62]. يرتبط سمك الطبقة بشدة التيار وزمن الغلفنة [63]. يتم وضع طبقة الغلفنة حسب معادلة التفاعل المصعدية التالية [62]:



تعتبر المعادلة السابقة على المظهر المبسط لظاهرة التفاعل المعقدة. يرافق هذا التفاعل انبعاث الهيدروجين. ترتبط كمية الهيدروجين المنبعث بطبيعة المحلول المستعمل [63].

2-1-3 الطريقة الكيميائية :

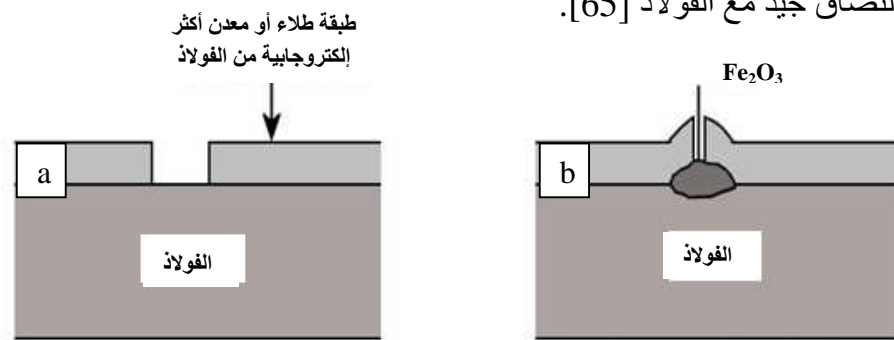
تغلف العينة الفولاذية بطبقة من الزنك مباشرة بعد غمسها في حوض الغلفنة (محلول الزنك أو خلائط الزنك). تتحكم آلية الانتشار في تكوين هذه الطبقة. تتدخل عدة عوامل في ظاهرة الانتشار كالتحضير الجيد لسطح العينات وزمن الغمس ودرجة حرارة الحوض. تتشكل مركبات سبكية على سطح العينة بعد إعادة توزيع ذرات السطح مكونة بذلك طبقة التغطية. تتكون التغطية الكيميائية نتيجة التفاعل السطحي بين الفولاذ والزنك السائل داخل حوض الغلفنة. تتميز التغطية الكيميائية بإمكانية إعطاء طبقة متجانسة السمك بغض النظر على شكل العينات المراد غلفتها. تفضل التغطية الكيميائية على التغطية الإلكتروليتية بسبب ظهور الإجهادات في هذه الأخيرة الناتجة عن مرور التيار الكهربائي.

2-3 أنواع الحماية بوضع طبقة من الزنك :

1-2-3 الحماية الحاجزية :

تقوم طبقة الزنك بعزل الفولاذ فيزيائيا من تأثير المحيط الذي يؤدي إلى حدوث ظاهرة التآكل. تتفاعل طبقة الزنك مع عناصر المحيط فتتشكل طبقة أكسدة تعمل هي الأخرى على حماية الفولاذ من التآكل. يمتاز الزنك بخاصية التآكل السريع في وجود عنصر مؤكسد مكونا الأيونات Z^{++} ($Z \rightarrow 2\text{e} + Z^{++}$). تتفاعل هذه الأيونات مع مختلف العناصر الموجودة في المحيط مشكّلة مجموعة من نواتج التآكل التي تلعب دور الحماية. تتمثل نواتج التآكل في تكوين طبقة رقيقة من أكسيد الزنك ZnO و من كربونات

الزّنك $ZnCO_3$ عند وجود أكسيد الكربون الثنائي بالإضافة إلى هيدروكسيد الزّنك $Zn(OH)_2$ و هيدروكسيد الكربون $Zn_5 (CO_3)_2 (OH)_6$. يُخفّض تشكيل هذه النواتج من سرعة تآكل الفولاذ بسبب عدم تفاعله المباشر مع عناصر المحيط. ترتبط سرعة التآكل بسرعة انتشار الأوكسجين من خلال طبقات نواتج التآكل. يمكن تحسين الحماية ضد التآكل بإضافة عناصر أخرى إلى حمّام الزّنك مثل الألمنيوم (Al) والمنغنيز (Mg) والكوبالت (Co) والكروم (Cr) [64]. تعمل هذه العناصر على إستقرار هيدروكسيد الزّنك. يسمح وجود SO_2 في المحيط بتحوّل نواتج التآكل إلى سولفيرات الزنك (Sulfite) ثم إلى سولفات الزنك (Sulfate) قابل للذوبان والتي تؤدي إلى فساد طبقة الحماية. ترتبط مدة الحماية التي يعطيها حاجز الحماية (طبقة الغلفنة) بسمك هذا الحاجز. يعطي هذا النوع من الحماية مقاومة جيّدة للاحتكاك والتصاق جيّد مع الفولاذ [65].



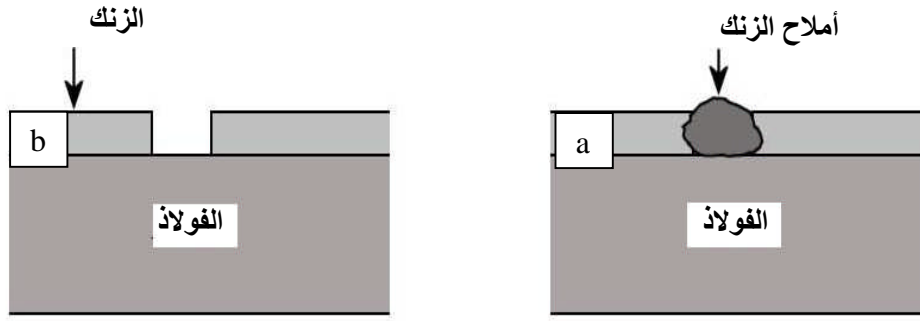
الشكل (I-7) : (a) : الحماية الحاجزية

(b) : تقليص طبقة التغطية

بواسطة نواتج التآكل مع الفولاذ [65]

2-2-3 الحماية الالكتروكيميائية :

تتم الحماية الالكتروكيميائية عند تغطية الفولاذ بعنصر جديد أكثر إلكتروسلبية من الفولاذ في سلسلة الغلفنة. تكمن الأهمية الكبيرة لهذه الحماية (الحماية الالكتروكيميائية) عند حدوث خدوش وإنكسارات في طبقة الزنك بسبب عيوب عدم الإستمرار. يتمّ تشكيل مولدة كهربائية بالقرب من مناطق الإنكسارات التي تعاني من الرطوبة. يلعب الزّنك دور المِهبط (فقدان الإلكترونات) والفولاذ دور المصعد (ربح الإلكترونات). يتمّ تأكسد طبقة الزّنك (المِهبط) بدلاً من الفولاذ (المصعد) وتكوين نواتج التآكل (أملاح الزنك). يبدأ ظهور تآكل الفولاذ عند النزاع التام لطبقة الزنك (تحول طبقة الزنك إلى نواتج التآكل) الشكل (I-8-a).



الشكل (I-8): (a) التآكل

(b): حماية نشيطة [65]

3-3 الغلفنة الساخنة :

تتمثل الغلفنة الساخنة في غمس الفولاذ في حوض الزنك لبضع ثواني عند درجة حرارة تتراوح بين 450°C و 460°C (أعلى قليلا من درجة حرارة انصهار الزنك المقدرة بـ 417°C). تعتمد الغلفنة الساخنة على الألفة الكيميائية الموجودة بين الفولاذ والزنك. يتم تكوين تغطية مشكلة من عدة طبقات بسبب التفاعل بين الفولاذ والزنك. تمثل كل طبقة من هذه الطبقات مركب سبيكي معين Fe-Zn. يسحب الفولاذ أثناء خروجه من حوض الغلفنة طبقة من الزنك السائل. تجدر الإشارة إلى مواصلة التفاعل بين الزنك والفولاذ لبضع ثواني خارج حوض الغلفنة (أثناء عملية التبريد) ما لم تنزل درجة الحرارة اقل من 300°C [66]. تتميز الغلفنة الساخنة بطول المدة الزمنية للحماية و مقاومة جيدة للصدمات بالإضافة إلى المظهر الجيد للمواد المغلفة. يفضل استخدام الغلفنة الساخنة كذلك بسبب سهولة التحكم بها وتكلفة التصنيع المنخفضة [67].

1-3-3 المراحل الرئيسية لآلية الغلفنة :

تمر الغلفنة الساخنة بمراحل رئيسية في مختلف الطرق التكنولوجية المستعملة. تبدأ عملية الغلفنة بالتحضير الجيد للسطوح ثم الغمس في حوض الغلفنة ثم التبريد بعد الخروج من حوض الغلفنة.

1-1-3-3 تحضير السطوح :

يتم معالجة السطوح قبل الغمس في حوض الغلفنة. تبدأ عملية المعالجة بغسل العينات و تنظيفها ثم صقلها . تنظف العينات مرة اخرى بعد الصقل ثم تمرر في محلول كلوريد الزنك (ZnCl_2) وكلوريد الأمونيوم (NH_4Cl) لتجنب إعادة تكوين أكسدة على سطوح الأسلاك و تعرف هذه المرحلة بـ (Fluxage). يتم بعد ذلك تسخين العينات إلى درجة حرارة قريبة من 100°C [68].

2-1-3-3 الغمس في حوض الغلفنة :

تعطي هذه العملية المركبات السبكية للتغطية (طبقة الغلفنة). يتم التفاعل الجيد بين الفولاذ والزنك نظرا للتحضير الجيد للسطوح سابقا [69]. يرافق أحيانا عملية الغمس اهتزاز ميكانيكي يعمل على نزع الأملاح

المحتركة و الاكاسيد المتشكلة في حوض الغلجنة و تحسين انتظام طبقة الغلجنة بالإضافة إلى تجنب التصاق القطع ببعضها [70].

3-1-3-3 الخروج من الحوض :

يتم التحكم في كمية الزنك المسحوب مع الفولاذ بعد خروجه من الحوض, بحسب الاتفاقيات المعمول بها صناعيا. تختلف التكنولوجيا المستعملة لضبط كمية الزنك المسحوبة (التقطير , الاهتزاز , القذف الغازي , التأثير الكهرومغناطيسي ,).

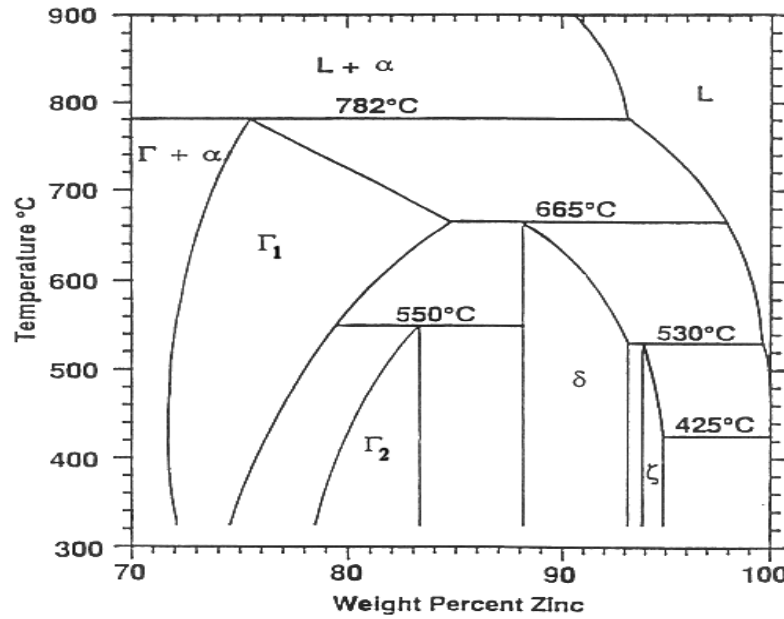
3-1-3-3 التبريد :

تحسن شروط التبريد من خصائص ومظهر طبقة الغلجنة , بالتأثير على عملية البلورة السطحية وظاهرة الانتشار بين الفولاذ والزنك. يؤدي التبريد البطيء إلى زيادة سمك المركبات السبكية Fe-Zn المتشكلة على حساب الطبقة η نتيجة استمرار الانتشار بين الفولاذ والزنك. يمكن توقيف ظاهرة الانتشار بين الفولاذ والزنك بالغمس في الماء عند درجة الحرارة العادية [71].

3-3-2 طبقة الغلجنة :

3-3-2-1 جزء بيان الإيزان Fe-Zn :

يعطي جزء بيان الإيزان Fe-Zn كل المركبات السبكية (الأطوار) التي تكون طبقة الغلجنة. ترتبط الخصائص الميكانيكية لطبقة الغلجنة مباشرة بالخصائص الميكانيكية لهذه الأطوار وسماكتها في الطبقة. يلاحظ وجود أربعة أطوار على جزء بيان الإيزان وهي : Γ و δ و ζ و η . ترتفع نسبة الزنك من طور إلى آخر على الترتيب. تجدر الإشارة إلى أن ذوبانية الحديد في السائل الزنكي تقدر بـ 0.035% عند درجة حرارة 460°C . تتميز الأطوار Fe-Zn المشكّلة للتغطية (طبقة الغلجنة) الناتجة عن الغلجنة المستمرة في حوض خالي من الألمنيوم بهشاشتها وانكساراتها. يفضل إذن استخدام تقنية الغلجنة المستمرة في حوض خالي من الألمنيوم لأجل العينات النهائية وليس العينات التي لاتزال تخضع إلى المعالجات الميكانيكية والحرارية بعد الخروج من حوض الغلجنة. يمكن التخلص من هذه السليبات باستخدام آلية الغلجنة المستمرة في حوض يحتوي على الألمنيوم. تتمتع هذه الأخيرة بقابلية جيّدة للتشوّه بفضل وجود الألمنيوم في حوض الزنك. يكون كل من الطورين Γ_1 و Γ_2 طبقتين رقيقتين. يجمع عادة بين هاتين الطبقتين في طبقة واحدة تسمى Γ . أُعتبرت هذه الأخيرة طبقة واحدة ولم يتمّ الكشف عن الطورين (الطبقتين التحتيتين) Γ_1 و Γ_2 إلا سنة 1974 من طرف الباحث Bastin [72]. تحتوي الطبقة Γ_1 على نسبة 23.5 إلى 28% وزنا من الحديد عند درجة حرارة 450°C . تنتج هذه الطبقة من التفاعل البيروكتيني عند 782°C بين الحديد Fe_α والسائل الزنكي. تقدر نسبة الحديد في الطبقة Γ_2 بـ 17 إلى 19.5% وزنا عند درجة الحرارة 450°C . يحدث التفاعل البيروكتويدي بين Γ_1 و δ عند درجة الحرارة $550 \pm 10^\circ\text{C}$ فتتكون الطبقة Γ_2 التي تتميز بصلادة مرتفعة مقارنة بالطبقة Γ_1 .

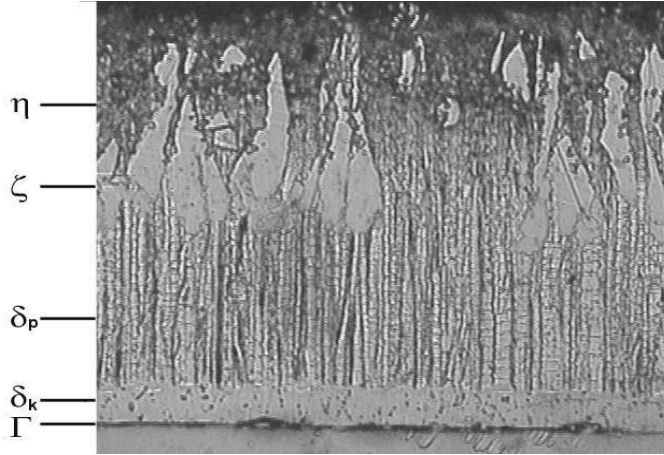


الشكل (I-9) : المنطقة الغنية من الزنك في بيان الاتزان Fe-Zn [65]

تحتوي الطبقة δ على نسبة 7 إلى 12% وزناً من الحديد . تتكون هذه الطبقة نتيجة للتفاعل البيريتكتيكي بين Γ_1 والسائل عند 665°C . يتم عادة تقسيم الطبقة δ إلى طبقتين δ_k و δ_p . توجد الطبقة δ_k (الكثيفة) في جهة الحديد Fe من بيان الاتزان. تتشكل الطبقة δ_k لأجل زمن غمس في حوض الغلفنة ذو درجة حرارة 553°C يقدر بـ 4 ساعات. توجد الطبقة δ_p (الحاجزية) في جهة الزنك Zn من بيان الاتزان. تم دمج الطبقتين δ_k و δ_p في طور واحد δ بسبب التشابه الكبير لبنيتهما البلورية [73]. تم مشاهدة طور واحد فقط لـ δ لأجل زمن غمس صغير. يحتوي الطور δ على نسبة 5 إلى 6% وزناً من الحديد. يتكون هذا الطور إنطلاقاً من التفاعل البيريتكتيكي بين الطور δ والسائل عند درجة حرارة $530 \pm 10^\circ\text{C}$. تتشكل هذه الطبقة بين الطورين δ و η في غياب الألمنيوم .

2-2-3-3 البنية المجهرية لطبقة الغلفنة :

تتشكل طبقة تغطية على سطح الفولاذ عند غمس هذا الأخير في حوض الغلفنة عن طريق الانتشار بين الحديد والزنك [74]. تتكون التغطية من المركبات السبكية المبينة في بيان الاتزان Fe-Zn [75]. تعطي هذه المركبات السبكية التصاق جيد للتغطية مع الفولاذ ومقاومة جيدة للاحتكاك. يوضح الشكل (I-10) البنية المجهرية للتغطية بعد عملية الغلفنة الساخنة. تتكون هذه التغطية من أربعة مركبات سبكية مختلفة ناتجة عن التفاعل الكيميائي بين الزنك والفولاذ. تعتبر هذه المركبات السبكية مستقرة ترموديناميكياً.



الشكل (I-10) : المركبات السببكية (الأطوار) بعد عملية الغلفنة [65]

- الطور Γ (Gamma) : يعرف بالصيغة الكيميائية $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ (Γ_1) او $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$ (Γ_2) وله بنية بلورية ممرزة الجسم (CC). يتراوح سمك طبقة الطور Γ بين $1\mu\text{m}$ و $2\mu\text{m}$. يصعب ملاحظة وجوده في طبقة الغلفنة لصغر سمكه. يمكن أن يتحول الطور Γ إلى الطور δ بسبب الانتشار السريع لذرات الحديد .
- الطور δ (Delta) : يعرف بالصيغة الكيميائية FeZn_7 وله بنية بلورية سداسية (Hexagonal). يتراوح سمك طبقة الطور Γ بين $30\mu\text{m}$ و $40\mu\text{m}$. يتميز الطور δ بهشاشته مقارنة مع الطور Γ .
- الطور ζ (Zêta) : يعرف بالصيغة الكيميائية FeZn_{13} وله بنية بلورية (Monoclinique). يتراوح سمك طبقة الطور ζ بين $7\mu\text{m}$ و $20\mu\text{m}$. يمتاز هذا الطور بقابلية الانكسار .
- الطور η (الزنك النقي) : يحتوي على تركيز من الحديد مساوي لتركيز الحديد في حوض الغلفنة أي 0.020% . يتبلور هذا الطور في البنية السداسية. يتراوح سمك طبقة الطور Γ بين $8\mu\text{m}$ و $12\mu\text{m}$.

3-2-3-3 خصائص أطوار طبقة الغلفنة :

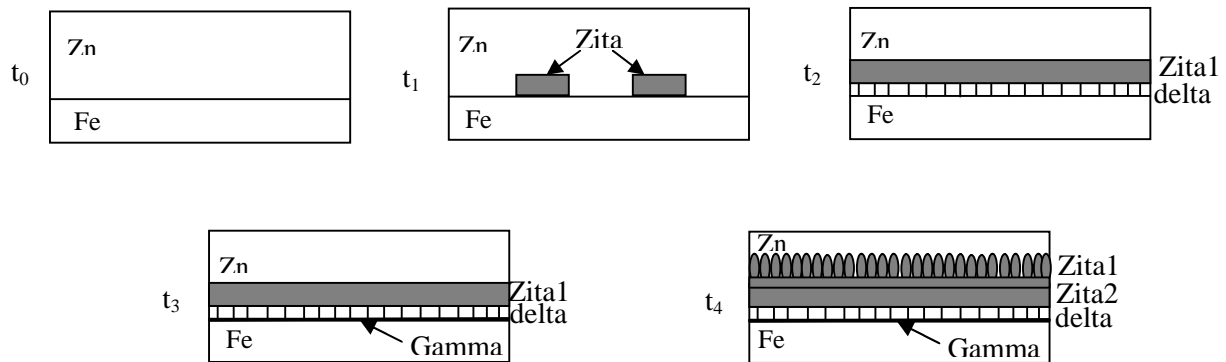
ينتشر الزنك داخل الفولاذ عند درجة حرارة الغلفنة مشكلا المركبات السببكية Fe-Zn. تعطي هذه المركبات السببكية التصاق ومقاومة احتكاك جيدة لطبقة الغلفنة بسبب ظاهرة الانتشار. تتميز هذه المركبات السببكية بصلادة أعلى من صلادة الزنك والفولاذ. يضمن الالتصاق الجيد لطبقة الغلفنة حماية أفضل للفولاذ. تجدر الإشارة إلى تأثير التحضير الجيد لسطح الفولاذ في مدى التصاق طبقة الغلفنة بالفولاذ. يستعرض الجدول (I-1) بعض خصائص الأطوار المشكلة لطبقة الغلفنة .

الطور Fe-Zn	الرمز	البنية البلورية	الصيغة	Fe(wt%) a 450°C	الصلادة (H _v)
Fer	α	CC	Fe	95	150
Gamma	Γ_1	CC	Fe ₃ Zn ₁₀	23.5 – 28	326 -496
	Γ_2	CFC	Fe ₅ Zn ₂₁	17 – 19.5	505
Delta	δ	Hexagonal	FeZn ₇	7 - 12	340
Zeta	ζ	Monoclinique	FeZn ₁₃	5 - 6	112
Eta	η	Hexagonal	Zn	< 0.03	70

الجدول (I-1): خصائص الأطوار المختلفة المكونة لبيان الاتزان Fe-Zn

4-2-3-3 تشكيل الأطوار Fe-Zn :

يتم تشكيل مجموعة من الطبقات التحتية Γ و δ و ζ و η على سطح العينات الفولاذية بعد إدخال هذه الأخيرة إلى حوض الزنك ذو درجة حرارة محصورة بين 450°C و 490°C. يبدأ تشكل طبقة الغلجنة بظهور الطور ζ (الشكل I-11) ثم الطور δ وبعد مدة زمنية (زمن الحضانة) الطور Γ . تتكون طبقة الغلجنة عبر المراحل الموضحة في الشكل (I-11) إنطلاقاً من زمن غمس العينات في حوض الغلجنة t_0 حيث $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$.



الشكل (I-11) : تمثيل مختلف مراحل تكون الأطوار

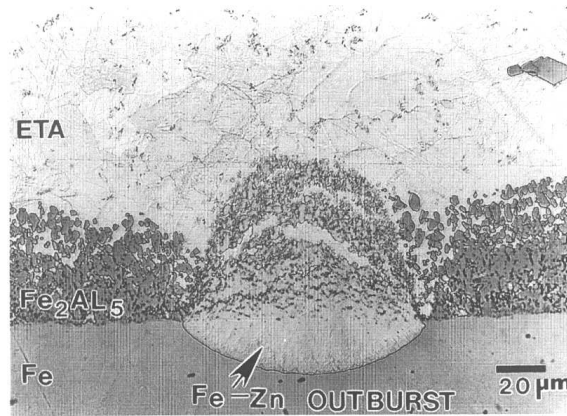
يوافق الزمن t_1 تشكّل الطور ζ على سطح العينة الفولاذية , والزمن t_2 تشكل الطور δ في المستوي الفاصل بين الطور ζ والفولاذ Fe _{α} . يظهر الطورين ζ و δ بسرعة فائقة في فترة زمنية لا تتعدى 5Sec من لحظة الغمس t_0 . تتشكل طبقة رقيقة Γ بعد زمن حضانة يقدر بـ 30 Sec في المستوي الفاصل بين الطور δ والفولاذ Fe _{α} . تشجع بنية الطور δ على ظهور إنكسارات في الطبقة التي يكونها هذا الأخير. ترفع هذه الإنكسارات من هشاشة الطبقة δ أولاً ثم طبقة الغلجنة كلها بتوسيع الإنكسارات إلى الطورين ζ و Γ . يمكن ظهور طبقتين تحتيتين لـ ζ إذا كان سائل الزنك مشبع بالحديد. يلاحظ عندئذ تشكل شوائب بالقرب من الطبقة الأولى لـ ζ .

3-3-2-5 طبقة المنع :

يكون كل من الحديد والألمنيوم والزنك طبقة رقيقة من مركب سبيكي ثلاثي بسبب التفاعل الجيد للألمنيوم والحديد. تسمى طبقة المركب السبيكي الثلاثي بطبقة المنع. تلعب هذه الطبقة دور حاجز يمنع إنتشار ذرات الزنك و الحديد لتشكيل المركبات السبيكية الثنائية Fe-Zn. تلف طبقة المنع Fe_2Al_5 بالزنك أثناء خروج العينة من حوض الغلفنة. تشكل طبقة المنع Fe_2Al_5 (حوالي 45% من الألمنيوم و 35% حديد و 20% زنك). يمكن أن نرْمُز لطبقة المنع بـ $Fe_2Al_5 Zn_x$ بدلاً من Fe_2Al_5 بسبب ذوبانية الزنك في هذه الطبقة. يعطي المركب السبيكي الثلاثي المتشكل بين الفولاذ وطبقة الغلفنة إلتصاق جيد بين هذين الأخيرين. يؤدي الإلتصاق الجيد بين الفولاذ وطبقة الغلفنة إلى تحسين عمليّات التشكيل اللاحقة بالرفع من قابلية تشوّه العينات دون فساد طبقة الغلفنة [65].

3-3-2-6 التفاعل (Outburst) :

تؤخر طبقة المنع التفاعل بين الحديد والزنك رغم سمكها الضئيل (بضع ميكرومترات). يبدأ ظهور تشققات وانكسارات في طبقة المنع بعد مدة زمنية تعرف بزمن الحضانة. تسمح هذه التشققات بمنوّ سريع يصعب التّحكم فيه للمركبات السبيكية Fe-Zn. يسمّى هذا النمو السّريع بـ (outburst). يمكن لهذه المركبات أن تخترق طبقة المنع $Fe_2Al_5 Zn_x$ إلى أن تصل إلى الفولاذ. يتمّ إتلاف طبقة المنع ذات السمك $5\mu m$ كليّة بعد زمن غمس يقدر بـ 30Sec في حوض زنك يحتوي 0.16% من الألمنيوم عند درجة حرارة $450^\circ C$. قد يؤثر إضافة الألمنيوم سلباً على عملية التلحيم نقطة بنقطة بتشجيع تكوّن الصدأ على طبقة الغلفنة.



الشكل (I-12) : ظاهرة (Outburst) بعد غلفنة عند $450^\circ C$

لمدة 1h في حوض يحتوي 0.2% وزناً من الألمنيوم [76]

7-2-3-3 معامل الانتشار :

يعبر عادة عن ظاهرة الانتشار بمعامل الانتشار D (يعطى بـ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). تحدث ظاهرة الانتشار نتيجة لحركة الذرات داخل الشبكات البلورية. يعطى معامل الانتشار على شكل معادلة Arrhenius كما يلي:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots \dots \dots (I - 25)$$

Q : طاقة النشاط .

D_0 : معامل التردد .

K : ثابت بولتزمان .

T : درجة الحرارة المطلقة .

ترتبط طاقة النشاط بنوع الذرات المنتشرة والشبكة البلورية التي يحدث فيها الانتشار. يمكن تعريف طاقة النشاط على أنها الحاجز الكموني الذي يجب أن تتخطاه ذرة لأجل الانتقال من موقعها الابتدائي إلى موقع مجاور في الشبكة البلورية. يرتبط معامل التردد D_0 بعدة عوامل فيزيائية تخص الشبكة البلورية (نوعية وطاقة الروابط الذرية وبطبيعة وتراكيز العيوب الموجودة في المعدن) [77]. يُعطى معامل انتشار حديد الفولاذ في سائل الزنك بدلالة درجة الحرارة بالعلاقة التالية [78] :

$$D_{Fe}^{Zn(L)} = 2 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{33600}{RT}\right) \dots \dots \dots (I - 26)$$

3-3-3 تأثير مختلف العوامل على عملية الغلفنة :

تتحكم نوعية الفولاذ والزنك ودرجة حرارة حوض الغلفنة وزمن الغمس وعملية التبريد في خصائص طبقة الغلفنة [79].

1-3-3-3 نوعية الفولاذ :

ترتبط خصائص التغطية الناتجة عن الغلفنة الساخنة (السمك والبنية المجهرية والخصائص الميكانيكية و المظهر) بالتركيب الكيميائي للفولاذ . تلعب نسبة الفوسفور و السليسيوم الموجودة في الفولاذ دور مهم في التفاعل بين الفولاذ والزنك. تصنف الفولاذ الموجهة للغلفنة إلى ثلاثة أقسام رئيسية حسب الاتفاقية NFA35-503 [80] مثلما يوضحه الجدول (I-2).

العنصر (%)	الصف I	الصف II	الصف III
Si	< 0.03	< 0.04	0.15 < Si < 0.25
Si+2.5P	< 0.090	< 0.110	< 0.325
P	-	-	< 0.040

الجدول (I-2) : تصنيف الفولاذ حسب تركيز السيليسيوم

والفوسفور الموجود بها [71]

يتميز الصف الأول والثاني من الفولاذ على الصف الثالث بتفاعل عادي مع الزنك ومظهر جميل وسماك موافق للاتفاقية NFEN iso 1461 المعمول بها. يتميز الصف الثالث من الفولاذ بتفاعل كبير مع الزنك وبسطح خشن لا يؤثر على الحماية ضد التآكل [71].

3-3-3-1 تأثير السيليسيوم :

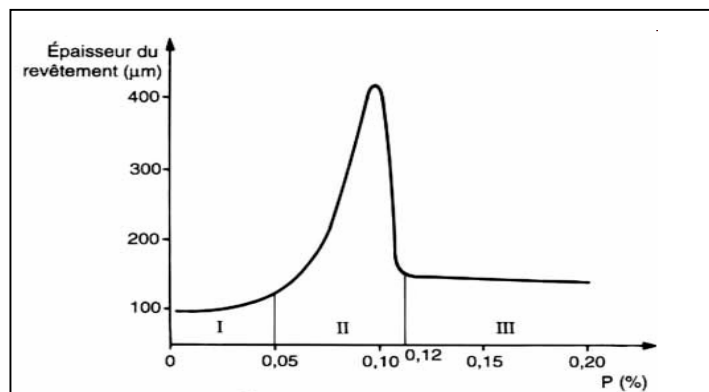
تتميز التغطية المحصل عليها بعد غلفنة الفولاذ التي تتجاوز نسبة الألمنيوم بها 0.1% بسماك كبير نسباً والتصاقية سيئة [81].

3-3-3-2 تأثير الكربون :

يسهل وجود الكربون من حدوث التفاعل بين الزنك والفولاذ. يلاحظ ارتفاع في سمك طبقة الغلفنة بوجود الكربون في الفولاذ.

3-3-3-3 تأثير الفوسفور :

تؤثر شوائب الفوسفور الموجودة في الفولاذ على التفاعل بين الفولاذ والزنك بالرغم من نسبتها الضئيلة. يتجمع الفوسفور في الحد الفاصل بين δ و γ محدثاً تشققات في الطور δ . يلعب الطور γ (أول طور متشكل في طبقة الغلفنة) دور الحاجز الذي يعزل الزنك السائل ودور المساعد على التفاعل بين الأطوار الصلبة المحصورة بين هذا الطور و سطح الفولاذ.



الشكل (I-13) : تأثير الفوسفور [14]

2-3-3-3 نوعية الزنك (حوض الغلجنة) :

تتطلب بعض الاستعمالات الخاصة للفولاذ المغلجنة إضافة عناصر معدنية أخرى إلى حوض الغلجنة مثل المنغنيز (Mg) والرصاص (Pb) والألمنيوم (Al) و التوتياء (Sn). يتم إضافة هذه العناصر حسب نوعية الزنك المستخدم (يستعمل عادة الزنك Zn_7).

1-2-3-3-3 تأثير الرصاص :

يغير إضافة الرصاص إلى حوض الغلجنة من المظهر الخارجي للتلغية. يسمح لسطح التغطية بالتجمد على شكل بلورات كبيرة ذات شكل زهري. تتكون هذه البلورات نتيجة التفاعل الاوتكتيكي عند $318^{\circ}C$. يشجع وجود القصدير (Sn) من جهته تشكل البلورات الزهرية الشكل في السطح وكذا ميوعة الحوض ولمعان التغطية. يلغي القصدير تماما دور الألمنيوم بمجرد تجاوز نسبته المقدار %0.1. يؤدي وجود القصدير إلى حدوث تفاعل اوتكتيكي بين الزنك و القصدير وظهور البلورات الزهرية العريضة [81].

2-2-3-3-3 تأثير النحاس :

تؤدي إضافة نسبة تتراوح بين %0.1 و %1 من النحاس إلى ارتفاع سمك طبقة الغلجنة وكذا مقاومة التآكل. يصعب النحاس من إمكانية تجمد الزنك و تكوين الأطوار عند تجاوز نسبته المقدار %1 [82].

3-2-3-3-3 تأثير الألمنيوم :

يلعب الألمنيوم دور هام في عملة الغلجنة بسبب المظهر الجيد الذي يعطيه لطبقة الغلجنة و تأثيره على سرعة التفاعل بين الزنك والفولاذ. يؤدي وجود نسبة من الألمنيوم محصورة بين %0.1 و %0.2 في حوض الغلجنة إلى تخفيض سرعة مهاجمة الزنك للفولاذ. تعطي سرعة التفاعل المنخفضة بين الزنك والفولاذ طبقات رقيقة جدا ومنتظمة من المركبات السبكية. يؤدي وجود هذه الطبقات الرقيقة من المركبات السبكية إلى التصاق جيد للتلغية مع الفولاذ [83]. يُستخدم الألمنيوم حديثا لأجل تخفيض أكسدة حوض الغلجنة بتشكيل طبقة من الألومين Al_2O_3 على سطح الحوض وتسهيل عمليات التشكيل اللاحقة بتحسين لدونة طبقة الغلجنة.

3-3-3-3 درجة حرارة حوض الغلجنة :

يجب أن يكون التسخين متجانس داخل حوض الغلجنة لأجل تفادي المناطق عالية التسخين. يتم تسخين حوض الغلجنة بالمقاومات الكهربائية أو الهواء الساخن أو المحارق الإشعاعية التي تستخدم الغاز الطبيعي و المازوت. يتم تنشيط اغلب التفاعلات الكيميائية الحادثة بين الفولاذ والزنك أثناء عملية الغلجنة حراريا. تفضل أثناء عملية الغلجنة درجة الحرارة المحصورة بين $445^{\circ}C$ و $460^{\circ}C$ لتجنب تكون الاكاسيد وكذا الميوعة الجيدة للزنك داخل حوض الغلجنة. تعتبر درجة الحرارة المحصورة بين $490^{\circ}C$ و $530^{\circ}C$

خطيرة جدا بسبب شدة التفاعل بين الفولاذ والزنك. تتكون في هذا المجال من درجة الحرارة تغطية سميكة وهشة [84].

3-3-3-4 زمن الغمس :

يرتبط زمن غمس العينات الفولاذية في حوض الغلفنة إلى حد كبير بسمك هذه العينات و شكلها. يجب أن تكون مدة الغمس كافية كي يحدث التبادل الحراري بين العينات و حوض الغلفنة. تسحب كمية من الزنك اقل أثناء خروج العينات من حوض الغلفنة كلما كان زمن الغمس أطول بسبب حدوث تفاعل تام بين الزنك و الفولاذ [85]. تعطى حركية نمو المركبات السببكية (الأطوار) Fe-Zn بإستخدام العلاقة التجريبية التالية:

$$y = Kt^n \dots\dots\dots(I - 27)$$

حيث :

y : سمك الطبقة التحتية لطور معين.

K : ثابت حركية النمو.

t : زمن التفاعل.

n : قرينة حركية النمو.

3-3-3-5 التبريد :

ترتبط الخصائص الميكانيكية وكذا مظهر العينة بعد الغلفنة الساخنة ارتباطا كبيرا بعملية التبريد. تجدر الإشارة إلى انه لم يلاحظ أي تأثير للتبريد على نسبة الحديد (Fe) الموجود في طبقة الغلفنة [86].

4-I الترميم و إعادة البلورة

1- الترميم :

تُعبّر ظاهرة الترميم عن التغييرات في البنية المجهرية للمواد قبل عملية إعادة البلورة. تؤدي هذه التغييرات إلى ترميم جزئي في الخصائص الميكانيكية قبل عملية التثويه. تتمثل عملية الترميم أساساً في تغيير البنية المجهرية للانخلاعات داخل البلور. تجدر الإشارة إلى أن ظاهرة الترميم تحدث أيضاً من أجل المواد غير مشوهة و تحتوي نسبة مرتفعة من العيوب النقطية. يمكن ترميم الخصائص البنيوية والميكانيكية لمواد خضعت لتأثير الإشعاعات أو للسقاية عند درجات حرارة مرتفعة بعد عمليات التلدين [87]. تتكون العيوب النقطية والخطية داخل المعادن أثناء عمليات التثويه بالإضافة إلى العيوب الموجودة سابقاً. ترتبط مختلف مراحل الترميم بنوعية المعدن ونقاوته و درجة حرارة التثويه و درجة حرارة التلدين و الطاقة المخزنة بعد عملية التثويه. تختفي آليات الترميم مباشرة بعد إختفاء البنية المجهرية الحبيبية الفرعية.

1-1 آليات الترميم :

1- هجرة الانخلاعات واختفاؤها :

يمكن أن تختفي الانخلاعات ذات إشارتين مختلفتين و موجودتين في نفس المستوي عن طريق الانزلاق نحو بعضهما البعض. تختفي الانخلاعات ذات شعاعي Burgers متعاكسين و موجودين في مستويين مختلفين عن طريق آلية صعود الانخلاعات أو عن طريق سلسلة من الإنزلاقات. تختفي الانخلاعات اللولبية عن طريق الإنزلاقات المتقاطعة Cross-slip. تنخفض كثافة الانخلاعات أحياناً أثناء عملية التثويه و تسمى بالترميم الديناميكي. يسمى انخلاعين متوازيين ولهما شعاع Burgers متعاكسين بالانخلاع القطبي. تعطى قوة الجذب بين انخلاعين ν متوازيين لهما إشارتين مختلفتين و يبعدان عن بعضهما بمسافة x بالعلاقة التالية [88]:

$$F = \frac{Gb^2}{2\pi x} \dots\dots\dots(I - 28)$$

حيث:

b: شعاع Burgers.

G: معامل القص.

تجدر الإشارة إلى تشابه حركية اختفاء الانخلاع القطبي الطرفي و القطبي المختلط لحركية اختفاء الانخلاع القطبي اللولبي. أعطى الباحث Li [88] كيفية تغير كثافة الانخلاعات أثناء عمليات الترميم كالتالي:

$$\frac{d\rho}{dt} = -C_1\rho^2 \dots\dots\dots(I - 29)$$

بالمكاملة تكون العلاقة (4-4) كالتالي:

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} = C_1 t \dots \dots \dots (I-30)$$

حيث:

ρ_0 : كثافة الانخلاعات الابتدائية.

ρ : كثافة الانخلاعات أثناء الترميم.

t : الزمن.

C_1 : ثابت.

2- ترتيب الانخلاعات في أشكال مستقرة :

⚡ شكل متعدد الأضلاع (Polygone) :

تكون الانخلاعات بعد التشويه ذات الإشارتين المتعاكستين غير متساويتين و بالتالي لا يمكن إلغاؤها عن طريق آلية الاختفاء. تترتب الانخلاعات التي لم يتم اختفاؤها أثناء عمليات التلدين في أشكال (بنى) ذات طاقة منخفضة. تكون هذه البنى المنتظمة ما يعرف بالحدود الحبيبية ذات الزوايا الصغيرة (LAGBs). أكد الباحث [89]Cahn تشكل هذا النوع من بنى الانخلاعات عند معدن وحيد البلورات وفق جملة انزلاق واحدة. تعطى طاقة الحد الحبيبي γ_s ذو زوايا انحراف θ صغيرة وفق علاقة Read et Shokley التالية:

$$\gamma_s = \gamma_0 \theta (A - \ln \theta) \dots \dots \dots (I-31)$$

حيث:

$$A = A + \ln \frac{b}{2\pi R_0} \quad \text{و} \quad \gamma_0 = \frac{Gb}{4\pi(1-\nu)}$$

b : شعاع Burgers.

ν : معامل بواسون.

G : معامل القص.

r_0 : نصف القطر قلب الانخلاع.

توضح العلاقة (4-7) أن الطاقة γ_s متناسبة طردا مع زاوية الانحراف θ . تجدر الإشارة إلى أنه يتطلب تشكيل الحدود الحبيبية ذات الزوايا الكبيرة طاقة أقل بعد انتهاء عملية الترميم.

﴿ تكوين الحبيبات الفرعية : ﴾

تكون بنية الانخلاعات المتشكلة أثناء التثويه وعملية التلدين في المواد متعددة البلورات معقدة جدا بسبب تداخل الانخلاعات ذات أشعة Burgers مختلفة. تترتب الانخلاعات بعد تشويه سبائك ذات طاقة عيوب التعبئة متوسطة أو مرتفعة على شكل بنية خلوية ثلاثية الابعاد. ينخفض عدد الانخلاعات داخل الخلايا بعد التلدين (الترميم). ترتبط حجم هذه الخلايا بنوعية المعدن ونسبة التثويه. تتحول الخلايا إلى حبيبات فرعية بظهور حدود حبيبية ذات زوايا صغيرة عن طريق اختفاء الانخلاعات و إعادة ترتيبها [90-91]. تساعد عدة عوامل على تكوين بنية حبيبية فرعية بدلا من بنية خلوية أثناء عملية التثويه وهي:

- طاقة عيوب تعبئة مرتفعة للمعدن.
- نسبة ضئيلة من العناصر السببكية.
- نسبة تشويه مرتفعة.
- درجة حرارة تشويه مرتفعة.

يرجع سبب عدم ظهور بنية حبيبية فرعية في المواد ذات طاقة عيوب تعبئة صغيرة مثل الفولاذ المقاوم للتآكل إلى حدوث إعادة البلورة قبل عملية الترميم. يساعد تجانس البنية المشوهة على ظهور الترميم و تكوين البنية الحبيبية الفرعية بدلا من عملية التنوي التي تخص إعادة البلورة [92].

1-2 حركية الترميم :

وجدت عدة علاقات تجريبية تربط بين الخاصية X_R (إحدى الخواص التي تتأثر بعملية الترميم) و الزمن t أثناء عملية الترميم. يستخدم عادة نوعين من العلاقات لوصف حركية إعادة البلورة عند درجة حرارة ثابتة .

- النوع الأول:

$$\frac{dX_R}{dt} = -\frac{C_1}{t} \dots \dots \dots (I-32)$$

بمكاملة العلاقة (4-15) نجد:

$$X_R = C_2 - Lnt \dots \dots \dots (I-33)$$

حيث:

C_1 و C_2 : ثابتان.

- النوع الثاني:

$$\frac{dX_R}{dt} = -C_1 X_R^m \dots \dots \dots (I-34)$$

بمكاملة العلاقة (4-17) نجد من اجل $m > 1$:

$$X_R^{-(m-1)} - X_0^{-(m-1)} = (m-1)C_1t.....(I-35)$$

ومن أجل $m = 1$:

$$\ln(X_R) - \ln(X_0) = C_1t.....(I-36)$$

1-3 العوامل المؤثرة على الترميم :

1- الاجهادات :

أكد الباحثان Masinge و raffelisieper [93] انه لا يمكن حدوث ترميم كلي في المواد متعددة البلورات ذات نسب تشويه مرتفعة. يمكن إعادة ترميم كلي لوحيد البلورة للمعادن ذات البنية المجهرية CC المشوهة وفق مستوي انزلاق بسيط [94]. ترتفع سرعة التغير في الخصائص الميكانيكية التي يتم ترميمها أثناء عمليات التلدين عند درجة حرارة ثابتة مع ارتفاع نسبة التشوه [95].

2- درجة الحرارة :

يكون الترميم تام بعد عمليات التلدين عند درجات الحرارة المرتفعة. تجدر الإشارة إلى عدم تكوين ترسبات التي تعيق عملية الترميم و إعادة البلورة عند درجات الحرارة المرتفعة [94].

3- البنية المجهرية :

تعتبر طاقة عيوب التعبئة أهم العوامل التي تتحكم في آلية صعود الانخلاعات وتفككها وبالتالي في ظاهرة الترميم. يحدث ترميم صغير لبنية الانخلاعات قبل مرحلة إعادة البلورة في المعادن ذات طاقة عيوب التعبئة γ_{SFE} بينما يكون الترميم سريعاً جداً في المعادن ذات طاقة عيوب التعبئة γ_{SFE} معتبرة. تؤثر الإذابة الصلبة على عملية الترميم بعرقلة حركة الانخلاعات و تغيير حركية أماكن الذرات الشاغرة الموجودة في البنية المجهرية.

4- وجود طور ثاني :

يكون تأثير الترسبات على عملية الترميم في مراحلها الأولى (هجرة الانخلاعات واختفاؤها) ضعيف. يظهر تأثير الترسبات على عملية الترميم في مرحلة نمو الحبيبات الفرعية. أكدت الدراسات التي أجراها Hansen [96] عرقلة الترسبات لحركة الانخلاعات الفردية.

2 إعادة البلورة :

أجريت دراسات موسعة جداً حول إعادة البلورة الأولية من طرف عدة باحثين [97]. تتم إعادة البلورة عن طريق آليتي التئوي والنمو المنشطتين حرارياً. تؤدي الطاقة المخزنة داخل البلور بعد عمليات التشويه إلى ظهور القوة المحركة اللازمة لحدوث ظاهرتي التئوي والنمو.

1-2 التئوي :

➤ نماذج التئوي :

تعتبر آلية التئوي عامل أساسي في تحديد حجم وإتجاهات الحبيبات بعد عملية إعادة البلورة. توجد ثلاثة نماذج أساسية للتئوي.

1- التئوي الكلاسيكي :

تم استخدام نموذج التئوي الكلاسيكي الخاصة بالتحويلات الطورية وتطبيقها على آليات إعادة البلورة من طرف Burke و Turnbull [98]. تؤدي التغيرات العشوائية للذرات إلى تكوين نويات صغيرة في الحدود الحبيبية ذات الزوايا المعتبرة. تتكون نويات مستقرة عندما يكون الفرق في الطاقة بين الحالة المشوهة و المعاد بلورتها في منطقة تكون النويات أكبر من الطاقة السطحية اللازمة لتكوين النوي. يكون القطر الحدي اللازم لنمو النوي هو $0.1\mu\text{m}$. إستنتج الباحث Christian [99] أنه لا يمكن استخدام نموذج التئوي الكلاسيكي لوصف المراحل الأولى لإعادة البلورة بسبب صغر سرعة التئوي.

2- نموذج هجرة الحدود الحبيبية بالتحريض الاجهادي :

تم اقتراح هذا النموذج من طرف الباحثان Beck و Sperry [100] حيث لوحظ في عدة مواد. يتميز الحد الحبيبي في هذا النموذج بانحناء سطحه في منطقة معينة. يترك الحد الحبيبي بعد هجرته منطقة خالية من الانخلاعات. تمتلك الحبيبات الجديدة المعاد بلورتها اتجاهات مشابهة لاتجاهات الحبيبات السابقة التي نمت انطلاقاً منها. تظهر الآلية (SIBM) خاصة من أجل نسب تشويه منخفضة. تتم إعادة بلورة الفولاذ بعد التشويه عند درجة حرارة مرتفعة بالية (SIBM) في حالة وجود بنية مجهرية متجانسة بالمقارنة مع بنية مجهرية لفولاذ مشوه على البارد.

3- نموذج التئوي الموجه :

تحدث ظاهرة إعادة البلورة في الكثير من الحالات في المناطق التي لا يوجد بها حدود حبيبية ذات الزوايا الكبيرة. افترض الباحث Burgers [101] إمكانية حدوث إعادة البلورة بسبب وجود نويات صغيرة داخل المعدن المشوه. تكون النويات الخاضعة إلى اجهادات داخلية ممددة باتجاهات معينة. أكدت الدراسات الحديثة أن إعادة البلورة ناتجة عن خلايا الانخلاعات أو الحبيبات الفرعية المتكونة بعد عملية التشويه. يعتبر الباحث Huange [102] الوحيد الذي وجد اتجاهات للنويات المتشكلة مختلفة عن اتجاهات نسيج التشوه. تكون عملية إعادة البلورة معتبرة في البنية المجهرية الفرعية التي يوجد بها تدرج كبير في الاتجاهات.

2-2 حركية إعادة البلورة :

تم دراسة حركية إعادة البلورة والتي تمثل عمليات التئوي والنمو في البلور من طرف Kolmogorove [103] و Johnson و Mehl [104] و Avrami [105]. تعرف هذه الدراسات اختصاراً بنموذج (JMAK). يفترض نموذج (JMAK) أن سرعة التئوي هي \dot{N} و سرعة النمو \dot{G} . تتخفف سرعة إعادة البلورة عندما تبدأ الحبيبات المعاد بلورتها تلامس بعضها البعض إلى أن تنعدم سرعة إعادة البلورة

عندما تبلغ نسبة الطور المعاد بلورته (X_v) الواحد. يكون عدد النويات المتشكلة (dN) في مجال زمني dt اقل من $\dot{N} dt$ لان النويات لا يمكنها التشكل في المواقع التي تم إعادة بلورتها. يقدر عدد النويات المتشكلة في حجم معاد بلورته بـ $\dot{N} X_v dt$. يعطى إذن عدد النويات الكلي المتشكل بالعلاقة التالية:

$$dN = \dot{N} dt = dN + \dot{N} X_v dt \dots \dots \dots (I-37)$$

تعطى نسبة الطور المعاد بلورته (X_v) بدلالة الزمن t بالعلاقة التالية [105]:

$$X_v(t) = 1 - \exp(-kt^n) \dots \dots \dots (I-38)$$

حيث:

$$k = \frac{f \dot{N} \dot{G}}{4}$$

معامل يتعلق بدرجة الحرارة.

$$f : \text{معامل الشكل (يساوي } \frac{4\pi}{3} \text{ من اجل الأشكال الكروية).}$$

n : هو مقدار ثابت , يتغير من 1 الى 4.

يتم تحديد معاملا JMAK (n و k) باستخدام العلاقة (I-37) كما يلي:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - X_v} = \ln k + n \ln t \dots \dots \dots (I-39)$$

بوضع :

$$\begin{cases} X = \ln t \\ Y = \ln \ln \left(\frac{1}{1 - X_v} \right) \end{cases}$$

تكون المعادلة (I-38) على الشكل الموالي:

$$Y = nX + \ln k \dots \dots \dots (I-40)$$

تجدر الإشارة إلى أن معامل Avrami (n) يساوي 4 عند افتراض أن سرعة التئوي والنمو ثابتين أثناء إعادة البلورة. وجد Avrami [105] أن المعامل n يتغير بين القيمتين 3 و4 عند اعتبار سرعة التئوي دالة متناقصة مع الزمن. افترض نموذج (JMAK) أن نمو الحبيبات يكون متناظر بالنسبة للأبعاد الثلاثة. تجدر الإشارة إلى اعتبار مواقع التئوي داخل البنية الجهرية ذات توزيع عشوائي في نموذج (JMAK).

2-3 العوامل المؤثرة على إعادة البلورة :

توجد عدة عوامل مؤثرة على إعادة البلورة تخص البنية المجهرية للعينات و المعالجات الحرارية. تعتبر العوامل الآتية أهم العوامل المؤثرة على سرعة إعادة البلورة:

1- نسبة التشوه :

تؤثر نسبة التشوه على (نسبة) أو سرعة إعادة البلورة بسبب تغير مقدار الطاقة المخزنة وعدد النويات الفعالة. تكون مواقع التئوي المفضلة مرتبطة بنسبة التشوه. تقدر نسبة التشوه الحدية التي لا يمكن حدوث إعادة البلورة الأولية ادني منها ب 1 إلى 3%. ترتفع سرعة إعادة البلورة أعلى من هاتين القيمتين.

2- اتجاهات الحبيبات :

ترتبط سرعة ونسبة إعادة البلورة التامة في المواد متعددة البلورات بالنسيج البلوري الابتدائي ونسيج التشوه النهائي. أكد الباحثان Hitchinson و Ryde [106] ارتباط الطاقة المخزنة بعد التشويه داخل بلور الحديد بالاتجاهات البلورية للحبيبات. وجد الباحثان Morris و Blade [107] أن اختلاف النسيج البلوري بعد عملية الدرفلة يؤدي إلى الاختلاف في حركية إعادة البلورة الأولية بعد التلدين.

3- الحدود الحبيبية :

تؤثر الحدود الحبيبية ذات الزوايا و الحركية الصغيرتين على نمو الحبيبات عندما تتلاقى الحبيبات المعاد بلورتها مع حبيبات مشوهة لها اتجاهات مشابهة كالتالي [108].

- ظهور إعادة بلورة غير متجانسة.
- يمكن لمركبات النسيج البلوري ذات نفس النوع أن تعاد بلورتها بطريقة مختلفة.
- يؤدي التوزيع الحجمي لاتجاهات الحبيبات إلى تغيير خصائص توزيع حدود الحبيبات و بالتالي تغيير عملية نمو وتئوي الحبيبات.

4- الحجم الحبيبي الابتدائي :

تتم إعادة بلورة العينات ذات الحبيبات الصغيرة عادة أسرع من العينات ذات الحبيبات الكبيرة. يؤثر الحجم الحبيبي على إعادة البلورة كالتالي:

- ترتفع الطاقة المخزنة لمعدن ذو نسبة تشويه صغيرة كلما انخفضت قيمة الحجم الحبيبي الابتدائي.
- يتم تشكيل شرائط القص التي تعتبر مواقع مفضلة للتئوي والتشوه بسهولة في البنى المجهرية ذات الحجوم الحبيبية الكبيرة [109].
- ترتفع عدد الحدود الحبيبية التي تعتبر مواقع مفضلة للتئوي كلما انخفضت قيمة الحجم الحبيبي.
- تتغير إعادة البلورة تبعاً لنسيج التشوه وقيمة الحجم الحبيبي الابتدائي.

5- الشوائب :

يعرقل إضافة العناصر السببكية إلى البنية المجهرية حركية إعادة البلورة [110]. يرفع مثلاً إضافة نسبة ضئيلة من الحديد والألمنيوم إلى سبائك الألمنيوم درجة حرارة إعادة البلورة ب 100°C [111]. يكون التأثير الرئيسي للترسبات على حركية الحدود الحبيبية أي على نسبة نمو الحبيبات المعاد بلورتها.

6- درجة حرارة :

يظهر ترميم البنية المجهرية بصفة متزامنة مع التشويه عند درجات حرارة مرتفعة بطريقة مشابهة لظهور الانخلاعات أثناء عمليات التشويه. تنخفض الطاقة المخزنة عند التشويه عند درجات حرارة مرتفعة مما يصعب عمليات إعادة البلورة بالمقارنة مع التشويه عند درجات حرارة منخفضة.

7- شروط التلدين :

❖ **درجة حرارة التلدين:** تؤثر درجة الحرارة بطريقة رئيسية على إعادة البلورة الأولية.

تعطى العلاقة التي تربط بين درجة الحرارة (T) وزمن إعادة بلورة 50% ($t_{0.5}$) من المادة

المشوهة كالتالي [112]:

$$\frac{1}{t_{0.5}} = C \exp\left(-\frac{Q_{rec}}{RT_{rec}}\right) \dots \dots \dots (I-41)$$

Q_{rec} : طاقة النشاط.

T_{rec} : درجة حرارة التلدين.

$R = 8.314 J / mol.K$: ثابت الغازات المثالية.

C: ثابت.

يمكن حساب طاقة النشاط بكتابة العلاقة (I-38) على الشكل الموالي:

$$\ln \frac{1}{t_{0.5}} = \ln C - \frac{Q_{rec}}{R} \cdot \frac{1}{T_{rec}} \dots \dots \dots (I-42)$$

العلاقة (I-39) عبارة عن معادلة مستقيم ميله $\frac{Q_{rec}}{R}$.

❖ سرعة التسخين :

يمكن أن تؤثر سرعة التسخين العينة على درجة حرارة إعادة البلورة. يمكن تفاعل بعض الظواهر الأخرى على البنية المجهرية أثناء إعادة البلورة.

• التأثير على عمليات الترميم وإعادة البلورة الأولية :

يتم تأثير عمليات إعادة البلورة في حالة ارتفاع نسبة الترميم أثناء التسخين البطيء. ترتفع نسبة الترميم عند تسخين العينات بسرعة منخفضة عندما تكون طاقة نشاط الترميم أقل من طاقة نشاط إعادة البلورة الأولية.

• ظهور بعض التحولات الطورية :

تظهر بعض الترسبات في البنية المجهرية في حالة التسخين العينات بسرعة منخفضة أثناء عمليات التلدين قبل بداية إعادة البلورة. يؤدي التسخين السريع إلى إتمام إعادة البلورة قبل ظهور أي ترسبات في البنية

المجهرية. وجد الباحث Bowen [113] أن التسخين السريع لسبائك Al-Li و Al-Zn-Mg يسرع عملية إعادة البلورة. تؤدي سرعة التسخين المرتفعة إلى تباطؤ حركية إعادة البلورة في الفولاذ. تحدد سرعة التسخين في هذه الحالة نسبة الكربون داخل الفولاذ والذي يعرقل حركية إعادة البلورة.

4-2 النمو :

تعتبر آلية نمو الحبيبات بسيطة مقارنة مع إعادة البلورة الأولية. يعتبر الباحثان Burke و Turnbull [98] أول من اهتم بالدراسة النظرية لنمو الحبيبات. يمكن كتابة المعادلتين المعبرتين عن حركية النمو حسب نموذج Burke و Turnbull كالتالي [98]:

$$R^n - R_0^n = C_2 t \dots \dots \dots (I - 43)$$

$$R = C_2 t^{\frac{1}{n}} \dots \dots \dots (I - 44)$$

حيث:

t: الزمن.

R: الحجم الحبيبي عند زمن t.

R₀: الحجم الحبيبي عند نهاية إعادة البلورة.

C₂: ثابت.

تم أخذ المعامل n في نموذج Burke و Turnbull مساويا إلى 2.

يتغير المعامل n بتغير التركيب الكيميائي و درجة الحرارة. لوحظ انخفاض قيمة n عند درجات الحرارة المرتفعة خاصة من اجل المعادن ذات النقاوة العالية [114]. أكدت كثير من الأبحاث التي أجريت على عدة معادن لا تتجاوز نسبة الشوائب بها بضع PPM تغير قيمة n بين 2 و 4 [115]. يرجع سبب اختلاف القيمة التجريبية لـ n عن القيمة النظرية إلى وجود علاقة غير خطية في بعض الشروط بين حركية و سرعة الحدود الحبيبية.

II- التقنيات

يستخدم الفولاذ اللين في الصناعة بشكل واسع وذلك لتمنّعه بقابليّة عالية للتشكيل كصناعة الأسلاك. إذن من المهمّ جدًّا معرفة بنيته قبل وبعد عملية التشكيل. أُستعملت في هذه الدراسة العديد من التقنيات منها المعالجات الحرارية و التجارب الميكانيكية والفحص المجهرى الضوئي والالكتروني .

1- الفولاذ :

المادّة المدروسة عبارة عن أسلاك من الفولاذ اللين . تقوم شركة TRIFISOU - بالعلمة (سطيف) - بإستزاده على شكل قضبان ذات قطر ($\phi = 5.5mm$). ثم تصنع منه أسلاك بمختلف الأقطار : 2.4mm و 2.7mm و 3mm وذلك حسب طلب الزبائن. تخضع هذه الأسلاك بعد صناعتها إلى عملية الغلفنة لحمايتها من الأكسدة. تستعمل الأسلاك في العديد من المجالات منها : صناعة السيّاج الفولاذي , الرّبط , إلكتروود التلحيم.....إلخ. تعاني بعض مناطق الأسلاك أثناء التصنيع والإستعمال من الإنكسارات مما يتطلّب تلحيمها . يحتوي الفولاذ على نسبة ضئيلة من الكربون ويُعتبر المنغنيز (Mn) من أهمّ عناصره السبائكية. يعطى التركيب الكيميائي للفولاذ المستورد في الجدول (II-1) .

العنصر	C	Mn	Si	P	S
تركيز وزني (%)	0.070	0.450	0.080	0.012	0.007

الجدول (II-1): التركيب الكيميائي للفولاذ المدروس

2- المعالجات الحرارية للتّدين :

أستعمل فرن كهربائي نوع Adamel L'homergy DI 24 مُبرمج ومزوّد بمزدوج حراري دقته $\pm 1^\circ C$. تصل درجة حرارته العظمى إلى $1600^\circ C$. يُبرمج هذا الفرن على مرحلتين :

- المرحلة الأولى : يتمّ تثبيت درجة الحرارة المُختارة.
- المرحلة الثانية : تحدد الفترة الزمنية المُرادّة , توضع بعد ذلك العينات داخل الفرن. تُستخرج هذه العينات من الفرن عند نهاية المرحلة الثانية وتبرد عن طريق السقاية في الماء . يمكن لهذا الفرن أن يقوم بالتبريد المدرج لعدة مرات متتالية.

إن درجة حرارة التلدين المُختارة لهذه الدراسة لا تتعدى $570^\circ C$ أمّا زمن التلدين فهو يتراوح بين 8min و 33 يوم.

3- التجارب الميكانيكية :

تتمثل التجارب الميكانيكية في اختبار الصلادة وكذلك اختبار الشد للعينات في الحالة الإبتدائية (أي قبل الغلغنة) وبعد غلغنة الأسلاك.

1-3 اختبار الصلادة :

يُعبّر اختبار الصلادة عن مدى مقاومة السطح لتوغل الأجسام الصلبة. أستعمل اختبار Vickers لقياس الصلادة المجهرية للفولاذ بواسطة جهاز من نوع LEITZ -LER 6844-GERMANY. الجهاز مزود بعدسة ضوئية تكبيرها X40. تسمح هذه العدسة بقياس قطر الأثر الماسي (d) بدقة عالية مقدارها $\Delta d=0.25\mu m$. يتم قياس قطر الأثر الهرمي (d) عندما يتوغل هذا الأخير داخل العينة تحت تأثير الحمولة (p) المطبقة لمدة زمنية مقدارها 15 ثانية. يُعبّر عن قيمة صلادة Vichers (H_v) بالعلاقة التالية :

$$H_v = 1854.4 \frac{P}{d_1 d_2} \dots \dots \dots (II - 1)$$

حيث يُعطى :

d_1 و d_2 : بالميكرومتر

p : بالغرام .

H_v : بـ Kgf/mm^2

وُجد أنّ الحمولة $P=1kg$ مناسبة جدًا لقياس الصلادة المتوسطة للفولاذ وتم ذلك الاختبار بعد إجراء تجارب لدراسة تأثير تغيير الحمولة على صلادة الفولاذ. قُدّرت النسبة العظمى للخطأ بـ $\Delta H_v/H_v=0.5\%$ وتم حسابها كما يلي :

مثال :

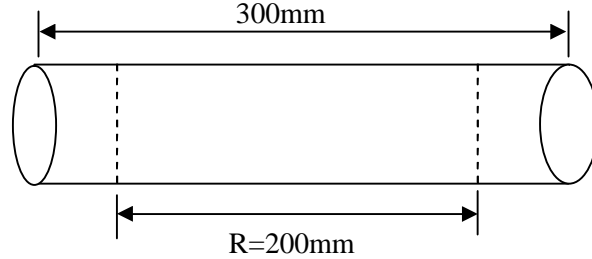
من اجل : $\Delta d_1 = \Delta d_2 = 0.25\mu m$ و $d_1 = 104.26 \mu m$ و $d_2 = 102.24 \mu m$ (كقيمتين عظيمين في هذه الدراسة) .

$$\left(\frac{\Delta H_v}{H_v} \right)_{\max} = 0.5\% \quad \text{تكون النسبة العظمى للخطأ :}$$

2-3 تجربة الشد :

أستخدم جهاز من نوع Zwick-Roell ذو حمولة قصوى تُقدر بـ 250KN. هذا الجهاز مجهز بحاسوب يضبط سرعة التشوّه (V). يمكن رسم منحنى تغيير الإجهاد (σ) بدلالة التشوّه (ϵ). كل

العَيّنات الخاضعة للتّجربة عبارة عن أسلاك أسطوانية ذات طول عياري $L=300\text{mm}$ وأقطار مختلفة. يُعبر الطول ($R=200\text{mm}$) عن الطول الفعال الذي يخضع للشد (انظر الشكل II-1).



الشكل (II-1) : أبعاد العينة الموجهة لإختبار الشدّ

4- تجارب الفحص المجهرى :

1-4 تحضير العيّنات للفحص المجهرى :

يجب تحضير سطح العيّنات المغلّفة وغير المغلّفة للفحص المجهرى. يمرُّ التحضير بالعديد من المراحل أهمها :

1-1-4 الصّقل :

يُستخدم الورق الكاشط للصّقل الميكانيكي الخشن. يتكوّن هذا الورق أساساً من حبيبات كربونات السّلسيوم (Si). يُستعمل الورق الكاشط تدريجياً من الرّقم الصناعى 120 إلى 1200. يسمح الصقل بالتّحسّن التدريجى لإستواء السّطح. يُتبع الصّقل الخشن بصقل ميكانيكى ناعم حيث يُستخدم فيه الألومين (Al_2O_3) الذي سبق تخميره في الماء لـ 3 ساعات و 12 ساعة و 24 ساعة. يكون سطح العينة عند نهاية الصقل الخشن والناعم شبيه بمرآة.

2-1-4 التّتميش :

إنّ الفحص المجهرى لسطح العيّنات المصقولة لا يوضّح حدود حبيبات المكوّنات الطورية , لذا يُستخدم محلول كيميائى لتتميش سطح العيّنات. يحتوي المحلول الكيميائى المستعمل على 2% من حمض النّترىك و 98% من كحول الإيثانول. وهو محلول حمضى يعرف بإسم النّيتال ($Nital$). يُستعمل محلول النّيتال و الذي يحتوي 3% من حمض النّترىك , لفحص العيّنات الموجهة للمجهر الإلكتروني الماسح. تجدر الإشارة هنا إلى أن الفترة الزمنية اللازمة لغمس سطح العيّنات في محلول التتميش غير ثابتة و تتغير مع نوع العيّنات والمجهر المستعمل.

2-4 المجهر الضوئى :

أستعمل المجهر الضوئى نوع ZEISS , وهو مُزوّد ببرنامج خاصّ Axion-vision وآلة تصوير

رقمية لفحص البنية المجهرية للعينات. يتم نقل الصورة على شاشة الحاسوب حيث يقوم البرنامج السالف الذكر بمعالجتها. لهذا الجهاز أربعة أنظمة عدسية ذات تكبيرات 50X و 200X و 500X و 1000X .

3-4 قياس الحجم الحبيبي :

سمحت لنا طريقة أبرامس [116] بحساب الحجم الحبيبي المتوسط للطور الفريتي للحالة الابتدائية والحالة المغلقة. تتمثل هذه الطريقة في رسم ثلاثة دوائر موحدة المركز , مجموع محيطاتها 500 mm , تكون الأبعاد بين هذه الدوائر الثلاثة متساوية وتساوي 13.26mm. يُحسب عدد تقاطعات محيط الدوائر مع حدود الحبيبات. يجب أن يكون مجموع عدد التقاطعات مع محيط الدوائر الثلاث محصور بين 70 و 150. تُستعمل خمسة حقول مختلفة لحساب في النهاية عدد التقاطعات المتوسط (N_{moy}). يُعطى الحجم الحبيبي المتوسط بالعلاقة التالية :

$$d(mm) = \frac{500}{Mag \times N_{moy}} \dots\dots\dots(II - 2)$$

حيث :

Mag : التكبير المُستعمل وثبتت في هذه الدراسة عند 500X .

d(mm) : الحجم الحبيبي المتوسط و يعطى بالمليمتر.

يحسب الخطأ النسبي لقياس الحجم الحبيبي المتوسط كما يلي :

مثال :

إذا كانت عدد التقاطعات للخمسة حقول هي : 97 و 92 و 96 و 88 و 82 ومنه $N_{moy} = 91$.

بتطبيق العلاقة (II -2) نجد أن : $d=10.98.10^{-3}mm = 10.98 \mu m$

بالاعتماد على المرجع [116] يكون : $\Delta d=0.8 \mu m$. وبالتالي تقدر النسبة العظمى للخطأ بـ

$$\Delta d/d=8\%$$

4-4 قياس النسبة الحجمية الطورية :

أستعمل برنامج Axio-vision لحساب نسبة الطور المُعاد بلورته , وكذا نسبة البرليت الموجودة في العينة الابتدائية. تُستعمل خمسة حقول مختلفة . تُعطى النسبة الطورية بالعلاقة التالية :

$$X_v \% = \frac{S_{ph}}{S_{im}} 100 \dots\dots\dots(II - 3)$$

حيث :

$S_{ph}(\mu m^2)$: المساحة المشغولة من طرف الطور المُراد قياس نسبته.

$S_{im}(\mu m^2)$: المساحة الكلية للصورة المختارة (الحقل المُختار).

يجب الإشارة هنا إلى أن هذا البرنامج يعطي مباشرة الخطأ المطلق لمساحة الصورة و هو $\Delta S_{im} = \Delta S_{ph} = 0.5 \mu m^2$

تم حساب الخطأ لـ X_v النسبي كما يلي :
مثال :

من اجل : $S_{im} = 7752 \mu m^2$ و $S_{ph} = 965 \mu m^2$.
يكون الخطأ النسبي % $\Delta X_v / X_v = 0.06$ وهو ضعيف .

4-5 المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) :

أستخدم جهاز المسح الإلكتروني من النوع VEGA TS 5130 MM. يتمتع الجهاز بإستطاعة تكبير عالية 50K , وهو من إنتاج الشركة التشيكية (TESCAN). هذا الجهاز مزود بنظام تحليل بواسطة الأشعة X يعتمد على تشتيت الطاقة (EDX). يسمح لنا بالتحليل الكيميائي النوعي والكمي لمختلف الأطوار و الترسيبات . سمح هذا الجهاز بتحديد شكل وتوزع الترسيبات والبنية المجهرية للأطوار. حدد هذا الجهاز بدقة شكل طبقة الغلفنة وسُمكها وكذا نوعيّة الإنكسارات الموجودة في هذه الطبقة .

5- صناعة الأسلاك :

يُمثل الشكل (II-2) نموذج تخطيطي لصناعة الأسلاك. الآلة من نوع BREITENBACH stander type 1R/4ZV مضبوطة بسرعة سحب السلك عند الدُخول تُقدر بـ 7m/sec وعند الخروج 9m/sec . تتكوّن هذه الآلة من ثلاثة قطع رئيسيّة :

- 1- أسطوانة الدُخول : يُلف حول هذه الأسطوانة السلك الابتدائي ذي المقطع $(S_i = 5.5mm)$.
- 2- مخروط العمل (ال قالب) : مخروطي الشكل يتكون سطحه الداخلي من مادة قاسية جدا. يقوم بتشويه السلك الذي يمر بداخله وتخفيض مقطعه إلى المقطع المناسب (S_f) . يتم ذلك بتطبيق مجموعة من قوى الشد والسحب في آن واحد على السلك الداخل مما يؤدي إلى رفع درجة حرارته [117]. يستعمل صابون التزيت لتخفيض درجة حرارته وكذلك لتسهيل عملية السحب.
- 3- أسطوانة الخروج : يلولب حولها السلك ذو المقطع النهائي (S_f) الذي يوجّه إلى المستودع أو إلى عملية الغلفنة.

يجمع الجدول (II-2) القطر الابتدائي للأسلاك $\Phi(mm)$ ونسبة التشويه الموافقة $\tau_w(\%)$ وتم حسابها بالاعتماد على العلاقة التالية :

$$\tau_w = \frac{S_i - S_f}{S_i} 100 \dots \dots \dots (II - 4)$$

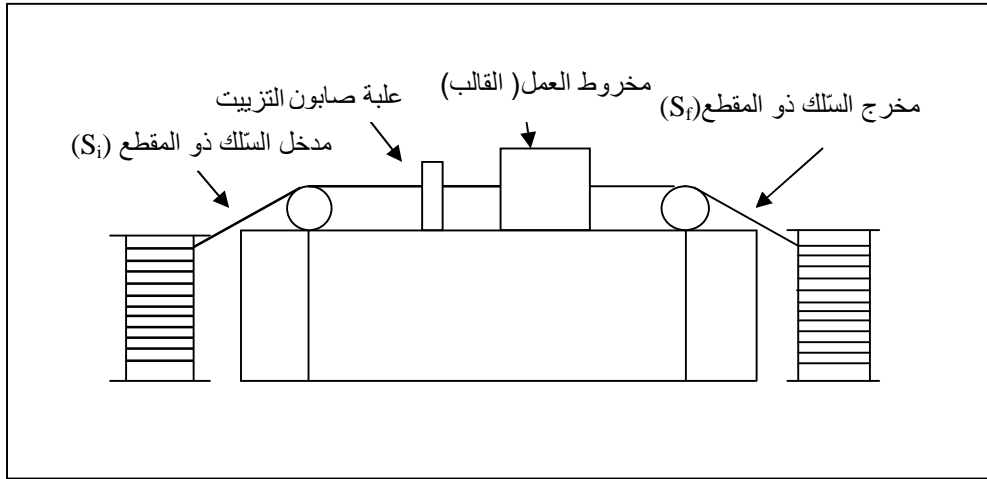
حيث :

S_i : المقطع الابتدائي للسلك.

S_f : المقطع النهائي للسلك.

$\Phi(\text{mm})$	5.5	3	2.7	2.4
$T_w(\%)$	0	70	76	81

الجدول (II-2) : نسبة تشوّه الأسلاك



الشكل (II-2) : رسم تخطيطي لجهاز صناعة الأسلاك

6- آلية الغلّفة في "TRIFISOUD" :

تُستعمل الغلّفة لحماية الأسلاك من التآكل والصدأ بالإضافة إلى مظهرها الخارجي اللامع. تستخدم في مصنع (Trifisoud) آلية الغلّفة المستمرة على الساخن ذات التركيبة الألمانية نوع Mohal &Co الشكل (II-3). تتميز الأسلاك المغلّفة بخصائص ميكانيكية مناسبة للعمل . تمرّ آلية الغلّفة على الساخن بالمراحل التالية :

1-6 تحضير سطح الأسلاك :

يُنظف سطح الأسلاك قبل إدخالها في الحوض الزنكي جيداً للحصول على أحسن غلّفة ممكنة كما يوضحه الشكل (II-3) ويمرّ التنظيف بالمرحلتين التاليتين :

- المرحلة (a) :

أولاً : تغمس الأسلاك في حوض يحتوي على محلول الصّودا (NaOH) , تتراوح درجة حرارته بين 60°C و 80°C .

ثانياً : يتمّ نزع الزيوت الموجودة على سطح الأسلاك (الآتية من عملية السحب عند تشويهاها) بواسطة الغسيل في الماء.

ثالثًا : تعالج الأسلاك حرارياً. تتمثل المعالجة الحرارية في تسخين الأسلاك عند درجة حرارة 850°C . تعمل درجة الحرارة المرتفعة على نزع بقايا الزيوت بعملية التبخير.

رابعًا : تبرّد الأسلاك بواسطة الماء درجة حرارته (25°C) تبريداً بطيئاً حيث يكون حوض ماء التبريد بعيداً نوعاً ما عن مخرج الأسلاك من الفرن.

- المرحلة (b) :

أولاً : تمرّ الأسلاك بعدها في حوض لمحلول حمض كلور الماء (HCL) حيث يتمّ خلالها نزع الكالسيوم وكل الأكاسيد الأخرى الناتجة عن عملية التبريد بواسطة الماء.

ثانياً : تمرّ الأسلاك بعد ذلك بمعالجة كيميائية بواسطة محلول كلوريد الزنك (ZnCl_2) وكلوريد الأمونيوم (NH_4Cl) ذو درجة حرارة 60°C وذلك لتجنّب إعادة تكوين أكسدة على سطوح الأسلاك. تخضع الأسلاك في النهاية لعملية التجفيف في فرن درجة حرارته 100°C .

2-6 حوض الزنك :

تكون الأسلاك جاهزة تماماً بعد المرحلة الأولى لأجل إجراء عملية الغلفنة. تتطلب عملية الغلفنة غمس الأسلاك في حوض يحتوي على زنك (Zn) في الحالة السائلة درجة حرارته 450°C لمدة زمنية معينة الجدول (II-3). تكون نتيجته تكوين طبقة الغلفنة فوق سطح الأسلاك. يتم توغل السلك داخل الحوض بسرعة متغيرة وفق قطر السلك المراد غلفنته الجدول (II-3). يتكون حوض الغلفنة أساساً من الزنك 99.9% . بالإضافة إلى وجود بعض العناصر الأخرى بنسب ضئيلة جداً , مثل الحديد بنسبة 0.05% والتوتياء (Sn) بنسبة 0.025% والرصاص (pb) بنسبة 0.025% .

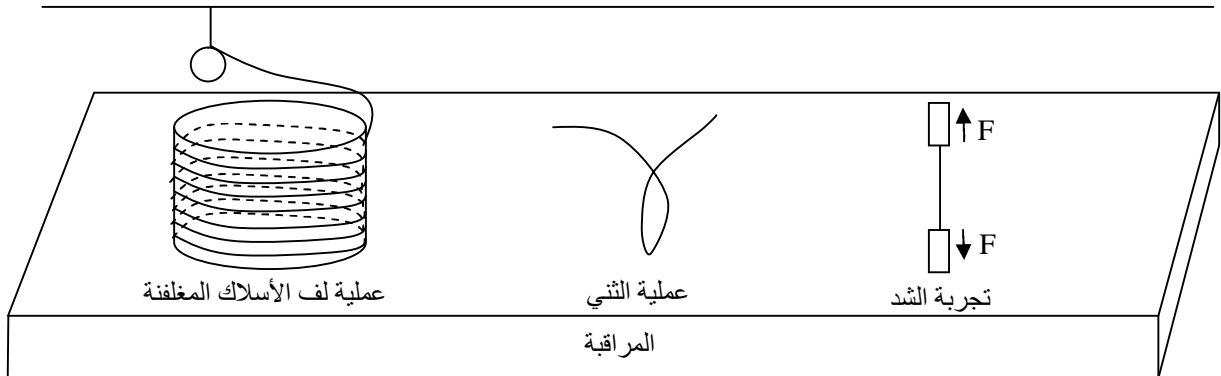
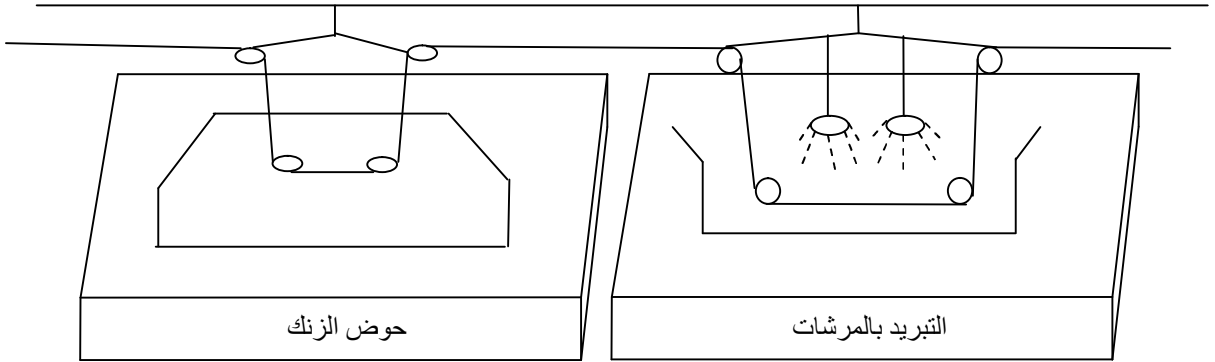
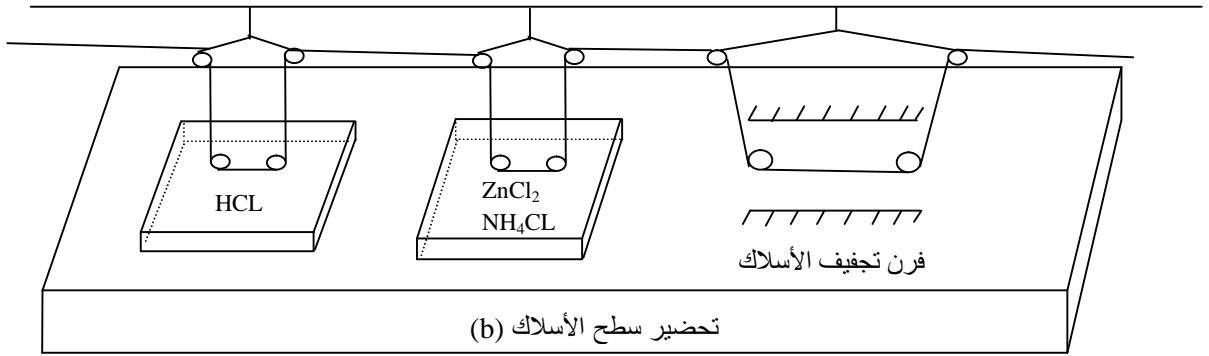
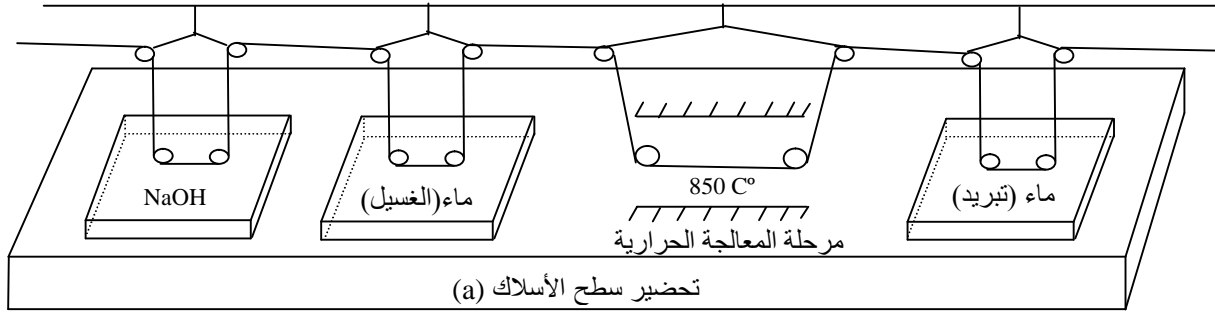
Φ (mm)	t (sec)	v(m/min)
2.4	14	25
2.7	13	27
3	12	31

الجدول (II-3) : سرعة توغل السلك وزمن الانغماس داخل حوض Zn

تبرّد العينات بنظام تبريد تمرّ تحته الأسلاك و يتكون من عدّة مرشّات للماء.

4-6 المراقبة :

تلف الأسلاك المغلفة أخيراً على شكل اسطوانات بواسطة نظام لف. يتم في هذه المرحلة مراقبة الأسلاك وتصليح العيوب الموجودة كتلحيم الانكسارات . تتم مراقبة طبقة الغلفنة بواسطة العين المجردة فقط وذلك بثني الأسلاك لمعرفة مدى التحام طبقة الغلفنة بسطوحها، و تستعمل تجربة الشد لقياس الخصائص الميكانيكية للأسلاك المغلفة.



الشكل (II-3) : رسم تخطيطي لآلية الغلجنة في Trifisoud

III- النتائج والمناقشة

يُستحسن من الناحية الصناعية استخدام الفولاذ بعد معرفة خصائصها الميكانيكية والبنوية . تنقسم هذه الدراسة إلى أربعة أقسام بالإعتماد على التقنيات التي سبق ذكرها في الفصل الثاني . تحدّد أولاً بعض الخواص الميكانيكية و البنوية للفولاذ في حالة الإستقبال (الحالة الابتدائية). ثمّ تدرس هذه الخصائص بعد عمليّة تصنيع الأسلاك ذات الأقطار المختلفة . تُتبع بدراسة الخصائص الميكانيكية والبنوية للأسلاك بعد عمليّة الغلفنة. نهتمّ أخيراً بدراسة إعادة البلورة الأولية للأسلاك غير المغلفنة وهذا لمعرفة تأثير عملية التلدين (درجة الحرارة , زمن التلدين) على الخصائص البنوية والميكانيكية.

1- الحالة الابتدائية

1-1 قابلية الفولاذ للتلحيم :

يؤثر الكربون على الخواص الميكانيكية للفولاذ وكذا على قابلية تلحيم الفولاذ. تُحدّد هذه القابلية إنطلاقاً من نسبة الكربون المكافئ الذي يعطى بالعلاقة التالية :

$$C_E = \%C + \frac{Mn+Si}{2} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5} \dots\dots\dots(III - 1)$$

حيث :

C % : عنصر الكربون (يعطى بالنسبة المئوية الوزنية)

Mn و Si و Ni و Cu و Cr و Mo و V هي العناصر السبائكية الموجودة في الفولاذ وتعطى بالنسبة المئوية الوزنية.

بتعويض التركيب الكيميائي للفولاذ قيد الدراسة (الفصل الثاني) وُجد أن الكربون المكافئ (C_E) :

$$C_E = 0.33\% \text{ (وزناً)}$$

نلاحظ أن نسبة الكربون المكافئ لهذا الفولاذ هي اقل من النسبة التي حدّتها المجموعة الأوروبية وهي (وزناً) $C_E = 0.49\%$ وزناً كقيمة عظمى [118]. تجدر الإشارة هنا أن الأسلاك الفولاذية يتمّ تلحيمها بمصنع Trifisoud بعد الانكسار بصفة دائمة.

2-1 قياس الصلادة :

قيست الصلادة المجهريّة لهذا الفولاذ عند الإستقبال بالإعتماد على إختبار Vichers وأعطت النتيجة التالية :

$$H_v = (153.36 \pm 0.68) \text{ kgf/mm}^2$$

أعطت دراسة أجريت على فولاذين لئنين يحتوي أحدهما على 0.07% C والآخر على 0.05% C

قيمة H_v تقدر بـ 140.24kgf/mm^2 و 120.40kgf/mm^2 على التوالي [119]. يلاحظ وجود تقارب بين هذه الدراسة وصلادة الفولاذ قيد الدراسة و انخفاض في قيمة الصلادة بانخفاض نسبة الكربون. ترتفع قيمة الصلادة لفولاذ لئین يحتوي بالإضافة إلى نسبة كربون (0.076% C) على 0.05% من النيوبيوم (Nb) إلى القيمة $H_v = 250 \text{kgf/mm}^2$ [120]. تؤكد هذه النتيجة الدور الكبير للنيوبيوم (Nb) في رفع قيمة صلادة الفولاذ اللين و ذلك لألفته الكيميائية مع الكربون حيث يكوّن ترسبات دقيقة هي كربونات النيوبيوم (NbC). عند مقارنة صلادة الفولاذ قيد الدراسة مع صلادة الطور الفيريتي (α) وحده (و تُقَدَّر بـ 100kgf/mm^2 حسب المرجع [7]) نجد أنّها مرتفعة نسبياً ولكنها منخفضة جداً عند مقارنتها مع صلادة السمنتيت (Fe_3C) (تقَدَّر بـ 1000kgf/mm^2 حسب المرجع [7]). يُعبر هذا الاختلاف عن مدى تأثير العناصر السببكية و معها عنصر الكربون على صلادة الفولاذ. يرتبط عنصر الكربون مع ذرات الحديد ليكوّن مركب السمنتيت. يُشكّل السمنتيت مع طور الفريت ما يُعرف بالبرليت (P). يحتوي البرليت على 11.3% من السمنتيت و 88.7% من الفريت وفقاً لبيان الإيزان ($\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$) [15].

يُعبّر عن الإجهاد المتوسط للسبائك الثنائية الطور بالعلاقة التالية [121]:

$$\sigma_{\text{moy}} = X_1\sigma_1 + X_2\sigma_2 \dots \dots \dots (III - 2)$$

حيث :

σ_1, σ_2 إجهاد حد المرونة للطورين , هنا نختار الطور α و الطور Fe_3C على التوالي.

X_1, X_2 نسبة الطورين α و Fe_3C على التوالي.

يمكن إستنتاج العلاقة العامة التي تعطي الصلادة المتوسطة للبرليت (P) بدلالة النسب الطورية المكوّنة له بالاعتماد على العلاقة III-2 نجد :

$$H_v^{(P)} = X_\alpha H_v(\alpha) + X_{\text{Fe}_3\text{C}} H_v(\text{Fe}_3\text{C}) \dots \dots \dots (III - 3)$$

حيث :

$H_v(\alpha)$: صلادة طور الفريت.

$H_v(\text{Fe}_3\text{C})$: صلادة طور السمنتيت.

بالتعويض في العلاقة (III-3) يتمّ حساب قيمة صلادة البرليت وفق بيان الإيزان ($\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$).

$$H_v^{(P)} = 0.887 \times 100 + 0.113 \times 1000 = 202 \text{ kgf /mm}^2$$

يُمكن أن نستنتج قيمة صلادة الفولاذ قيد الدراسة (النظرية) و الذي بيّنت الحسابات (الدراسة المجهرية) أنّه يحتوي 8.20% برليت و 91.80% فريت. بتطبيق العلاقة (III-2) يمكن تقدير صلادة الفولاذ كما يلي :

$$H_v = X_v H_v(p) + X_\alpha H_v(\alpha) \dots \dots \dots (III - 4)$$

$$H_v = 0.082 \times 202 + 0.918 \times 100 = 108.36 \text{ kgf/mm}^2$$

يوجد إختلاف واضح بين القيمة التجريبية $H_v = 153 \text{ kgf/mm}^2$ و $H_v = 108.36 \text{ kgf/mm}^2$. قد يرجع هذا الاختلاف أولاً لصلادة فريت الفولاذ المدروس (أعلى من 100 kgf/mm^2) و ثانياً إلى تأثير الحجم الحبيبي لهذا الطور الذي لم يُؤخذ بعين الإعتبار في المرجع [7]. يجب أن لا ننسى أنّ الحجم الحبيبي للفريت يرتبط ارتباطاً وثيقاً بشروط التبريد.

تلعب الألفة الكيميائية بين العناصر السببكية (مثل Mn, Si, P, S) و الحديد (Fe) دوراً مهماً في نوعيّة المرغبات التي يمكن تشكّلها و التي لم تؤخذ بعين الإعتبار في العلاقة (III-3) فمثلاً يمكن للمغنيز (Mn) تكوين السّمنتيت الإحلالي وهو $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ الذي يرفع من صلادة البرليت [122]. كما يمكن لهذه العناصر السببكية أن ترفع من صلادة الفريت بتكوينها لمركبات تحتل المواقع الإحلالية في شبكة الفريت.

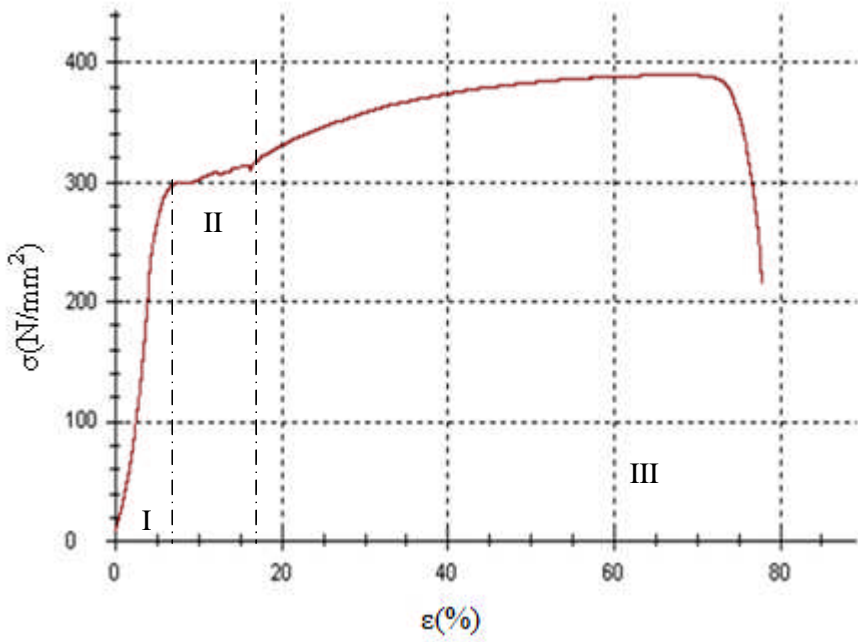
3-1 تجربة الشدّ:

يمثل الشكّل (III-1) منحنى اختبار الشدّ الإصطلاحي للفولاذ قيد الدراسة. هو عبارة عن تغيّر الإجهاد $(\sigma = F/S_0)$ بدلالة التشوه $(\epsilon = \Delta L/L_0)$.

حيث: S_0 , L_0 مقطع وطول العينة قبل تجربة الشد على التوالي. ΔL و F التغير في طول العينة والحمولة المطبقة على الترتيب. يحتوي منحنى الشد للعينة الابتدائية ($\Phi = 5.5 \text{ mm}$) على ثلاثة أجزاء. الجزء الأول (I): مجال المرونة ويتغير فيه الإجهاد المطبق (σ) كدالة خطية مع التشوه (ϵ) . يبلغ إجهاد حد المرونة (σ_e) القيمة 300 N/mm^2 ويوافقها نسبة تشوه لا تتعدى 7.5% . يكون التشوه في هذا المجال عكوساً.

الجزء الثالث (III): مجال اللدونة ويغطي مجال تشوه واسع تصل سعته 54.3% . تبلغ قيمة الإجهاد الاعظمي (σ_{max}) القيمة 389.5 N/mm^2 عند نسبة تشوه (ϵ_{max}) تقدر بـ 73.5% . تجدر الإشارة هنا إلى وجود اختلاف واضح بين σ_e و σ_{max} .

يبدأ ظهور التخصّر (التعنق) عند القيمة الموافقة لـ σ_{max} ويستمر إلى أن يحدث الإنكسار. ينخفض إجهاد حد الإنكسار (σ_r) ليصل القيمة 220 N/mm^2 الموافقة لنسبة تشوه كلي $\epsilon_r = 77.8\%$.



الشكل (III-1) : منحنى الشد الاصطلاحي لل فولاد في الحالة الإبتدائية

يظهر التشوه الدائم بسبب حركة الإنخلاعات والتي تتم عادة بإنزلاق هذه الأخيرة وفق مستويات بلورية معينة ووفق الإتجاهات البلورية الكثيفة التكديس . ترتفع كثافة الإنخلاعات في هذا المجال مع ارتفاع الإجهاد المطبق و يكون هذا الإرتفاع مصحوباً بتغير في البنية المجهرية.

الجزء الثاني (II) : أو ما يُعرف بالمجال المسنن يفصل بين مجال المرونة (I) ومجال اللدونة (III) . يظهر على شكل مسطح مُسنن سعته 9.5% وهو من مميزات الفولاذ اللينة. يُعبّر المسطح المسنن عن انتقال حزم Lüders و عن حركة الانخلاعات داخل الحزم. يلاحظ وجود قيمتان لـ σ_e , العليا والدنيا. يبقى الإجهاد المتوسط بدون تغيير بالرغم من إرتفاع نسبة التشوه و يختفي هذا المجال في الفولاذ القاسية [121] بسبب عدم ظهور حزم Lüders . تجدر الإشارة إلى أن التشوه في مجال المسنن غير متجانس. يتعلق وجود هذا المُسنن بحدوث تفاعل الإنخلاعات مع الذرات الإنغراسية مثل الكربون والنيتروجين , وكذا وجود حزم Lüders . إن حزم Lüders عبارة عن تشوهات غير متجانسة تظهر على سطح العينة أثناء الشد. تتموقع هذه التشوهات في حزم مائلة عن إتجاه السحب بزواوية أعظمية مقدارها 45°. هناك عوامل أخرى يمكن أن تؤثر على وجود المسطح وطوله مثل سرعة التشوه و الحجم الحبيبي والمسافة بين ذراعي جهاز الشد. يؤدي تناقص الحجم الحبيبي إلى زيادة طول المسطح. يزداد كذلك طول المسطح بزيادة المسافة بين ذراعي جهاز الشد، كما يمكن أن تؤدي زيادة سرعة التشويه إلى اختفاء المسطح [121-123-124].

يلاحظ عند مقارنة نتائج الشد لفولاذين ليّنين يحتويان على C 0.05% [117] و C 1.2% [125] مع نتائج الشد للفولاذ قيد الدراسة (C 0.07%) ارتفاع في الخواص الميكانيكية بارتفاع نسبة الكربون في الفولاذ قيد الدراسة. يؤدي ارتفاع نسبة الكربون من C 0.05% إلى C 0.07% إلى ارتفاع إجهاد حد المرونة (σ_e) من القيمة ($176.8 \text{ (N/mm}^2\text{)}$) إلى القيمة ($300 \text{ (N/mm}^2\text{)}$). يرتفع كذلك إجهاد حد المرونة (σ_e) إلى القيمة ($368 \text{ (N/mm}^2\text{)}$) بارتفاع نسبة الكربون من C 0.07% إلى C 1.2%.

1-3-1 الفحص الماكروسكوبي :

ينتهي إختبار الشدّ بعد إنكسار العيّنة. يوضّح الشكل (III-2) مظهر العيّنة بعد الإنكسار. يدل هذا النوع من الانكسار على أنّه إنكسار مطيلي. تُحسب المطيلية إنطلاقاً من العلاقة التآلية :

$$Z = \frac{S_f - S_i}{S_i} \dots\dots\dots(III - 5)$$

حيث :

S_i : المقطع الابتدائي للسلك .

S_f : المقطع النهائي السلك (بعد الانكسار) .



الشكل (III-2) : الإنكسار المطيلي كأس مخروط (cup-cone)

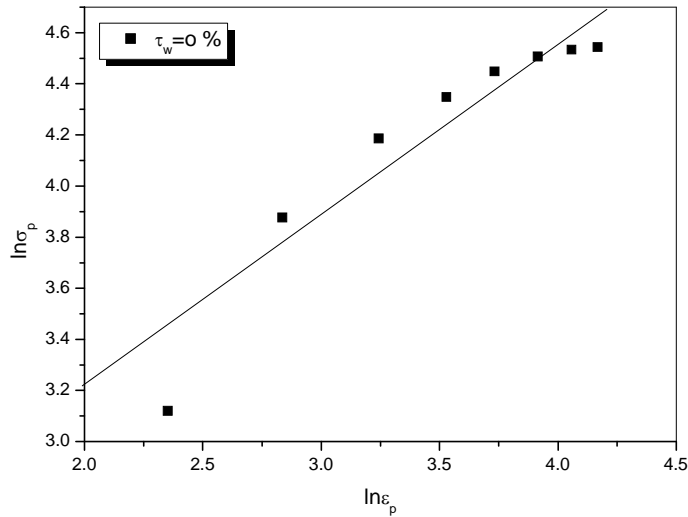
للعينة الابتدائية بعد إختبار الشدّ

قدرت المطيلية بـ $Z=92\%$. هذا النوع من الإنكسار مفضّل عند تصنيع الأسلاك المختلفة الأقطار بالرغم من أنّه لا بد من تفادي الإجهاد الأعظمي 389.5 N/mm^2 الذي يتسبّب في التعنق. يلخص الجدول (III-1) الخواص الميكانيكية للعينة الابتدائية.

$\tau_w(\%)$	$\sigma_e(\text{N/mm}^2)$	$\sigma_m (\text{N/mm}^2)$	$\epsilon_m(\%)$	$\epsilon_r(\%)$
0	300	389.5	73.5	77.8

الجدول (III-1) : الخواص الميكانيكية للعينة الابتدائية

❖ يمكن استنتاج المعاملان m و A باستعمال العلاقة (I-22). يوضح الشكل (III-3) تغير $\ln\sigma_p$ بدلالة $\ln\epsilon_p$ في مجال التشوه اللدن للعينة الابتدائية.



الشكل (III-3) : تحديد m و A للعينة الابتدائية

يعطى الجدول (III-2) قيم m و A للعينة الابتدائية.

τ _w (%)	m	A(N/mm ²)
0	0.66	7

الجدول (III-2) : قيمة المعاملان m و A

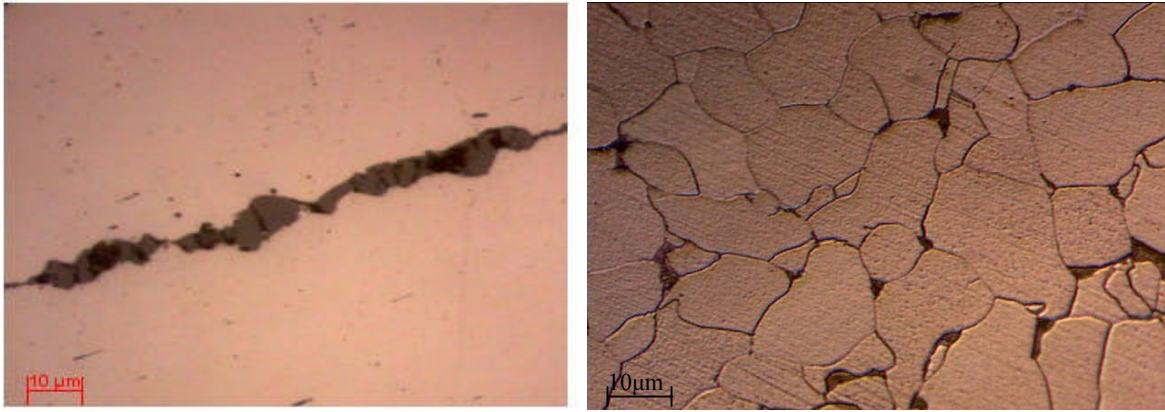
4-1 الفحص المجهرى :

أستعمل المجهر الضوئي و المجهر الإلكتروني الماسح لفحص البنية المجهرية للفولاذ قبل وبعد تجربة الشد وكذلك فحص سطوح الإنكسار.

1-4-1 المجهر الضوئي :

- البنية المجهرية :

يوضح الشكل (III-4) البنية المجهرية للفولاذ في الحالة الإبتدائية. تتكوّن هذه البنية من مناطق البرليت (p) ومن حبيبات الفريت (α) وهي متعددة الاضلاع. تظهر حبيبات الفريت بلون مضيء و مناطق البرليت بلون داكن وقدرت نسبتها بـ % $P=(8.20\pm 0.10)$. توافق هذه النسبة المحسوبة بالمجهر الضوئي تركيز كربون % 0.07 وزنا. تُؤكد هذه البنية المجهرية أن الفولاذ قيد الدراسة هو فولاذ هبط أو تكتويدي ناتج عن تبريد بطيء نوعا ما للأستنيت (γ) باعتبار أن البرليت يتمركز خاصة عند حدود حبيبات الفريت. يوضح الشكل (III-5) وجود مكثفات (inclusion) , تتميز هذه المكثفات بعدم التجانس في حجمها. يُتوقع أن تكون لهذه المكثفات تأثير سلبي على الخواص الميكانيكية للفولاذ (تخفّض من قيمة الإجهاد الاعظمي وإجهاد حد الانكسار).



الشكل (III-5) : وجود المكتثفات داخل الفولاذ في الحالة الابتدائية

الشكل (III-4) : البنية المجهرية للفولاذ في الحالة الابتدائية

- قياس الحجم الحبيبي :

أستخدمت طريقة أبرامس (طريقة الدوائر الثلاثة) [116] لحساب الحجم الحبيبي المتوسط للحالة الابتدائية. تحصلنا على النتيجة التالية :

$$d=(11.3\pm 0.8)\mu\text{m}$$

وجد بأن عدة عوامل تتدخل في تحديد الحجم الحبيبي منها العناصر السببكية التي لها ألفة كيميائية مع الكربون ونوع الترسبات التي تشكلها وكذا درجة حرارة الأستنة [122] و سرعة التبريد. يؤكد تقارب الحجم الحبيبي للفولاذ قيد الدراسة و الحجم الحبيبي لفولاذ المرجع [117] و اختلاف صلادة هذين الفولاذين (انظر الفقرة 1-2) , وجود عوامل أخرى تؤثر على صلادة الفولاذ لم تؤخذ بعين الاعتبار مثل نسبة الكربون.

أعطت الدراسة [125] لفولاذ لين يحتوي 0.12% وله نفس الحجم الحبيبي (d) للفولاذ قيد الدراسة قيمة للصلادة تقدر بـ $H_v=174.53\text{kgf/mm}$ و تؤكد هذه النتيجة مرة أخرى أن ارتفاع نسبة الكربون في الفولاذ يؤدي إلى ارتفاع صلادته . من المتوقع أن صلادة الفولاذ قيد الدراسة (0.07% C) تكون أعلى من صلادة الفولاذ (0.05% C) المرجع [117] بسبب تقارب حجمهما الحبيبي . يلاحظ أن صغر قيمة الحجم الحبيبي وانخفاض نسبة الكربون (0.07% C) للفولاذ قيد الدراسة أعطى قيم متوسطة لمختلف الخصائص الميكانيكية للفولاذ.

2-4-1 المجهر الإلكتروني :

أكدت نتيجة الفحص بالمجهر الإلكتروني (SEM) أن الفولاذ في الحالة الابتدائية (الشكل III-6) يتكون من الفريت والبرليت. تظهر حبيبات الفريت على شكل متعدد الأضلاع. عند تكبير عال تظهر

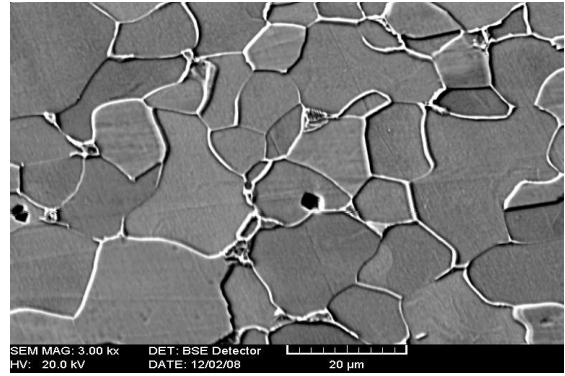
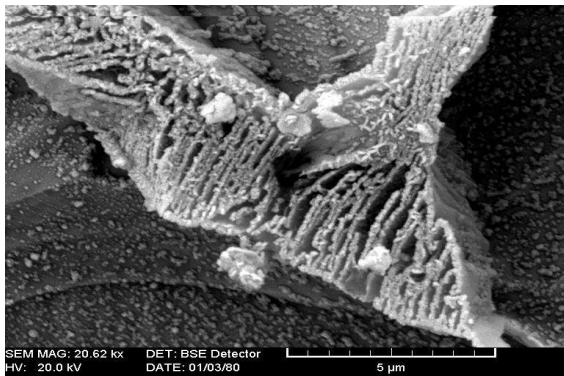
مناطق البرليت على شكل رقائق متناوبة من الفريت والسمنتيت (الشكل III-7). نذكر بالعلاقة التي تربط صلادة Brinell (HB) للبرليت والمسافة بين الرقائق Δ [127] حيث $HB \leq 300$ وهي :

$$HB \times \Delta = 80 \dots \dots \dots (III-6)$$

حيث :

$$HB \approx H_V \quad (HB \leq 300)$$

أعطى قياس المسافة المتوسطة بين رقائق البرليت الموجودة في الفولاذ القيمة $(0.35 \mu m)$ وهذا يوافق صلادة للبرليت مقدارها حسب العلاقة (III-9) $H_V = 229 \text{ kgf/mm}^2$. من الواضح أن هذه الصلادة أعلى من صلادة البرليت (202 kgf/mm^2) المحسوبة بالاعتماد على بيان الاتزان مما يؤكد هذا أن الفولاذ تم تبريده بسرعة أعلى من سرعة التبريد الخاصة ببيان الاتزان Fe-Fe₃C وبالتالي كانت المسافة بين رقائق السمنتيت أصغر.

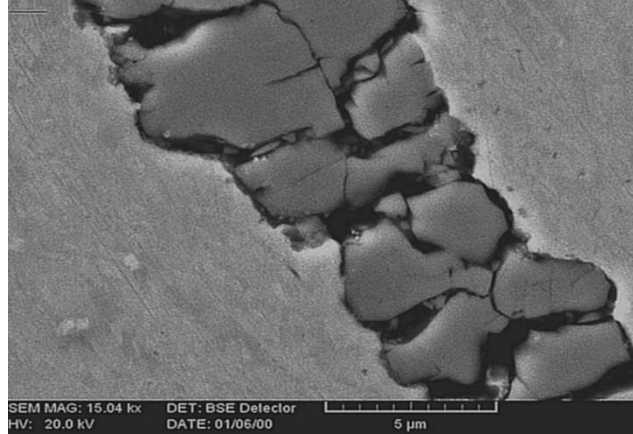


الشكل (III-6) : البنية المجهرية الإلكترونية لفولاذ الحالة الابتدائية
 الشكل (III-7) : البنية المجهرية الإلكترونية لفولاذ الحالة الابتدائية

بتعويض قيمة صلادة البرليت لهذا الفولاذ في العلاقة (III-4) نجد :

$$H_V = 229 \times 0.082 + 0.918 \times 100 = 110.6 \text{ kgf/mm}^2$$

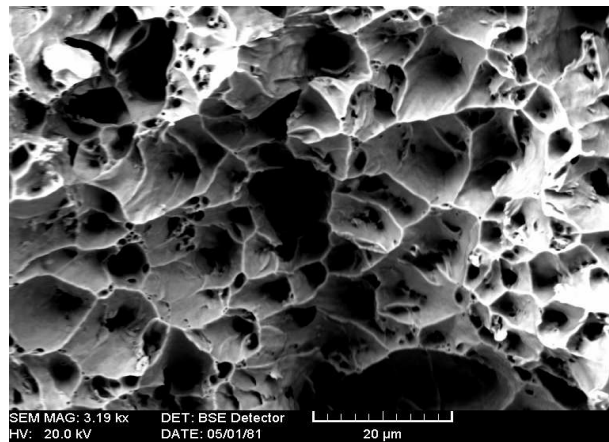
يلاحظ اختلاف واضح بين القيمة التجريبية $H_V = 153 \text{ kgf/mm}^2$ و $H_V = 110.6 \text{ kgf/mm}^2$. تؤكد هذه النتيجة أن العلاقة (III-4) لم تأخذ بعين الاعتبار كل العوامل المؤثرة على صلادة الفولاذ مثل الحجم الحبيبي للطور الفيريتي وكذلك تركيبه الكيميائي. يوضح الفحص المجهرى الدقيق وجود مُكثفات في البنية المجهرية لهذا الفولاذ , الشكل (III-8) . يؤكد ظهور هذا المكثف بشكل ترسبات منكسرة قساوته العالية وعدم قابليته للتشويه. نلاحظ وجود هذا المكثف بعيدا عن السطح (في قلب العينة).



الشكل (III-8) : وجود مكثفات في الحالة الابتدائية

تم تحليل هذه المكثفات في دراسات سابقة [117-125] لأسلاك تم الحصول عليها من نفس الشركة ولكن بتركيب كيميائي مختلف. أظهرت النتائج أنها عبارة عن أكسيد الحديد من النوع (Fe_2O_3 (Hématite) و (Fe_3O_4 (Magnetite). تؤكد هذه النتائج أن اختلاف التركيب الكيميائي للأسلاك يؤدي إلى اختلاف نوع المكثف المتشكل. بيّنت الدراسة [127] أجريت على هذا النوع من المكثفات أنها تتمتع بخصائص ميكانيكية مرتفعة كالصلادة مثلاً. تعرقل هذه الأكاسيد عمليات التشكيل عند صناعة الأسلاك بسبب صلابتها المرتفعة و لدونها المنخفضة. يجب إذن إزالة طبقات الأكسيد قبل عملية صناعة الأسلاك باستخدام الطرق الكيميائية (محاليل مناسبة) و الميكانيكية (القذف بالحبيبات والثني والإهتزاز) والحرارية (الأفران).

يبين الشكل (III-9) سطح الإنكسار بواسطة المجهر الإلكتروني (SEM) للحالة الابتدائية. يتكوّن سطح العينة من ثقوب , يرتبط حجمها بالحجم الحبيبي الابتدائي للعينة ويعرف هذا الإنكسار بالإنكسار المطيلي [121].



الشكل (III-9) : الإنكسار المطيلي للعينة الابتدائية

1-5 الخاتمة الجزئية :

- ✓ أثبتت الدراسة أن هذا الفولاذ يمكن توجيهه لتشكيل أسلاك ذات أقطار مختلفة لأن له إجهاد حد مرونة وصلادة متوسطتين .
- ✓ يلعب صغر الحجم الحبيبي ($11.3\mu\text{m}$) دوراً مهماً في تحسين الخواص الميكانيكية للفولاذ .
- ✓ بيّنت الدراسة أن الفولاذ يحتوي على المكنثفات . يعود سبب وجودها عادة إلى عدم مراعاة بدقة آليات التحضير . من المتوقع أن تؤثر على عملية تشكيل الفولاذ على شكل أسلاك , وهذا لقساوتها العالية .
- ✓ أكدت هذه الدراسة دور الكربون في الرفع من الخصائص الميكانيكية للفولاذ عند مقارنتها بدراسات أخرى .

2- الحالة المشوّهة

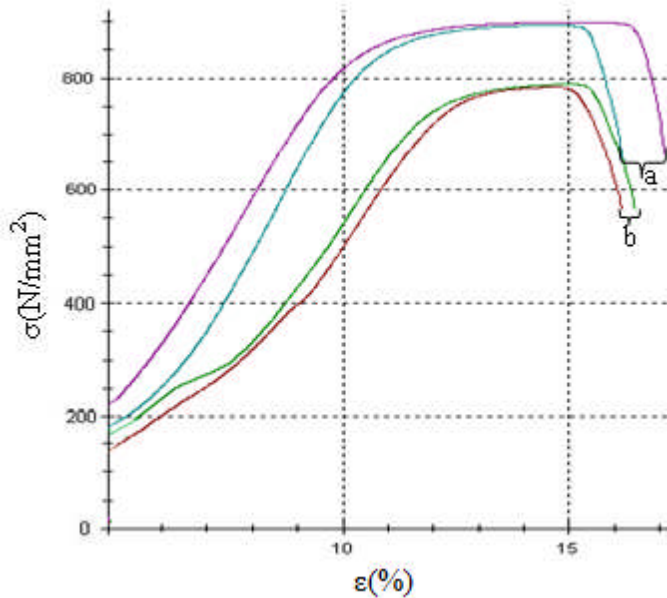
تخضع الفولاذ ، بصورة عامّة ، إلى عمليات ميكانيكية فيظهر تأثيرها على خصائصها البنيوية والميكانيكية. تتمثل هذه العمليات بصورة خاصة في عمليات التشويه (السحب مثلا) . تستعمل الصناعة بشكل واسع عملية تقسية الفولاذ عن طريق التشويه لأجل الرفع من خصائصها الميكانيكية.

1-2 قياس الصلادة :

تم قياس صلادة الأسلاك ذات الأقطار 2.4mm و 2.7mm و 3mm وهي توافق نسب تشويه (τ_w) تقدر بـ 81% و 76% و 70% على التوالي. تعتبر قيم الصلادة مرتفعة نوعا ما خاصة عند مقارنتها مع الحالة الابتدائية ($\Phi = 5.5mm$) أي قبل التشكيل (جدول III-2). يرجع هذا إلى ارتفاع نسبة العيوب الخطية أي الإنخلاعات أثناء عملية تصنيع الأسلاك. ترتفع قيم الصلادة مقارنة بالحالة الابتدائية بـ 96% و 72% و 44% لنسب التشويه 81% و 76% و 70% على التوالي (جدول III-3). يعتبر التشويه من الطرق الصناعية المهمة للرفع من قيمة الصلادة.

2-2 تجربة الشدّ :

يوضّح الشكل (III-10) منحنيات إختبار الشدّ الإصطلاحي للسلكين المشوّهين بنسبة 81% و 76%. توافق كل نسبة تشوه اختبارين للشدّ . يتم أخذ القيم المتوسطة لكل اختبارين. نلاحظ أن منحنيات الشدّ للسلكين لها نفس الشكل العام.



الشكل (III-10) : منحنيات إختبار الشدّ للأسلاك

$$a-\tau_w = 76\%$$

$$b-\tau_w = 81\%$$

يحتوي منحنى الشد للسلك $\tau_w = 81\%$ (مثلا) على جزئين.

الجزء الأول (I) : مجال المرونة ويتغير فيه الإجهاد المطبق (σ) كدالة خطية مع تغير التشوه (ϵ) . يبلغ إجهاد حد المرونة (σ_e) القيمة 847N/mm^2 ويوافقها نسبة تشوه 10.8% .
الجزء الثاني (II) : مجال اللدونة ويغطي مجال تشوه ضيق نوعا ما تصل سعته إلى 5% . تبلغ قيمة الإجهاد الاعظمي (σ_{max}) القيمة 895.1N/mm^2 عند نسبة تشوه (ϵ_{max}) 15.5% (كقيمة متوسطة) .
تجدر الإشارة هنا إلى انه يوجد تقارب نوعا ما بين σ_e و σ_{max} .
يبدأ ظهور التخصر (التعتق) عند القيمة الموافقة لـ σ_{max} إلى أن يحدث الإنكسار . ينخفض إجهاد حد الانكسار (σ_r) ليصل القيمة 666 N/mm^2 الموافقة لنسبة تشوه كلي $\epsilon_r = 16.6\%$.
قد يؤكد الاختلاف الموجود بين منحنى الشد a و b عدم التجانس في مقطع الأسلاك التي أجريت عليها تجارب الشد . لأنه من المتوقع أن يكون مجال التشوه اللدن للمنحنى a أوسع من مجال التشوه اللدن للمنحنى b .

يلاحظ كذلك اختفاء المسطح المسنن الذي يفصل مجال المرونة من مجال اللدونة والذي سبق مشاهدته في الحالة الابتدائية . قد يكون السبب في ذلك التغير في البنية المجهرية ويعتبر هذا المجال من مميزات الفولاذ اللينة .

تجدر الإشارة هنا إلى أن منحنى اختبار الشد للسلك المشوه بنسبة $\tau_w = 70\%$ له نفس الشكل العام لمنحنيات الشد للسلكين المشوهين بنسبة 76% و 81% .
يلخص الجدول 3-III الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية .

$\Phi(\text{mm})$	$\tau_w(\%)$	H_v (kgf/mm^2)	σ_e (N/mm^2)	σ_m (N/mm^2)	$\epsilon_m(\%)$	$\epsilon_r(\%)$
5.5	0	153	300	389.5	73.5	77.8
3	70	220	720	766	14.8	16.1
2.7	76	263	750	786.3	15.1	16.3
2.4	81	300	847	895.1	15.5	16.6

الجدول (III-3): الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية

يلاحظ بالمقارنة مع الحالة الابتدائية (جدول III-3) إرتفاع كلا من إجهاد حد المرونة (σ_e) والإجهاد الأعظمي (σ_{max}) كلما أرتفعت نسبة التشوه (τ_w) . يرتفع إجهاد حد المرونة (σ_e) مثلا من القيمة 300N/mm^2 في الحالة الابتدائية إلى 847N/mm^2 للسلك $\tau_w = 81\%$. يرجع السبب في ذلك إلى إرتفاع كثافة الإنخلاعات مما يؤدي إلى التصادم فيما بينها يؤدي بدوره إلى ظهور حواجز تعمل على

عرقلة حركتها . ترتفع نسبة الإجهاد الاعظمي بالنسبة للحالة الابتدائية $(\frac{\Delta\sigma_{max}}{\sigma_{max(in)}})$ بـ 129.8% لـ 81% و $\tau_w = 101.8\%$ و $\tau_w = 76\%$ (جدول III-4). وهو ارتفاع معتبر ولذا يعتبر التشويه من الطرق العملية لتقسية الفولاذ . تم حساب المطيلية Z (نسبة تغير مقطع الأسلاك) انطلاقا من العلاقة (I-5).
تنخفض نسبة المطيلية بالنسبة للحالة الابتدائية $(\frac{\Delta Z}{Z_{(in)}})$ بـ 15% و 17% و 19% بالنسبة لـ $\tau_w = 70\%$ و $\tau_w = 76\%$ و $\tau_w = 81\%$ على الترتيب (جدول III-4) ويعتبر هذا الانخفاض طفيفا. تسمح المطيلية المرتفعة للأسلاك بصناعة أسلاك أخرى ذات قطر اقل من 2.4mm.

$\tau_w(\%)$	$\frac{\Delta H_v}{H_v(in)}(\%)$	$\frac{\Delta\sigma_e}{\sigma_{e(in)}}(\%)$	$\frac{\Delta\sigma_{max}}{\sigma_{max(in)}}(\%)$	$\frac{\Delta Z}{Z_{(in)}}(\%)$
70	44	140	92	-15
76	72	150	101.8	-17
81	96	182.3	129.8	-19

الجدول (III-4): نسبة تغير الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية بالنسبة للحالة الإبتدائية

تؤكد مقارنة نتائج الجدول (III-4) مع نتائج الدراسة [117] (فولاذ لين يحتوي على C 0.05%) تأثير إرتفاع نسبة الكربون على رفع الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية.

❖ العلاقة بين σ_e و σ_{max} و H_v :

(A) : يُمثل الشكل (III-11) منحنى تغيّر الصلادة H_v بدلالة إجهاد حد المرونة σ_e للفولاذ.

نلاحظ أن التغيّر خطّي يتبع العلاقة التالّية :

$$H_v = 2.53\sigma_e + 741.4.....(III - 7)$$

وجد في دراسة أخرى [117] أنّ صلادة Vickers للأسلاك الفولاذية اللّينة (تحتوي على C 0.05%) تتغيّر مع إجهاد حد المرونة وفق العلاقة التالّية :

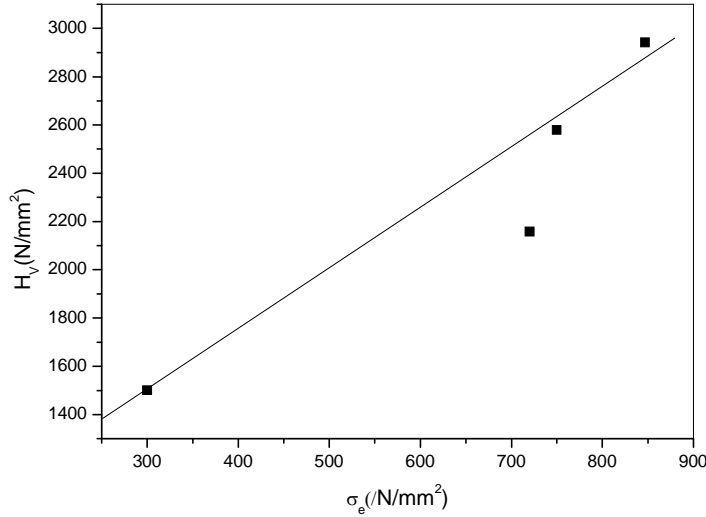
$$H_v = 1.16\sigma_e + 552.4.....(III - 8)$$

يلاحظ وجود اختلاف في الميل بين العلاقتين (III-10) و (III-11). قد يُفسّر هذا الاختلاف بتأثير الكربون (C). أدت الزيادة في نسبة الكربون من 0.05% إلى 0.07% إلى إرتفاع الميل من 1.16 إلى 2.53 [117]. وَجِدَت دراسات تمّ إجراؤها على الحديد (Fe_0) (يحتوي على ذرات إنغراسية للأزوت

(N) وللكرتون (C) علاقة تربط بين صلادة Vickers وإجهاد حد المرونة [128] من الشكل :

$$Hv = 3\sigma_e \dots \dots \dots (III - 9)$$

تجدر الإشارة إلى أن الكربون والأزوت لهما تأثير كبير في تقسية الحديد (Fe_α) مقارنة مع العناصر الإحالية.

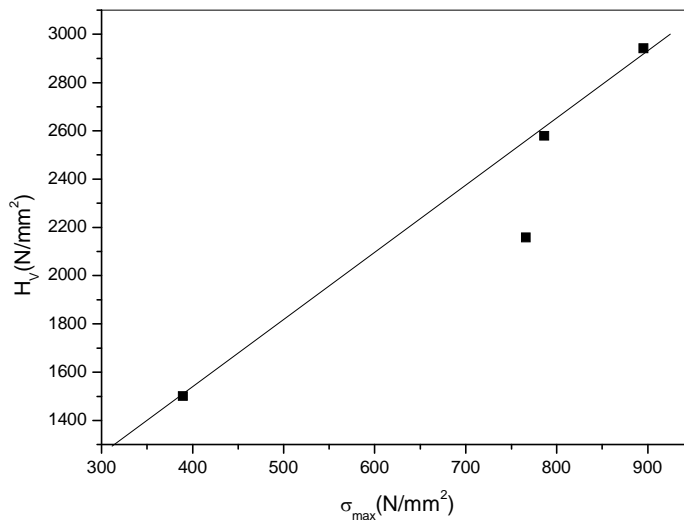


الشكل (III-11) : منحنى تغيير الصلادة بدلالة إجهاد حد المرونة للأسلاك

(b) : يُمثل الشكل (III-12) منحنى تغيير الصلادة H_v بدلالة إجهاد حد المرونة σ_{max} للفولاذ. نلاحظ أن التغيير خطي يتبع العلاقة التالية :

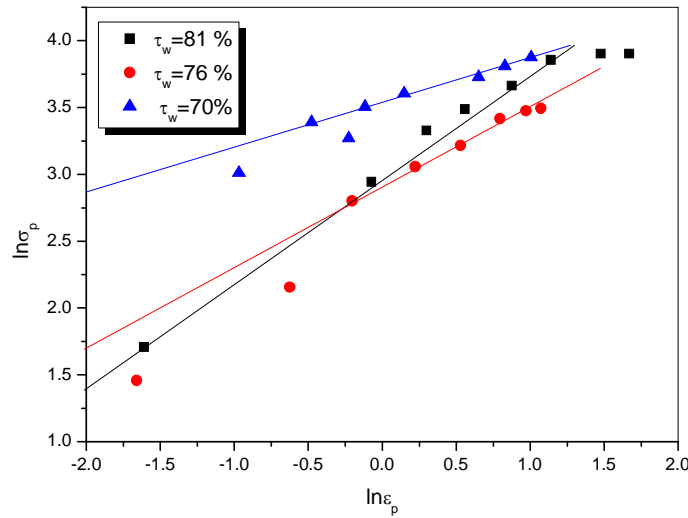
$$Hv = 2.80\sigma_{max} + 423 \dots \dots \dots (III - 10)$$

يلاحظ أن ميل العلاقة (III-13) 2.80 متقارب مع ميل العلاقة (III-10) 2.50 . تؤكد هذه النتيجة أن الارتفاع في إجهاد حد المرونة σ_e بسبب التشويه يكون مقاربا للارتفاع في الإجهاد الأعظمي σ_{max} .



الشكل (III-12) : منحنى تغيير الصلادة بدلالة الإجهاد الأعظمي للأسلاك

يوضح الشكل (III-13) تغير $\ln \sigma_p$ بدلالة $\ln \epsilon_p$ في مجال التشوه اللدن للأسلاك (انظر العلاقة I-22).



الشكل (III-13) : تحديد m و A للأسلاك

يعطى الجدول (III-5) قيم m و A للأسلاك.

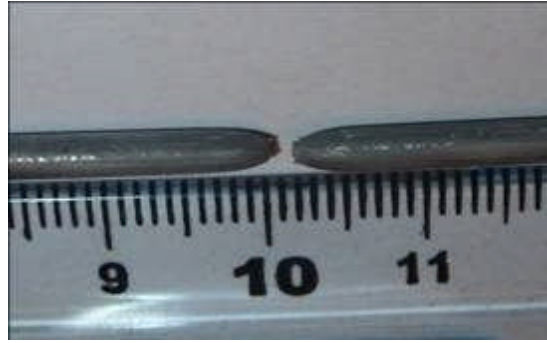
τ_w (%)	m	$A(N/mm^2)$
70	0.34	34
76	0.59	18
81	0.78	19

الجدول (III-5) : قيم المعاملان m و A

يُبيّن الجدول (III-5) أن قيمة قدرة الفولاذ على التشوه البلاستيكي (m) منخفضة نوعاً ما للسلك ذي القطر الأكبر , بينما ترتفع المقاومة الميكانيكية (A) لهذا السلك و بقية الأسلاك بالمقارنة مع الحالة الابتدائية.

3-2 الفحص الماكروسكوبي :

يعطي الشكل (III-14) الصورة الماكروسكوبية لعينة إختبار الشد بعد إنكسارها ($\Phi = 3mm$). يشبه إنكسار هذه العينة الحالة الابتدائية الذي هو من النوع المطيلي (Cup-Cone). تتمتع الأسلاك التي تنكسر مطيلياً بلدونة مرتفعة تسمح لها بالتشكيل اللاحق مقارنة بالأسلاك ذات الانكسار من النوع الهش. وتجدر الإشارة إلى أن كل الأسلاك ($\Phi = 2.4mm$) و ($\Phi = 2.7mm$) و ($\Phi = 3mm$) تنكسر على نفس النمط.

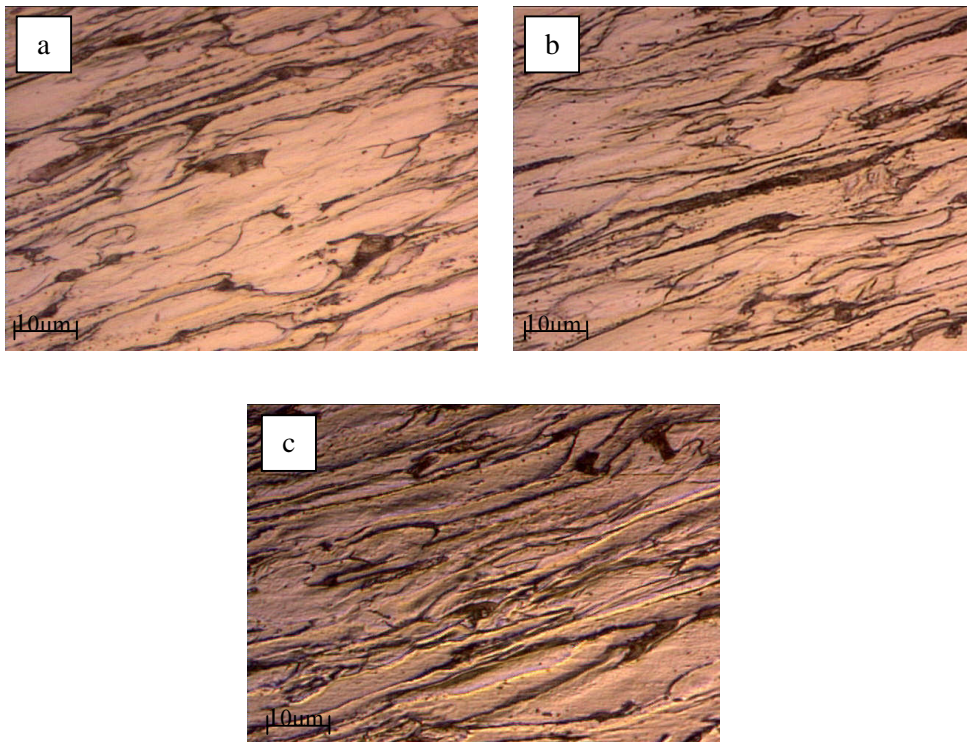


الشكل (III-14): الإنكسار المطيلي للسلك ($\tau_w = 70\%$)

4-2 الفحص المجهرى :

1-4-2 الفحص المجهرى الضوئى :

يبين الشكل (III-15) البنية المجهرية الضوئية للأسلاك الثلاثة. نلاحظ أنها دوماً من النوع (فريت و برليت). تتميز مناطق البرليت بلونها الداكن والطور الفريتي بلونه المضيئ. تتجه إستطالة حبيبات الفريت بإتجاه السحب. يلاحظ أن إنضغاط حبيبات الفريت هو أقل بالنسبة للسلك الذي قطره 3mm عند مقارنته بالسلك الذي قطره 2.4mm.

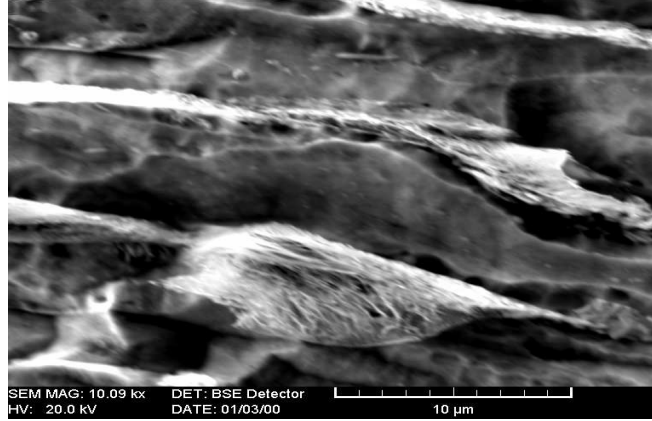


الشكل (III-15) : البنية المجهرية الضوئية للأسلاك

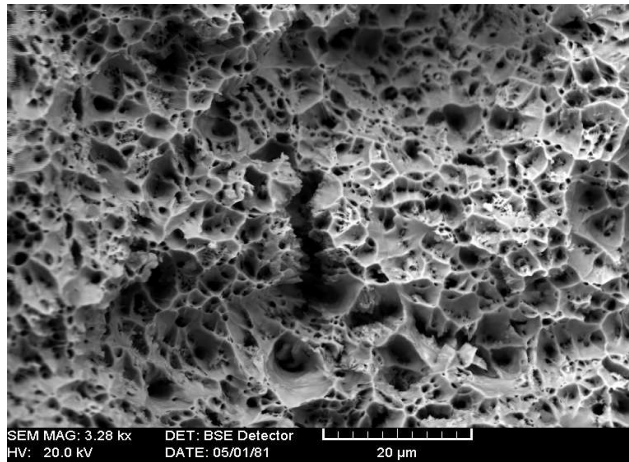
(a) $\tau_w = 70\%$, (b) $\tau_w = 76\%$, (c) $\tau_w = 81\%$

2-4-2 الفحص المجهر الإلكتروني :

يوضح الشكل (III-16) البنية المجهرية النموذجية للأسلاك (السلك ذو نسبة تشوه $\tau_w=76\%$). تظهر مناطق البرليت على شكل رقائقي حيث تكون مسحوبة باتجاه الشد مثلها مثل حبيبات الفريت. يُؤكّد المجهر الإلكتروني كذلك أنّ رقائقي السمنتيت مضغوطة بسبب التشوه.

الشكل (III-16) : البنية المجهرية الإلكترونية للسلك الفولاذي $\tau_w=76\%$

يوضح الشكل (III-17) البنية المجهرية الإلكترونية لسطح السلك $\tau_w=76\%$ بعد إنكساره. تتكون البنية من ثقوب إهليجية نوعا ما , وهذا ما يميز الإنكسار المطيلي. يلاحظ أنّ الثقوب لا تحتوي بداخلها على أي نوع من الترسبات و تجدر الإشارة إلى أنّ حجوم هذه الثقوب أصغر من تلك الخاصة بالحالة الابتدائية بسبب الاختلاف في البنية المجهرية بين الحالة الابتدائية والسلك المشوه.



الشكل (III-17) : البنية المجهرية لسطح الإنكسار للسلك

5-2 الخاتمة الجزئية :

✓ أثبتت الدراسة ارتفاع الخصائص الميكانيكية (الصلادة وإجهاد حد المرونة) واختلاف البنية المجهرية للأسلاك عن الحالة الابتدائية حيث أكدت هذه الدراسة دور التشويه في تقسية الأسلاك الفولاذية .

✓ تم حساب معامل قدرة الأسلاك على التشوه الدائم (m) وكذلك مقاومتها الميكانيكية (A) . وجد أن قيم m تتغير نوعا ما مع تغير أنصاف الأقطار للأسلاك الفولاذية . تعتبر قيم m مرتفعة مقارنة بالحالة الابتدائية.

✓ بينت الدراسة تشابه البنية المجهرية لسطح الانكسار (الانكسار المطيلي) والمظهر الماكروسكوبي للأسلاك والحالة الابتدائية . يؤكد هذا النوع من الانكسار المطيلي إمكانية تصنيع أسلاك أخرى لها أقطار أقل من 2.4mm.

3- الحالة المغلفة

تخضع الأسلاك ذات الأقطار المختلفة إلى عملية الغلغنة ليس فقط بهدف حمايتها ضد التآكل وبالتالي استعمالها لفترة زمنية أطول ولكن كذلك لمنظرها الأكثر لمعانا. تتمثل الغلغنة على الساخن في تغليف الأسلاك بواسطة طبقة من الزنك (Zn). يؤدي التفاعل بين الزنك السائل والحديد و الذي هو المكون الأساسي للأسلاك إلى ظهور طبقة ملتصقة بسطح الأسلاك تفصل بين الزنك والفولاذ. إذن من الضروري التعرف على الخصائص البنيوية و الميكانيكية للأسلاك المغلفة. تتعرض كذلك الدراسة إلى مناقشة طبقة الغلغنة بملاحظة عيوبها واقتراح الحلول المناسبة لها و تحديد مختلف الأطوار المشكلة لها.

1-3 قياس الصلادة :

تم قياس صلادة الأسلاك ذات الأقطار 2.4mm و 2.7mm و 3mm بعد غلغنتها وهي توافق نسب تشويه (τ_w) تقدر بـ 81% و 76% و 70% على التوالي (جدول III-6). تعتبر هذه القيم منخفضة نوعا ما عند مقارنتها مع الأسلاك غير المغلفة. يرجع هذا إلى انخفاض كثافة العيوب الخطية أي الانخلاعات أثناء عملية الغلغنة بسبب إعادة البلورة. تتخفف قيم الصلادة مقارنة بالحالة غير المغلفة بـ 36.6% و 33.4% و 26.3% لنسب التشويه 81% و 76% و 70% على التوالي (جدول III-7).

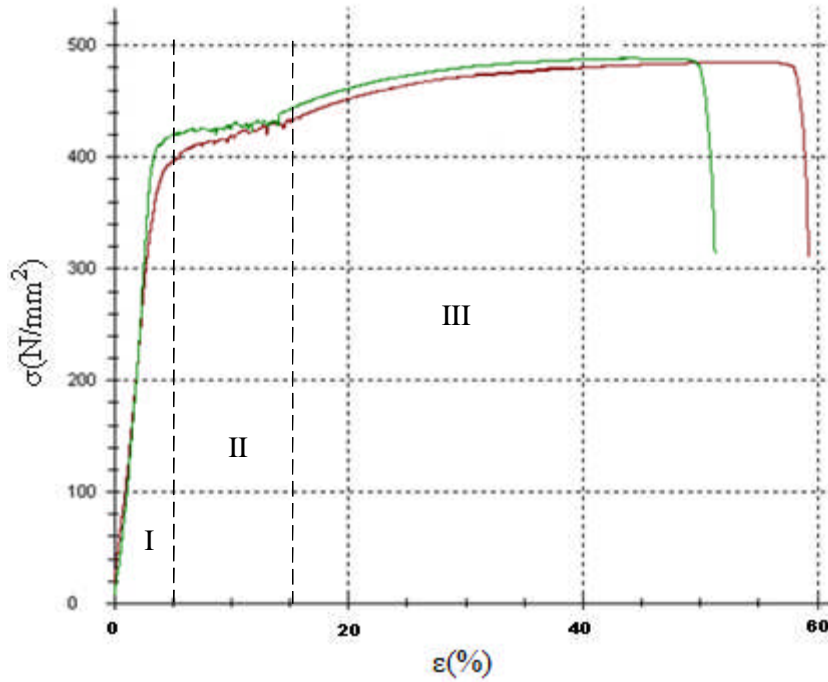
2-3 تجربة الشد :

يوضّح الشكل (III-18) منحنى إختبار الشدّ الإصطلاحي لسلك مشوه بنسبة 76%. تم إجراء اختبارين للشد تؤخذ القيم المتوسطة للمقادير المقاسة (مثل σ_e و σ_{max}). يحتوي هذا المنحنى على ثلاثة أجزاء.

الجزء الأول (I) : مجال المرونة ويتغير فيه الإجهاد المطبق (σ) كدالة خطية مع تغير التشوه (ϵ). يبلغ إجهاد حد المرونة (σ_e) القيمة $404N/mm^2$ و يوافقها نسبة تشوه لا تتعدى 5%.
الجزء الثالث (III) : مجال اللدونة ويغطي مجال تشوه سعته 39.1%. تبلغ قيمة الإجهاد الاعظمي (σ_{max}) $486.9N/mm^2$ عند نسبة تشوه (ϵ_{max}) تقدر بـ 52.8%. تجدر الإشارة هنا إلى وجود اختلاف واضح بين σ_e و σ_{max} .

يبدأ ظهور التخصّر (التعقّق) عند القيمة الموافقة لـ σ_{max} إلى أن يحدث الإنكسار. ينخفض إجهاد حد الإنكسار (σ_r) ليصل القيمة $320N/mm^2$ الموافقة لنسبة تشوه كلي $\epsilon_r = 55.2%$.
الجزء الثاني (II) : مجال المسنن يفصل بين مجال المرونة (I) ومجال اللدونة (III). يظهر على شكل مسطح مُسنّن تبلغ سعته 11.1%. يبقى الإجهاد المتوسط في هذا المجال دون تغيير بالرغم من ارتفاع نسبة التشوه.

يلاحظ إعادة ظهور المسطح المسنن والذي سبق مشاهدته في الحالة الابتدائية. قد يكون السبب في ذلك التغير في البنية المجهرية بعد غلغنة الأسلاك.



الشكل (III-18) : منحنى إختبار الشد للسلك $\tau_w = 76\%$ بعد عملية الغلغنة

تجدر الإشارة هنا إلى أن منحنيات اختبار الشد للسلكين المشوهين بنسبة $\tau_w = 81\%$ و $\tau_w = 70\%$ لهما نفس الشكل العام لمنحنيات الشد للسلك المشوه بنسبة 76% .
يلخص الجدول III- 6 الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية المغلغنة.

$\Phi(\text{mm})$	$\tau_w(\%)$	H_v (kgf/mm ²)	σ_e (N/mm ²)	σ_{\max} (N/mm ²)	$\epsilon_{\max}(\%)$	$\epsilon_r(\%)$
3	70	162	347	474	53	55.2
2.7	76	175	404	486.9	52.8	55.2
2.4	81	190	423	508.3	47.6	49.5

الجدول (III-6): الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية المغلغنة

يلاحظ بالمقارنة مع الحالة غير المغلغنة (جدول III-3) انخفاض كلا من إجهاد حد المرونة (σ_e) والإجهاد الأعظمي (σ_{\max}) للأسلاك بعد غلغنتها. ينخفض إجهاد حد المرونة (σ_e) مثلا من القيمة 847N/mm^2 دون الغلغنة إلى القيمة 404N/mm^2 بعد الغلغنة للسلك $\tau_w = 81\%$. يرجع السبب في ذلك إلى انخفاض كثافة الإنخلاعات بعد غلغنة الأسلاك مما يؤدي إلى تقليل التصادم فيما بينها وتسهيل حركتها.

تم حساب نسبة تغير الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية المغلفة بالنسبة للأسلاك غير المغلفة باستخدام العلاقة التالية :

$$\left| \frac{\Delta f}{f_{(NG)}} \right| = \left| \frac{f_{(G)} - f_{(NG)}}{f_{(NG)}} \right|$$

حيث :

f : إحدى الخواص الميكانيكية للأسلاك المغلفة (σ_e و σ_{max} ) .

$f_{(NG)}$: الخاصية الميكانيكية للأسلاك غير المغلفة.

$f_{(G)}$: الخاصية الميكانيكية للأسلاك المغلفة.

تنخفض نسبة الإجهاد الاعظمي بالنسبة للحالة غير المغلفة ($\frac{\Delta\sigma_{max}}{\sigma_{max(NG)}}$) بـ 43.2% للسلك $\tau_w = 81\%$

(جدول III-7) وهو انخفاض معتبر نوعا ما . ترتفع نسبة المطيلية Z بالنسبة للحالة غير المغلفة

بـ 10.8% و 9.5% و 9.3% بالنسبة لـ $\tau_w = 81\%$ و $\tau_w = 76\%$ و $\tau_w = 70\%$

على الترتيب (جدول III-7) ويعتبر هذا الارتفاع طفيفا . يسمح إنخفاض الخصائص الميكانيكية وتحسن المطيلية بإمكانية إعطاء الأسلاك المغلفة الشكل المناسب.

$\tau_w(\%)$	$\left \frac{\Delta H_v}{H_v(NG)} \right (\%)$	$\left \frac{\Delta \sigma_e}{\sigma_e(NG)} \right (\%)$	$\left \frac{\Delta \sigma_{max}}{\sigma_{max(NG)}} \right (\%)$	$\left \frac{\Delta Z}{Z(NG)} \right (\%)$
70	26.3	51.8	38.1	9.3
76	33.4	46.1	38	9.5
81	36.6	50	43.2	10.8

الجدول (III-7): نسبة تغير الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية المغلفة بالنسبة

للأسلاك غير المغلفة

تؤكد مقارنة نتائج الجدول (III-7) مع نتائج الجدول (III-3) تأثير عملية الغلفنة على الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية بالرغم من أن آلية الغلفنة في حد ذاتها معروفة بكونها لا تغير الخواص الميكانيكية للسبائك غير المغلفة.

❖ دراسة العلاقة بين H_v و σ_e و H_v و σ_{max} :

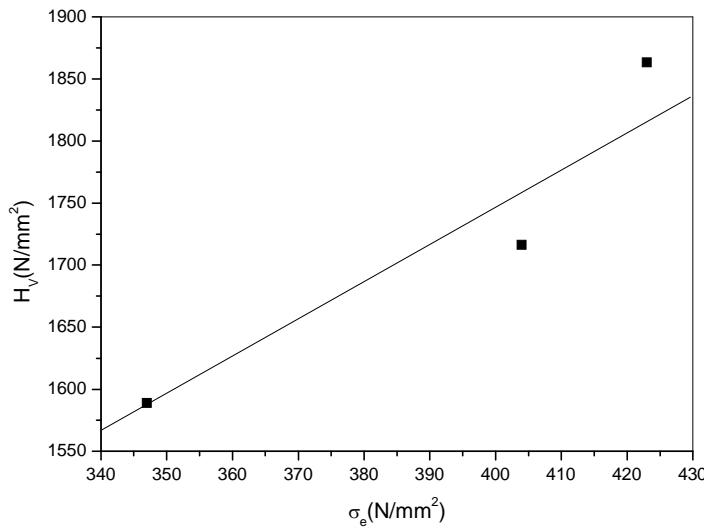
(a) : يُمثل الشكل (III-19) منحنى تغيّر الصلادة H_v بدلالة إجهاد حد المرونة σ_e بالنسبة للحالة المغلقة. نلاحظ أن التغيّر خطي ويتبع العلاقة التالية :

$$H_v = 3.07\sigma_e + 521.56 \dots \dots \dots (III - 11)$$

حيث :

H_v و σ_e هما الصلادة وإجهاد حد المرونة على التوالي.

نلاحظ أنّ هناك تكافؤ في الميل بين العلاقة (III-15) و (III-12) المحصل عليها حسب المرجع [128].

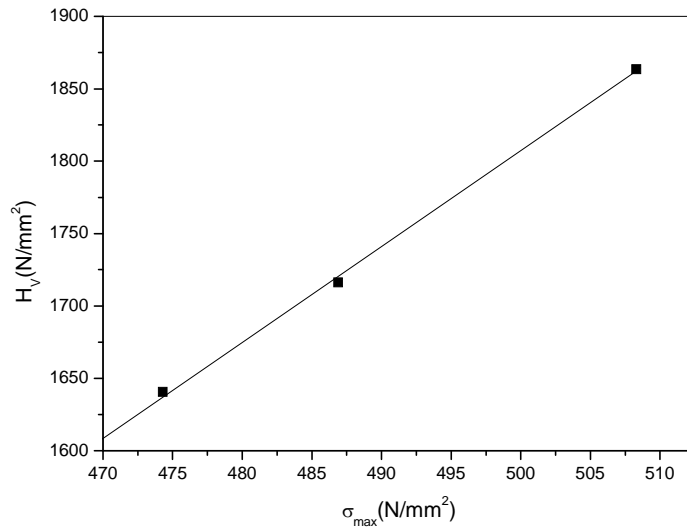


الشكل (III-19) : منحنى تغيّر (H_v) بدلالة (σ_e) للأسلاك المغلقة

(b) : يُمثل الشكل (III-20) منحنى تغيّر الصلادة H_v بدلالة إجهاد حد المرونة σ_{max} للفولاذ. نلاحظ أن التغيّر خطي ويتبع العلاقة التالية :

$$H_v = 6.69\sigma_{max} - 1535.93 \dots \dots \dots (III - 12)$$

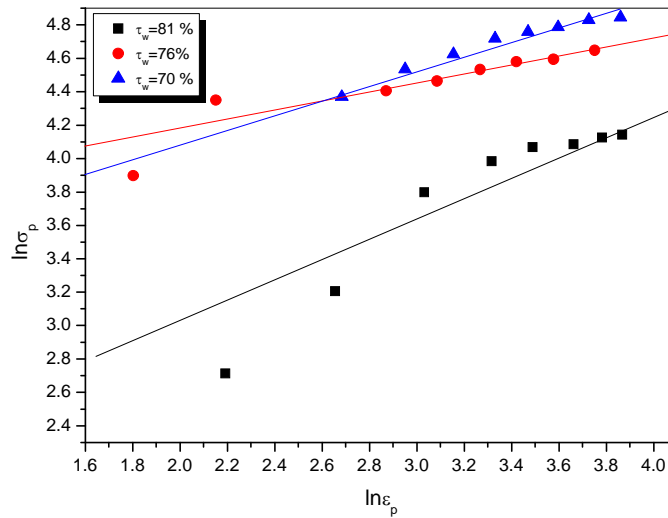
يلاحظ أن ميل العلاقة (III-16) 6.69 يختلف عن ميل العلاقة (III-13) 3.07. تؤكد هذه النتيجة أن الانخفاض في الإجهاد الأعظمي σ_{max} بعد غلغلة الأسلاك يكون أكبر من الانخفاض في إجهاد حد المرونة σ_e .



الشكل (III-20) : منحنى تغيّر (H_v) بدلالة (σ_{max}) للأسلاك المغلفة

❖ دراسة العلاقة بين σ و ϵ في مجال اللدونة :

يوضح الشكل (III-21) تغير $\ln \sigma_p$ بدلالة $\ln \epsilon_p$ في مجال اللدونة للأسلاك المغلفة (انظر العلاقة I-22)



الشكل (III-21) : تحديد m و A للأسلاك المغلفة

يُعطى الجدول (III-8) قيم m و A للأسلاك.

τ_w (%)	m	A (N/mm ²)
70	0.32	31
76	0.26	39
81	0.60	10

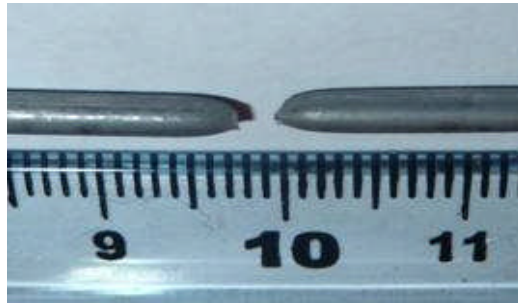
الجدول (III-8) : قيم المعاملان m و A للأسلاك المغلفة

يُبيّن الجدول (III-8) أن قيمة قدرة الفولاذ على التشوه البلاستيكي (m) مرتفعة للسلك ذو القطر الأصغر.

بينما تكون قيمة المقاومة الميكانيكية (A) للسلك ذو القطر الأصغر منخفضة. تجدر الإشارة إلى أن قيم (A) للأسلاك المغلفة متقاربة نوعاً ما بالمقارنة مع الأسلاك غير المغلفة.

3-3 الفحص الماكروسكوبي :

يعطي الشكل (III-22) الصورة الماكروسكوبية لعينة إختبار الشد بعد إنكسارها ($\Phi=2.7\text{ mm}$). يشبه بالأسلاك ذات الانكسار من النوع الهش. وتجدر الإشارة إلى أن كل الأسلاك المغلفة ($\Phi=2.4\text{mm}$) و ($\Phi=2.7\text{mm}$) و ($\Phi=3\text{mm}$) تنكسر على نفس النمط. يلاحظ تغير في مطيلية الأسلاك المغلفة (Z) مقارنة مع مطيلية الأسلاك غير المغلفة (الجدول III-7).



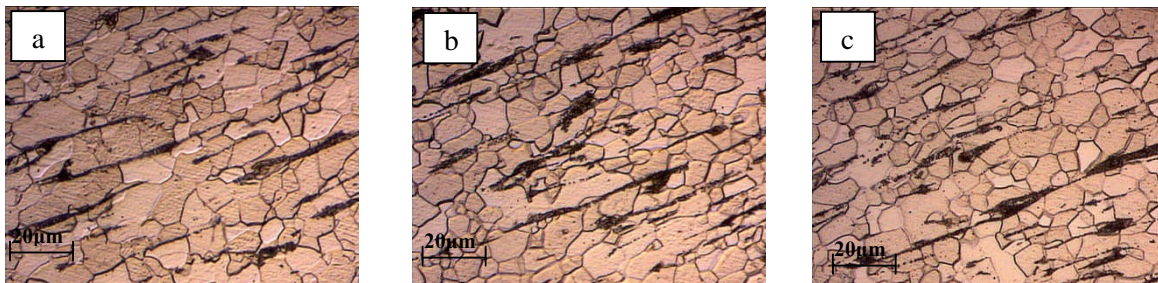
الشكل (III-22): الإنكسار المطيلي للسلك المغلف $\tau_w = 76\%$

4-3 الفحص المجهرى :

أستعمل المجهر الضوئي و المجهر الإلكتروني الماسح لفحص البنية المجهرية وتحديد الحجم الحبيبي وكذلك فحص سطوح الإنكسار.

1- البنية المجهرية :

يبين الشكل (III-23) البنية المجهرية للأسلاك المغلفة $\tau_w=81\%$ و $\tau_w=76\%$ و $\tau_w=70\%$. يُلاحظ أنها دوماً من النوع (فريت , برليت) ووجد أن نسبة البرليت لم تتغير بالنسبة للحالة الابتدائية ($P=8.20\%$) وزناً. يظهر تأثير سحب الأسلاك على مناطق البرليت و تحت تأثير محلول التتميش تكون مناطق البرليت داكنة بينما حبيبات الفريت مضيئة.



الشكل (III-23) : البنية المجهرية للأسلاك المغلفة

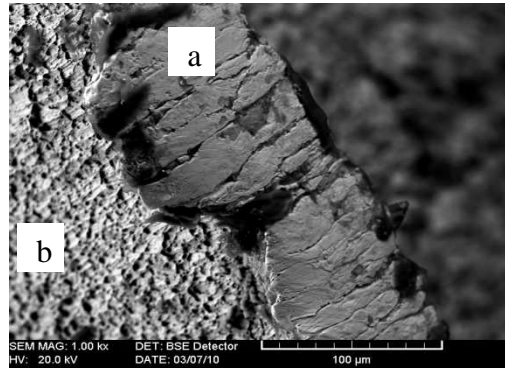
(a) : $\tau_w=70\%$ و (b) : $\tau_w=76\%$ و (c) : $\tau_w=81\%$

يوضّح إتجاه رقائق السّمنتيت (مناطق البرليت) الإتجاه الإبتدائي للسّحب. يختفي هذا الإتجاه بالنّسبة لحبيبات الفريت حيث تمّ إعادة بلورتها تمامًا نتيجة المعالجة الحرارية التي تسبق غمس الأسلاك في حمام الزنك. للتذكير تتمثل هذه المعالجة الحرارية في التسخين إلى درجة الحرارة 850 C° لمدة زمنية تقدر بـ 26s ثم تبريد الأسلاك بواسطة الماء درجة حرارته (25°C) .

يلاحظ وجود تقارب في الحجم الحبيبي للأسلاك الثلاثة بعد إعادة بلورتها. أعطى قياس الحجم الحبيبي للطور الفيبريتي القيم $5\mu\text{m}$ و $6\mu\text{m}$ و $7\mu\text{m}$ للأسلاك المغلفة ذات القطر $(\Phi = 2.4\text{mm})$ و $(\Phi = 2.7\text{mm})$ و $(\Phi = 3\text{mm})$ على الترتيب.

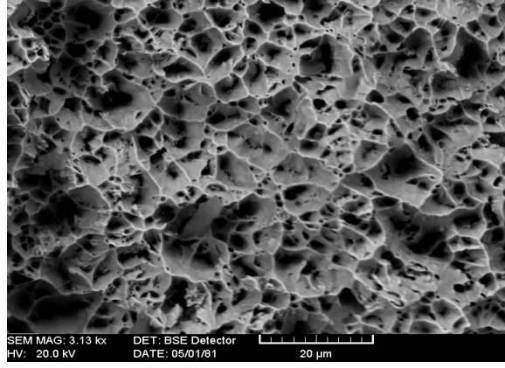
2- فحص السطوح المنكسرة بالمجهر الإلكتروني الماسح (SEM):

يوضّح الشّكل (III-24) البنية المجهرية الإلكترونية لسطح السّلك المغلف $\tau_w = 76\%$ بعد إنكساره. تظهر منطقة انكسار السطح الخارجي لطبقة الغلّفة (a) داكنة اللون بينما تكون منطقة انكسار الفولاذ مضيئة (b). يُلاحظ أن انكسار السطح الخارجي لطبقة الغلّفة يختلف عن انكسار الفولاذ وهو يشبه الانكسار الهش. تؤكد الدراسة [129] أن الزنك ينكسر انكسارًا هشًا.



الشّكل (III-24) : سطح إنكسار السّلك المغلف $\tau_w = 76\%$

يُعطي الشّكل (III-25) تكبيرًا للمنطقة b وهو سطح انكسار الفولاذ ويظهر على شكل ثقوب إهليجية نوعا ما وهذا ما يعرف بالانكسار المطيلي. يلاحظ أن الثقوب لا تحتوي بداخلها كذلك على أي نوع من الترسبات. تجدر الإشارة إلى أنّ حجوم هذه الثقوب أصغر من تلك الخاصّة بالحالة الإبتدائية دون الغلّفة وهي قريبة جدًا من تلك الخاصّة بالأسلاك قبل الغلّفة.



الشكل (III-25) : البنية المجهرية الإلكترونية للمنطقة (b)

نسبة الإنكسار السلك المغلف $\tau_w = 76\%$

3-5 طبقة الغلظة :

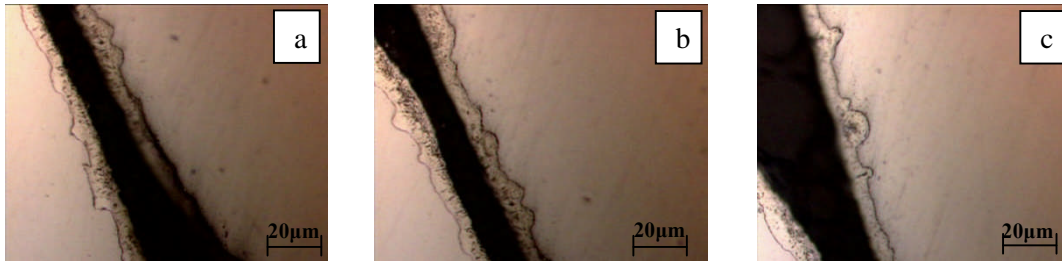
➤ يوضح الشكل (III-26) البنية المجهرية الضوئية لطبقة الغلظة للأسلاك الثلاثة. يتراوح السمك المتوسط لطبقة الغلظة للأسلاك الثلاثة بين $8\mu\text{m}$ و $17\mu\text{m}$ ، مع ملاحظة أن التغير في سمك طبقة الغلظة يظهر كذلك في السلك الواحد. وُجد أن السمك الأدنى لطبقة الغلظة لضمان حماية الفولاذ من التآكل يكون مساويا إلى $10\mu\text{m}$ [127]. يمكن أن نستنتج أن غلظة هذه الأسلاك في شركة **Trifisoud** لا تحقق الشرط الأدنى لسمك طبقة الغلظة مما قد يؤثر على إنتاج الأسلاك المغلفة و استعملاتها تأثيرا سلبيا. يرجع سبب عدم الانتظام في طبقة الغلظة عادة إلى عدة عوامل من بينها :

أولا : التحضير السيئ لسطح الأسلاك.

ثانيا : زمن الغمس في حمام الزنك.

ثالثا : سرعة الغمس.

رابعا : التركيب الكيميائي لحمام الزنك.



الشكل (III-26) : مقطع قاعدي لطبقة الغلظة للأسلاك

(a) : $\tau_w=70\%$ و (b) : $\tau_w=76\%$ و (c) : $\tau_w=81\%$

❖ يؤدي التحضير الجيد لسطح الأسلاك قبل الغمس في حوض الزنك إلى تشجيع التفاعل بين الزنك والسائل والفولاذ وتكوين طبقة غلظة متجانسة ومنظمة. يتمثل هذا التحضير في تنظيف السطح

بالماء و بمحلول NaOH و بمحلول HCL وكذلك التأكد من زوال بقايا الأكاسيد الناتجة عن المعالجة الحرارية في الفرن.

- ❖ وجدت الدراسة [130] انه للحصول على طبقة منتظمة و ذات سمك يُقدر بـ 20µm يجب أن يكون زمن الغمس مساويا إلى 45sec. يعتبر زمن الغمس للأسلاك قيد الدراسة (الجدول II-3 - الفصل الثاني) والذي يتراوح بين 12 و 14 ثانية غير كافٍ للحصول على طبقة منتظمة ذات سمك معتبر.
- ❖ تلعب سرعة مرور الأسلاك في حوض الزنك دوراً كبيراً للحصول على طبقة غلغنة منتظمة . يعتمد المهندسون في Trifisoud على علاقة تجمع بين سرعة مرور الأسلاك في حوض الزنك (V(m/min)) و قطر الأسلاك (Φ (mm)) للحصول على طبقة غلغنة منتظمة [131] وهي:

$$V \cdot \Phi = 75 \dots \dots \dots (III-13)$$

يلخص الجدول (III-9) قيم العلاقة III-17 للأسلاك قيد الدراسة المغلغنة في شركة Trifisoud . يلاحظ انه لم يتم التقيد بدقة بهذه العلاقة بالنسبة لعملية غلغنة الأسلاك قيد الدراسة.

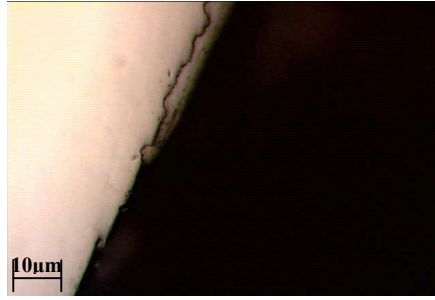
Φ(mm)	V(m/min)	Φ . V
3	25	75
2.7	27	≈73
2.4	31	≈74

الجدول (III-9): العلاقة بين V و Φ للأسلاك المغلغنة بـ Trifisoud

- ❖ بيّنت الدراسة [124] أن الفولاذ ذو التركيب الكيميائي (C=0.05% و Si=0.01%) له طبقة غلغنة أكثر انتظاماً مقارنة مع الفولاذين ذوا التركيب الكيميائي (C=0.25% و Si=0.12%) و (C=0.08% و Si=0.025%). إن هذا يؤكد أن انخفاض نسبة C و Si في الفولاذ يساعد على الحصول على طبقة غلغنة منتظمة. نذكر بنسبة Si في الفولاذ قيد الدراسة وهي 0.08% وتعتبر عالية نوعاً ما للحصول على سمك منتظم لطبقة الغلغنة.

اهتمت الدراسة [132] كذلك بتأثير نسبة الألمنيوم (Al) في حمام الزنك على انتظام طبقة الغلغنة. وُجد أن إضافة Al % (0.1-0.2) لحوض الزنك يعطي طبقة منتظمة للغلغنة. وجدت الدراسة [133] كذلك انه من الضروري إضافة عنصري المنغنيز (Mn) والنيكل (Ni) إلى حوض الغلغنة عند غلغنة فولاذ يحتوي على نسبة معتبرة من Si لتجنب الحصول على طبقة غلغنة غير منتظمة. نشير إلى أن التركيب الكيميائي لحمام الزنك في شركة Trifisoud خالٍ من Al و Mn و Ni.

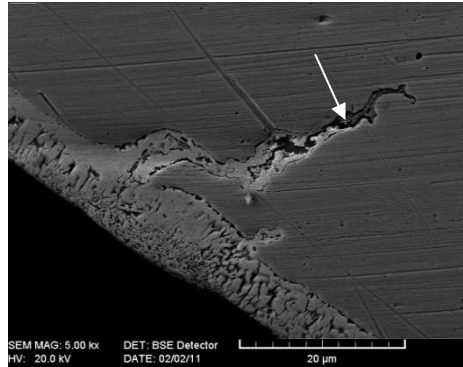
➤ يوضح الشكل (III-27) مظهر آخر لطبقة الغلفنة. يلاحظ غياب طبقة الغلفنة في بعض المناطق من سطح السلك. يعتبر غياب طبقة الغلفنة من أهم المشاكل التي تواجهها صناعة الأسلاك المغلفنة نظرا لغياب الهدف الأساسي من الغلفنة وهو حماية الأسلاك ضد التآكل. أرجعت الدراسة [134] غياب طبقة الغلفنة إلى عدم وجود تفاعل بين الفولاذ و الزنك السائل بسبب بقايا حبات الرمل الموجودة على سطح السلك. أكدت الدراسة [135] انه يمكن التخلي عن حبات الرمل بالغسل الجيد لسطح السلك بواسطة كربونات الصوديوم (Na_2CO_3) أو سيليكات الصوديوم (Na_2SiO_3). تؤكد هذه النتيجة مرة أخرى التحضير السلي لسطح الأسلاك قيد الدراسة قبل عملية الغلفنة.



الشكل (III-27): نموذج لغياب طبقة الغلفنة

في سطح السلك ($\tau_w=76\%$)

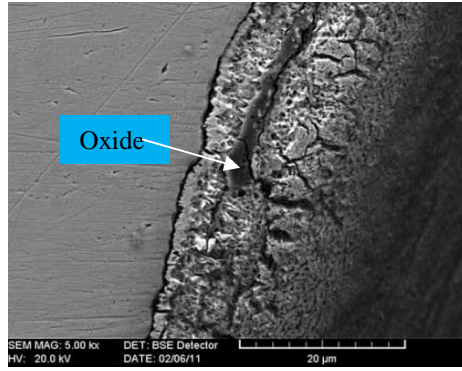
➤ يوضح الشكل (III-28) تأثير الأكاسيد الموجودة بالقرب من سطح الأسلاك على مظهر طبقة الغلفنة. يلاحظ توغل الزنك داخل السطح الفاصل بين الأكسيد والفولاذ. قد يرجع سبب وجود الشقوق عند السطح إلى الاختلاف في الخصائص الميكانيكية بين الفولاذ و الأكسيد (مثلا إجهاد حد المرونة) عند تصنيع الأسلاك قبل غلفتها.



الشكل (III-28): تأثير الأكسيد الموجود

قرب السطح على مظهر طبقة الغلفنة

يُبيّن الشكل (III-29) صورة أخرى لطبقة الغلفنة عند وجود الأكاسيد في جوار السطح الخارجي للسلك. يلتف الزنك السائل حول الأكسيد. تجدر الإشارة إلى أن هذه الأكاسيد موجودة في الفولاذ عند الاستقبال.



الشكل (III-29) : تأثير وجود الأكاسيد عند سطح

السلك على طبقة الغلفنة

➤ يوضح الشكلان (III-29-30) وجود تشققات في طبقة الغلفنة , وهو خليط من التشققات العرضية والطولية . تظهر هذه التشققات في طبقة الغلفنة وتنتهي عند الوصول إلى الفولاذ. يمكن إرجاع وجود هذه التشققات في طبقة الغلفنة عادة إلى عدة عوامل من بينها :

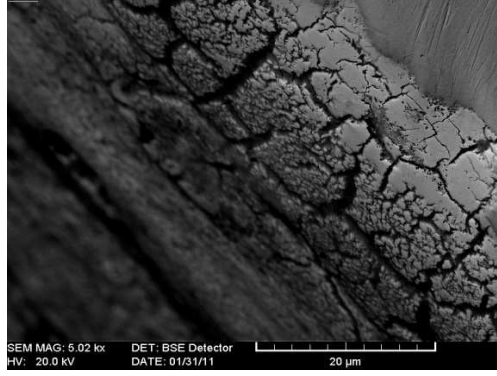
أولا : المعالجة الحرارية للأسلاك بعد غلفتها.

ثانيا : المكونات الطورية للطبقة.

ثالثا : درجة حرارة حمام الزنك.

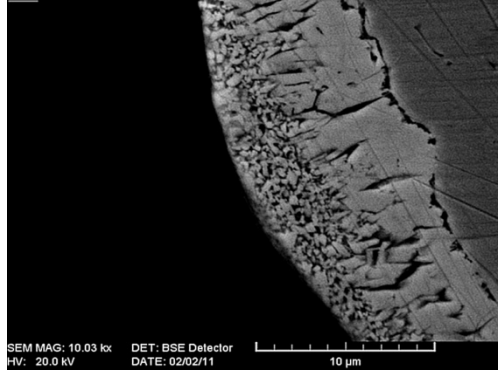
رابعا : التركيب الكيميائي للفولاذ.

❖ تظهر هذه التشققات مباشرة عند خروج الأسلاك من حوض الغلفنة (مرحلة التبريد بالمرشات) بسبب الاختلاف في معامل التمدد الحراري بين الفولاذ وطبقة الغلفنة [136]. يُؤد التبريد بالرش بالماء (وهو سريعا نوعا ما) اجهادات داخلية سببها تقلص طبقة الغلفنة أثناء تجمُّدها. تجدر الإشارة إلى أن إجهاد حد المرونة لـ Zn يساوي 70N/mm^2 [133] وهو اقل من إجهاد حد المرونة للفولاذ قيد الدراسة (300N/mm^2). تعتبر إذن طبقة الغلفنة أول من يتأثر بالاجهادات الداخلية نتيجة التبريد [137]. وُجد أن الرفع من سرعة التبريد يمنع من مواصلة انتشار الحديد عبر طبقة الغلفنة مما يزيد كذلك من هشاشتها [138].



الشكل (III-30) : التَشَقَّقات في طبقة الغلفنة

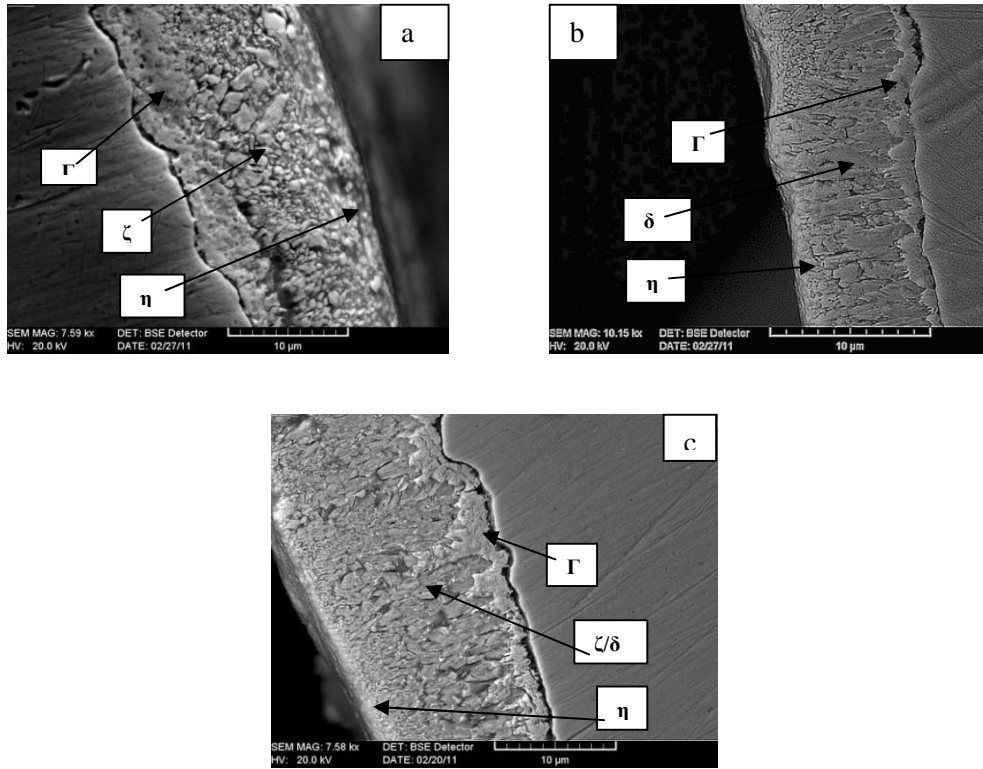
- ❖ نذكر أن طبقة الغلفنة تتكون عادة من عدد من الأطوار هي Γ و δ و ζ و η . أثبتت الدراسة [139] أن التَشَقَّقات لها علاقة بوجود وغياب الأطوار في طبقة الغلفنة. يساعد مثلا وجود الطور ζ الطور δ على الإحتفاظ باجهادات ثانوية تؤدي إلى ظهور التَشَقَّقات في طبقة الغلفنة.
- ❖ يمكن ظهور التَشَقَّقات وعدم الترابط في طبقة الغلفنة بسبب إرتفاع درجة حرارة حمام الزنك أعلى من 450°C . بيّنت الدراسة [140] ظهور التَشَقَّقات في طبقة الغلفنة عند الرفع في درجة حرارة حوض الغلفنة من 450°C إلى 480°C .
- ❖ يؤثر وجود الفوسفور في الفولاذ تأثيراً كبيراً على طبقة الغلفنة ولو كانت نسبته ضئيلة . تتجمع ذرات الفوسفور في الحد الفاصل بين δ و ζ محدثة تشققات في الطبقة δ [141]. تجدر الإشارة إلى أن نسبة الفوسفور في الفولاذ قيد الدراسة تقدر بـ 0.012% ، قد تعتبر كافية لظهور التَشَقَّقات في طبقة الغلفنة.
- يُبيّن الشّكل (III-31) عدم التحام طبقة الغلفنة بسطح السلك الفولاذي . يساعد توغل محلول الصقل وكذلك محلول التّتميش في السطح الفاصل بين الفولاذ وطبقة الغلفنة على إضعاف الالتحام. يرجع عدم التحام طبقة الغلفنة بالفولاذ عادة إلى وجود بقايا الأكاسيد على سطحه ويكون مصدرها المراحل السابقة لتنظيف سطح الأسلاك . تعمل كذلك بقايا الأكاسيد كحاجز أمام انتشار الحديد والزنك. قد يظهر بعض الأكاسيد عند غمس الأسلاك في حوض الغلفنة. يعمل وجود كلوريد الزنك ZnCl_2 (مرحلة تحضير سطح الأسلاك) على مهاجمة الأكاسيد الموجودة على سطح الأسلاك (قبل الغمس في حوض الغلفنة) وتشكيل مركبات كيميائية أخرى على سطح الأسلاك بدلا من الأكاسيد. هذه المركبات لا تمنع انتشار الحديد في الزنك السائل.



الشكل (III-31): نموذج لعدم التحام طبقة الغلفنة بالفولاذ

وُجد [142،143] أن الإرتفاع في درجة حرارة الأسلاك عند إدخالها في الحوض يؤدي إلى تفكيك $ZnCl_2$ فتظهر الأكاسيد على سطح الأسلاك مرة أخرى بمعنى آخر أن تفكيك $ZnCl_2$ لا يعيق تشكيل الأكاسيد. يجب إذن التحكم في درجة حرارة حوض الزنك و زمن غمس الأسلاك لمنع تحلل $ZnCl_2$.

يبيّن الشكل (III-32) طبقة الغلفنة بعد عملية التتميش بمحلول النيتال 3% Nital للأسلاك المغلفنة $\tau_w=70\%$ و $\tau_w=76\%$ و $\tau_w=81\%$. تتكون طبقة الغلفنة من ثلاثة أطوار مختلفة السمك و الشكل. يتراوح سمك الطور الداخلي (و هو الأقرب لسطح الفولاذ أي Γ) بين $1\mu m$ و $5\mu m$ وسمك الطور الخارجي (الأبعد عن سطح الفولاذ أي η) بين $1\mu m$ و $2\mu m$. بينما يتراوح سمك الطور (δ أو ζ) الذي يتوسط الطورين السابقين (أي Γ و η) بين $5\mu m$ و $13\mu m$ ويعتبر هذا الطور الأوسع في طبقة الغلفنة. تم الاعتماد على المشاهدة المجهرية فقط لتحديد نوع و سمك هذه الأطوار. يختلف سمك و شكل الطور المتوسط (ζ أو δ) بالنسبة للأسلاك الثلاثة ويكون واضحاً بالنسبة للسلك $\tau_w=70\%$ وتظهر حبيباته متعددة الأضلاع وغير مترابطة (الشكل III-32-a). أعطى المرجع [65] البنية المجهرية للأطوار المشكّلة لطبقة الغلفنة، و بيّن أنّ هذه البنية هي من مميزات الطور ζ . من جهة أخرى، أثبتت الدراسة [144] أن سبب تفكك الطور ζ إلى حبيبات غير مترابطة هو وجود Si في الفولاذ. يظهر كذلك الطور δ بمظهر شرائطي بالنسبة للسلك $\tau_w=76\%$ (III-32-b). تُدَلُّ البنية الشرائطية في طبقة الغلفنة على وجود الطور δ [65]. يلاحظ اختفاء المظهر الشرائطي نوعاً ما لهذه الحبيبات في السلك $\tau_w=81\%$ (III-32-c)، قد يكون هناك تراكب الطورين معا ζ و δ . يظهر الطور (η) في جوار نهاية طبقة الغلفنة وهو طور غني بالزنك [65].



الشكل (III-32): الأطوار المتشكلة في طبقة الغلغنة

(a) : $\tau_w=70\%$ و (b) : $\tau_w=76\%$ و (c) : $\tau_w=81\%$

6-3 الخاتمة الجزئية :

- ✓ تتكون البنية المجهرية للأسلاك المغلغنة من فريت و برليت.
- ✓ أثبتت الدراسة اختلاف الخصائص الميكانيكية للأسلاك المغلغنة عن الحالة الابتدائية وحالة الأسلاك (غير المغلغنة).
- ✓ يظهر سمك طبقة الغلغنة غير منتظماً في السلك الواحد و يكون في بعض الحالات اقل من $10\mu\text{m}$ وهذا السمك غير كافٍ لحماية الأسلاك الفولاذية من التآكل.
- ✓ يؤثر وجود الاكاسيد قرب السطح على التحام طبقة الغلغنة بالفولاذ.
- ✓ بينت الدراسة وجود تشققات في طبقة الغلغنة.
- ✓ تتطلب الغلغنة المراقبة الجيدة لـ :
- * درجة حرارة حوض الزنك وتركيبه الكيميائي ، حيث لا يجب أن تتعدى درجة حرارته 450°C .
- * التركيب الكيميائي للفولاذ و نقاوته.

4- إعادة البلورة الأولية

بيّنت دراسة البنية المجهرية للأسلاك الثلاثة أنها مختلفة عن البنية المجهرية الابتدائية. باعتبار أن بنية الأسلاك لا تحقق الاتزان الترموديناميكي إذن لابد من معالجتها حرارياً بهدف عودتها إلى حالة الاتزان الترموديناميكي. تتغير الخصائص البنيوية والميكانيكية للأسلاك تحت تأثير المعالجة الحرارية، تُعرف هذه المعالجة بالتلدين. يتمثل التلدين في تسخين العينات عند درجة حرارة ثابتة (T)، أقل من درجة حرارة التحول الطوري $\alpha \rightarrow \gamma$ و لفترات زمنية مختلفة. يُبرّد بعد ذلك العينات في ماء درجة حرارته عادية. يكون هذا التبريد سريعاً جداً بهدف المحافظة على نفس البنية المجهرية عند درجة الحرارة (T) ويُعرف بالسقاية.

تهتم هذه الدراسة بـ :

- تغيير النسبة الطورية ($X_v(\%)$) (نسبة الطور المعاد بلورته) بدلالة تغير زمن التلدين (t) عند درجة حرارة التلدين (T) وهذا ما يطلق عليه بحركية إعادة البلورة.
 - قياس صلادة العينات عند مختلف أزمنة التلدين (t) لمعرفة كيفية تأثرها بتغير النسبة الطورية ($X_v(\%)$) ثم حساب النسبة الطورية ($X_v(\%)$) بالاعتماد على قيم الصلادة المقاسة.
- تطرقت الدراسة كذلك إلى تأثير تغير درجة الحرارة على حركية إعادة البلورة و منحنيات الصلادة. أخيراً تم حساب طاقة النشاط اللازمة لإعادة البلورة الأولية.

1-4 الدراسة المجهرية :

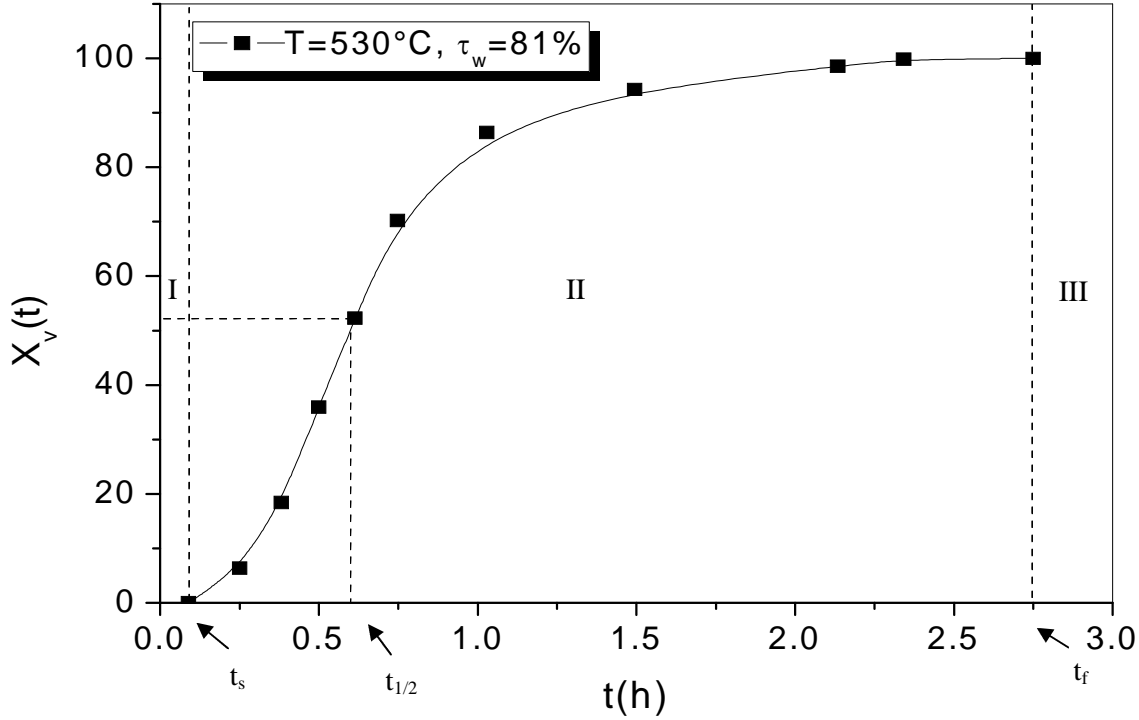
1-1-4 1-1-4 تغيير النسبة الحجمية للطور الجديد بدلالة الزمن عند درجة حرارة ثابتة :

يوضّح الشكل (III-33) النسبة الحجمية للطور الجديد ($X_v(\%)$) بدلالة الزمن t عند درجة حرارة $T=530^\circ\text{C}$ للسلك $\tau_w=81\%$.

ينقسم هذا المنحني إلى ثلاثة أجزاء رئيسية.

الجزء الأول (I) : يُحدد هذا المجال بزمن الحضانة وقيمته $t_s = 0.09 \text{ h}$. خلال هذا الجزء لا يظهر تنوي طور جديد. نلاحظ أنّ هذا الزمن مرتفع قليلاً إذا أخذ بعين الاعتبار درجة حرارة التلدين ($T=530^\circ\text{C}$) و نسبة التشوّه ($\tau_w=81\%$) المرتفعين.

الجزء الثاني (II) : هذا المجال محصور بين $t_s = 0.09 \text{ h}$ و $t_f = 2.73 \text{ h}$ يبدأ خلاله تنوي الطور الجديد ونموه. تؤكد البنية المجهرية الشكل (III-34-a) سيطرة الحبيبات المشوّهة (الممتدة باتجاه السحب) ووجود نسبة ضئيلة من الطور المعاد بلورته و تُقدر بـ 2% من اجل زمن تلدين يعادل 0.09h . وُجد أن سرعة التتوي تساوي 0.18h^{-1} عند الزمن 0.09 h. يمكن ملاحظة تغير في سرعة التتوي في هذا المجال.



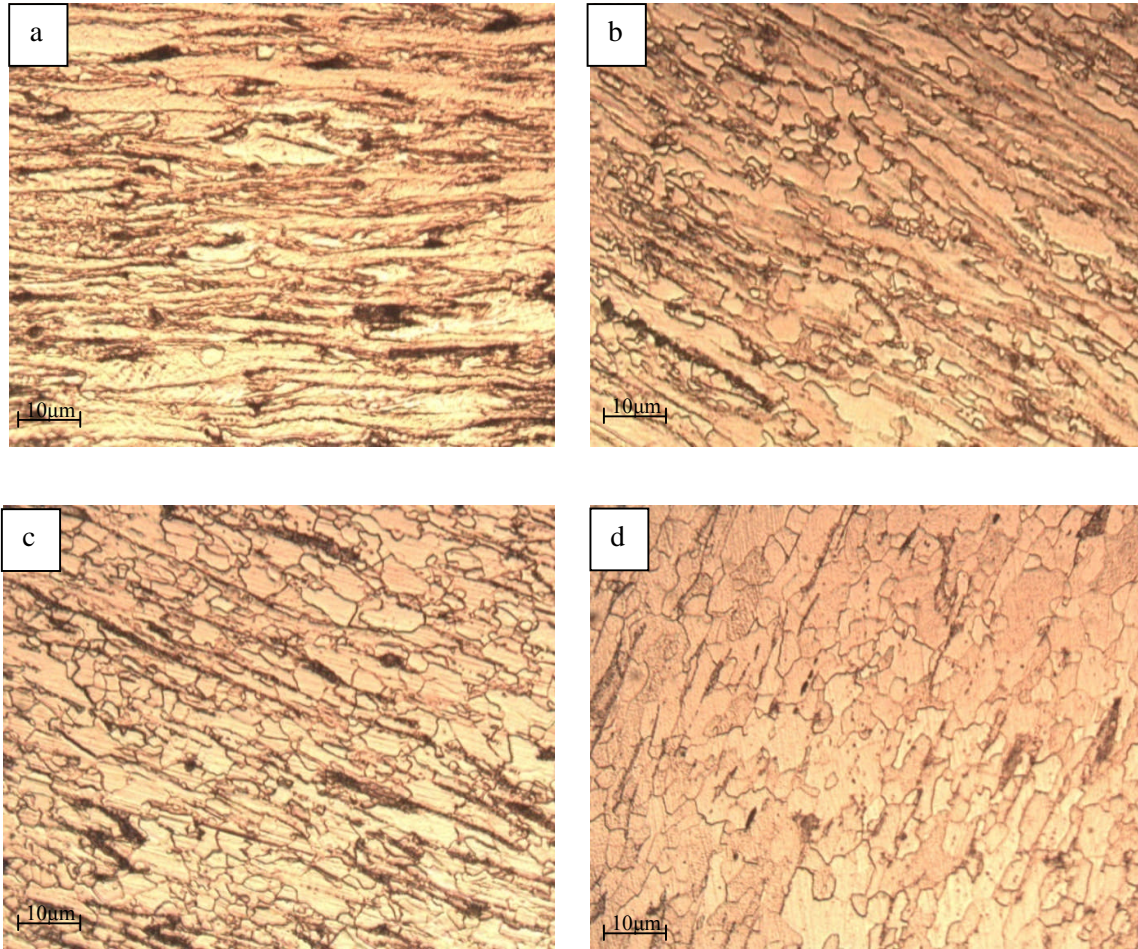
الشكل (III-33) : منحنى تغيير نسبة الطور المعاد بلورته بدلالة الزمن عند درجة

حرارة $T=530^\circ\text{C}$ لعينة نسبة تشوهها $\tau_w=81\%$

ترتفع سرعة التئوي مع تزايد الزمن لتصل إلى القيمة العظمى 2.92 h^{-1} عند 63% من الطور المعاد بلورته. تبين البنية المجهرية الشكل (III-34- b) وجود خليط من الحبيبات المشوهة (الطور الأم) الممتدة باتجاه السحب و حبيبات الطور المعاد بلورته (متعددة الأضلاع) عند زمن 0.53 h . يدل اختلاف حجم حبيبات الطور الجديد أن هناك حبيبات تعدت مرحلة التئوي. أي أن الحبيبات الكبيرة الحجم بدأت في النمو وقد تنوّت قبل الحبيبات الصغيرة الحجم. يستمر تنوّي و نموّ الطور الجديد بعد النسبة 63% لكن بسرعة متباطئة. يُظهر الشكل (III-34-c) بوضوح سيطرة الطور الجديد على البنية المجهرية عند $t = 0.9 \text{ h}$ والذي يوافق 80% من الطور المعاد بلورته. يُمكن ملاحظة، عند هذه النسبة (أي 80%) أن اتجاه سحب السلك عند تصنيعه يوافق اتجاه سحب مناطق البرليت. تنخفض سرعة التئوي إلى $0.002 \cdot 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ عند $t_f = 2.73 \text{ h}$. تجدر الإشارة هنا إلى أن 50% من الطور الأم قد تم إعادة بلورته عند $t_{1/2} = 0.58 \text{ h}$.

الجزء الثالث (III) : يبدأ هذا الجزء بعد نهاية إعادة البلورة الأولية أي عند $t_f = 2.73 \text{ h}$ وهو الزمن الموافق لتحول طوري مقداره 100%. يُلاحظ أن حبيبات الطور الجديد متعددة الأضلاع واختفاء شبه كلي للطور الأم وهي الحبيبات المستطيلة. من الواضح أن الحبيبات الصغيرة الحجم، بعد نهاية إعادة البلورة الأولية، هي الحديثة التئوي والنموّ و تكون قليلة العدد جدًا عند مقارنتها بعدد الحبيبات الكبيرة

الحجم. تبقى آثار سحب مناطق البرليت واضحة والتي تظهر بلون داكن (شكل III-34-d). عند زمن أعلى من t_f تبدأ مرحلة نمو حبيبات الطور الجديد وهو ما يعرف بإعادة البلورة الثانوية.



الشكل (III-34) : تغير البنية المجهرية بدلالة الزمن

لسلك ذو نسبة تشوه 81% عند درجة حرارة 530°C

0.09 h : (a) و 0.53 h : (b) و 0.9 h : (c) و 2.73 h : (d)

2-4 حساب الصلادة :

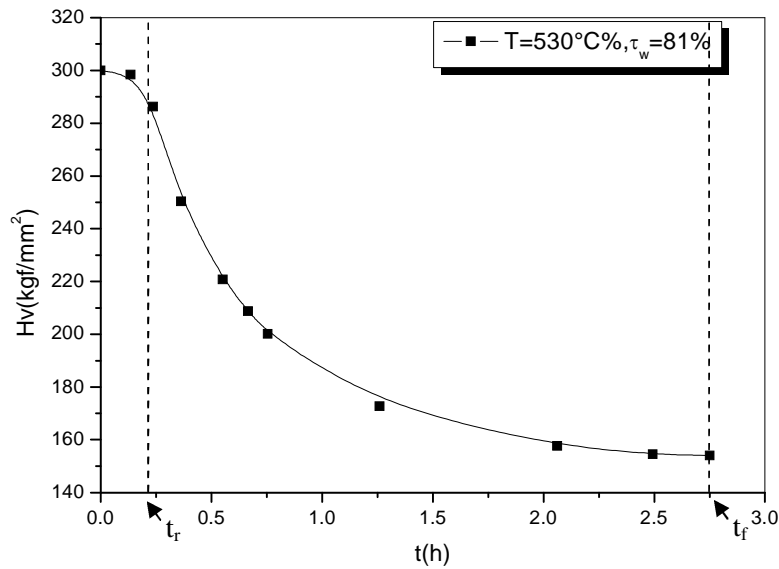
تم قياس صلادة العينات الموافقة لمنحني الشكل (III-33) للارتباط الوثيق بين الخواص الميكانيكية والبنية المجهرية. يبيّن الشكل (III-35) تغير صلادة Vickers بدلالة التلدين عند $T = 350^{\circ}\text{C}$. يحتوي هذا المنحني على جزئين.

الجزء الأول (I) : يمتدّ هذا الجزء لزمن أقل من $t = 0.21 \text{ h}$. يلاحظ تغير طفيف في قيم الصلادة في هذا الجزء و تكون نسبة تنوّي ونموّ الحبيبات الجديدة ضئيلة جداً. تُعرف هذه المرحلة بمرحلة الترميم أين يحدث خلالها إعادة توزيع وترتيب الإنخلاعات، مثلاً يتمّ إلغاء الإنخلاعات الطرفية المتعكسة في

الإشارة. يجب الإشارة إلى أن المجهر الضوئي لا يستطيع مشاهدة التوتيات الصغيرة جدًا عند بداية ظهورها، بينما قد يظهر تأثيرها على قيم الصلادة المجهرية.

الجزء الثاني (II) : هذا المجال محصور بين $t = 0.21$ h و $t_f = 2.75$ h. يلاحظ الانخفاض السريع في قيمة الصلادة مع ارتفاع الزمن. وُجد أن سرعة الانخفاض تصل إلى $262.30 \text{ kgf/mm}^2 \cdot \text{h}$ عند الزمن 0.21 h و إلى $113.07 \text{ kgf/mm}^2 \cdot \text{h}$ عند الزمن 0.6 h. توصل السرعة بعد ذلك في الانخفاض حتى $t_f = 2.73$ h. يؤكد هذا الانخفاض في قيمة الصلادة إرتفاع نسبة الطور المعاد بلورته (الشكل 33-III). تعرف هذه المرحلة بمرحلة إعادة البلورة الأولية. يلاحظ وجود اختلاف واضح بين سرعة التتوي و سرعة انخفاض الصلادة. تكون سرعة انخفاض الصلادة أعظمية حتى زمن $t = 2$ h و تبقى الصلادة ثابتة بعد ذلك الزمن.

الجزء الثالث (III) : يبدأ بعد t_f وهو الزمن الموافق لتحول طوري مقداره 100% . تصل الصلادة إلى $H_v = 154 \text{ Kgf/mm}^2$ وهي صلادة الطور المعاد بلورته. تجدر الإشارة إلى أن قيمة صلادة الفولاذ عند الاستقبال تساوي $H_v = 153 \text{ Kgf/mm}^2$ وهذا يؤكد عودة الفولاذ إلى حالة الاتزان الترموديناميكي بعد تمام إعادة البلورة الأولية.



الشكل (III-35) : منحنى تغير الصلادة H_v بدلالة الزمن

2-2-4 حساب النسبة الطورية إنطلاقاً من الصلادة :

حاول العديد من الباحثين حساب النسبة الطورية المعاد بلورتها بالإعتماد على قياس الصلادة بدلا من إستعمال المجهر الضوئي وهذا لسهولة وقلة الوقت الذي تستغرقه [145]. يمكن إستنتاج النسبة الطورية بعد حساب الصلادة H_v عند مختلف الأزمنة إنطلاقاً من العلاقة التالية :

$$X_v(t) = \frac{Hv_i - Hv(t)}{Hv_i - Hv_f} \dots\dots\dots(III-14)$$

حيث:

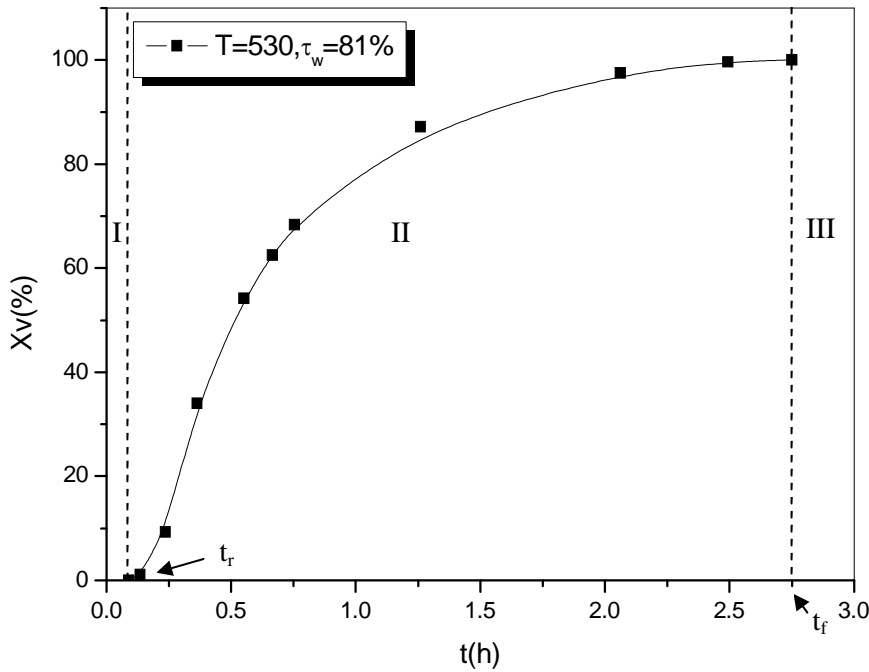
$X_v(t)$: النسبة الحجمية للطور المُعاد بلورته.

Hv_i : الصلادة المجهرية للبنية الإبتدائية (قبل إعادة البلورة).

$Hv(t)$: الصلادة المجهرية من أجل زمن تلدن t .

Hv_f : الصلادة المجهرية النَّهائية عند تمام التلدين.

يبين الشكل (III-36) تغيّر النسبة الطورية بدلالة الزمن عند درجة حرارة 530°C لأجل نسبة تشوّه $\tau_w=81\%$. يمكن تقسيم هذا المنحني إلى ثلاثة أجزاء توافق أجزاء الشكل (III-33).



الشكل (III-36) : منحني تغيّر نسبة الطور المُعاد بلورته بدلالة الزمن مُستنتج من الصلادة

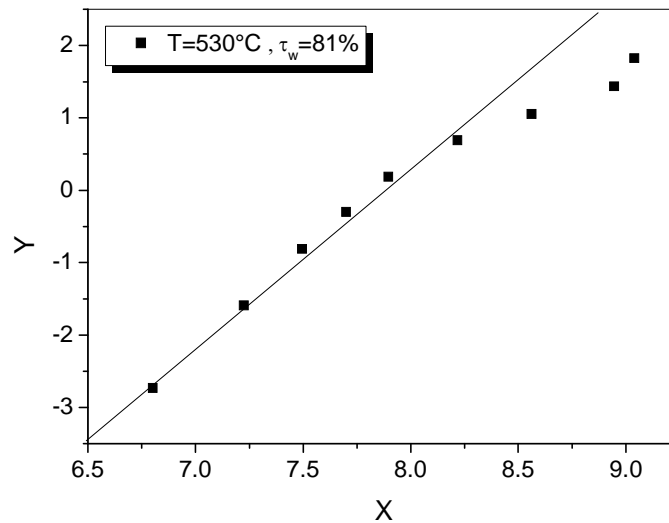
الجزء الأول (I) : يُحدد هذا المجال بزمن الترميم وقيّمته $t = 0.21\text{h}$, عند زمن أقل من $t = 0.21\text{h}$ تكون نسبة تنوي الطور الجديد ضئيلة بمعنى ليس لها تأثير على تغيّر الصلادة (شكل III-33).

الجزء الثاني (II) : هذا المجال محصور بين $t = 0.21\text{h}$ و $t_f = 2.73\text{h}$. حسب هذا المنحني، تكون سرعة التنوي أعظمية عند $t = 0.36\text{h}$ وهي مساوية إلى 1.96h^{-1} . تتخفّض سرعة التنوي بعد $t = 0.36\text{h}$ مع ارتفاع الزمن إلى أن تتعدم عند $t_f = 2.73\text{h}$. يلاحظ وجود اختلاف بين المنحني في الشكل (III-33) و هذا المنحني. يرجع هذا إلى اختلاف الطريقتين المستعملتين في حساب النسبة الطورية. يتم إعادة بلورة 50% من الطور الجديد عند الزمن $t_{1/2} = 0.51\text{h}$. يلاحظ اختلاف في هذا الزمن بين منحنى الشكل

(III-33) وهذا المنحني. ينخفض مثلا هذا الزمن من القيمة 0.58 h إلى القيمة 0.51 h، قد يرجع هذا الفرق إلى الاختلاف في الطريقتين المستعملتين لإستنتاج X_v .

الجزء الثالث (III) : يبدأ بزمن نهاية إعادة البلورة الأولية $t_f = 2.73$ h وهو الزمن الموافق لتحول طوري مقداره 100%.

3-4 معاملا JMAK : يمكن استخراج معاملا JMAK إنطلاقا من معادلة Avrami [105] التي تعطي تغيّر النسبة الطورية بدلالة الزمن عند درجة حرارة ثابتة. يتم تحديد المعاملان n و k بالاعتماد على العلاقة (I-39). يُبين الشكل (III-37) نموذج الدالة الخطية للسلك $\tau_w=81\%$ عند درجة حرارة 530°C .



الشكل (III-37) : تحديد n و k

يعطى الجدول (III-10) قيم n و k للأسلاك الثلاثة.

τ_w (%)	n	k
70	1.54	0.023
76	1.60	0.015
81	2.21	0.030

الشكل (III-10) : قيم معاملا n و k

يبين الجدول (III-10) ارتفاع قيمة n مع زيادة نسبة التشوه. أثبتت الدراسة [117] التي تمت على فولاذ يحتوي على 0.05% C عند 480°C ، ارتفاع قيمة n مع زيادة نسبة التشوه حيث أعطت عند نسبة تشوه 83% قيمة لـ n تقدر بـ 4.05. قد يرجع الاختلاف في قيمة n إلى التغير في درجة حرارة إعادة البلورة الأولية. أثبتت الدراسة [144] أن الارتفاع في درجة الحرارة من 590°C إلى 630°C عند إعادة بلورة فولاذ مشوه بنسبة 80% يؤدي إلى انخفاض قيمة n من 2.56 إلى 1.76. وُجد في دراسات أخرى تمت

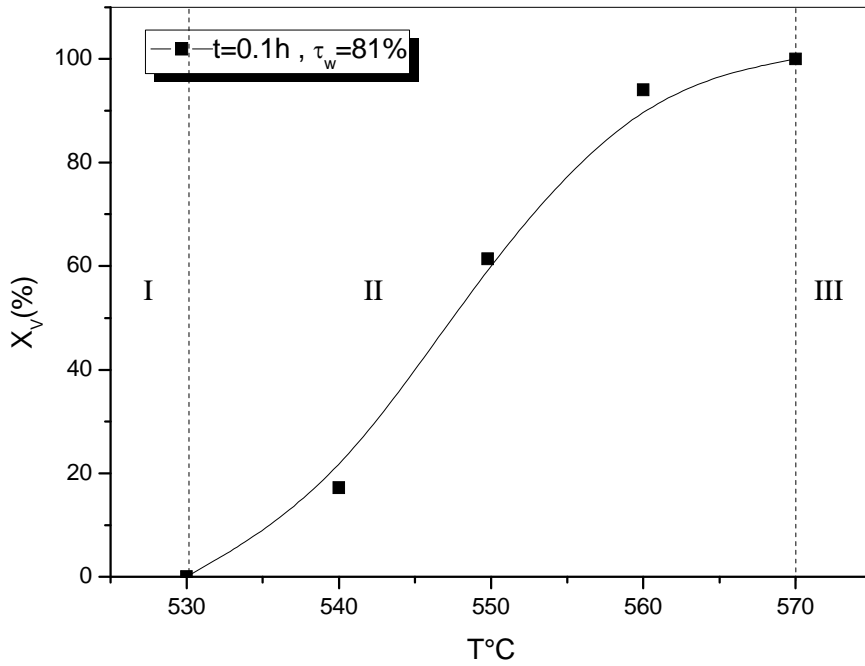
على صفائح فولاذية مدرفل على البارد و يحتوي على النيوبيوم (Nb) والألمنيوم والحديد [146,147,148] أن قيمة n لا تتغير مع نسبة التشوه و هي مساوية إلى الواحد.

يلاحظ أن قيم k للأسلاك الثلاثة تتغير مع ارتفاع نسبة التشوه. غير أن الدراسة [144] أثبتت أن الارتفاع في نسبة التشوه من القيمة 70% إلى القيمة 90% يؤدي إلى انخفاض k من $8.17 \cdot 10^{-3}$ إلى $3.56 \cdot 10^{-4}$.

4-4 تغير النسبة الحجمية للطور الجديد بدلالة درجة حرارة عند زمن ثابت:

يوضح الشكل (III-38) منحنى تغير النسبة الطورية (X_v) بدلالة درجة الحرارة (T) عند زمن قدره 0.1 h (6 min) للسلك $\tau_w = 81\%$. تم اختيار هذا الزمن لربح الوقت عند إجراء التجربة. يُشبه تغير هذا المنحنى منحنى الشكل (III-33)، وهي طريقة أخرى لدراسة حركية إعادة البلورة. ينقسم هذا المنحنى إلى ثلاثة أقسام :

القسم الأول (I) : يبدأ فيه تنوي الطور الجديد عند درجة حرارة $T_s = 530^\circ\text{C}$.



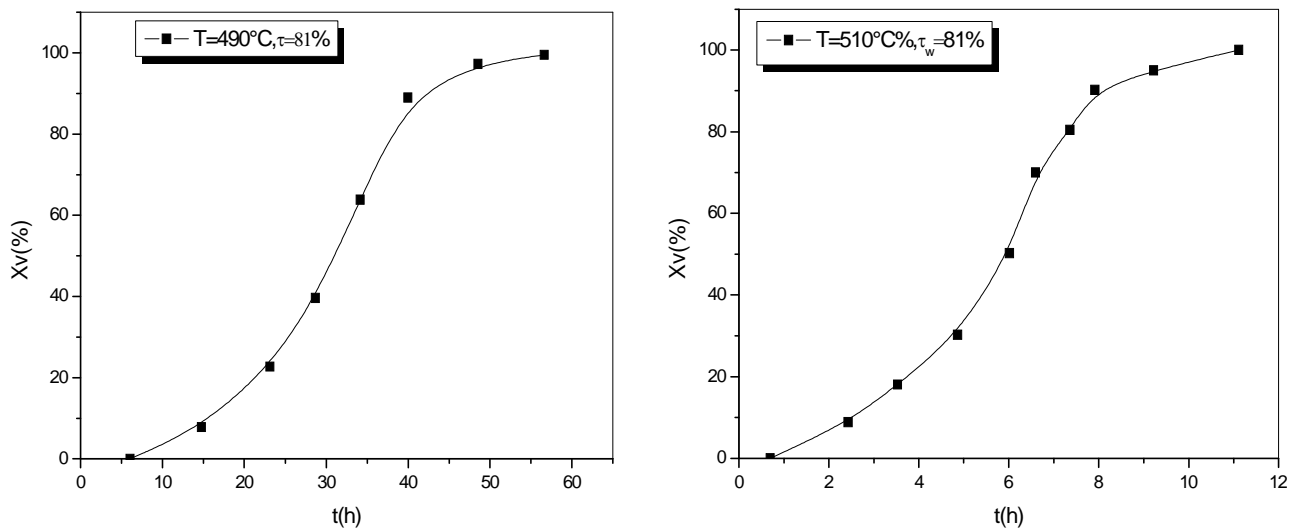
الشكل (III-38) : منحنى تغير X_v (%) بدلالة T

القسم الثاني (II) : يحدث فيه تنوي ونمو نويات الطور الجديد لكن بسرعات مختلفة حتى درجة الحرارة $T_f = 570^\circ\text{C}$. يتم إعادة بلورة 50% من الطور الجديد عند $T_{1/2} = 549^\circ\text{C}$. يلاحظ ارتفاع في سرعة التنوي مع ارتفاع درجة الحرارة وتبلغ قيمتها العظمى عند درجة حرارة $T = 550^\circ\text{C}$ الموافقة لما يعادل 61% من الطور المعاد بلورته.

القسم الثالث (III) : عند درجة الحرارة $T_f = 570^\circ\text{C}$ نحصل على 100% من التحول الطوري.

2-1-4 تأثير تغير درجة الحرارة على حركية إعادة البلورة الأولية :

تعمل الصناعة دوماً على تخفيض زمن إعادة البلورة الأولية. يجب إذن معرفة تأثير تغير درجة حرارة التلدين على إعادة البلورة الأولية لاختيار درجة الحرارة والزمن المناسبين. يوضح الشكل (III-39) حركية إعادة البلورة لسلك ذو نسبة تشوه 81% عند درجتي حرارة 510°C و 490°C. يُمكن ملاحظة تغير في t_s و t_f و $t_{1/2}$ و مقارنتهم مع نفس الأزمنة عند درجة الحرارة 530°C. ترتفع هذه الأزمنة السالفة الذكر كلما إنخفضت درجة الحرارة. يلاحظ مثلاً تغير t_s من 0.09 h و 0.75 h و 5.15 h عند درجة الحرارة 530°C إلى 510°C و 490°C على التوالي. يرتفع كذلك t_f من 2.75h إلى 11.1 h عند انخفاض درجة الحرارة من 530°C إلى 510°C على التوالي.

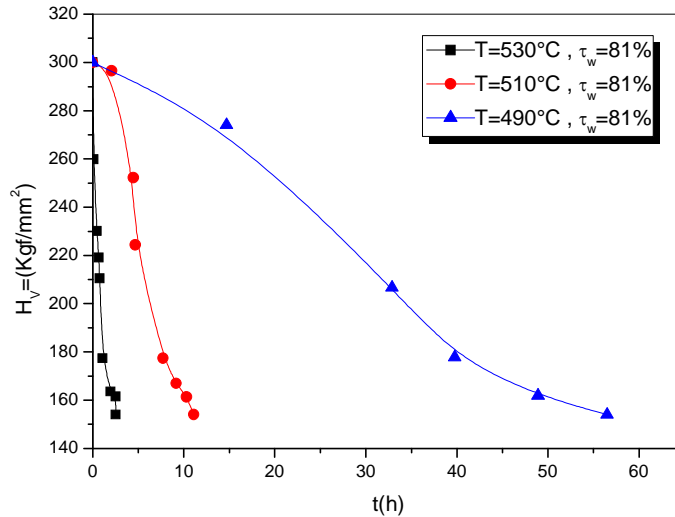


الشكل (III-39) : منحنى تغير (X_v) بدلالة t

إن الإنخفاض في درجة الحرارة بـ 20°C (بين 530°C و 510°C) يكافئ ارتفاع في الزمن يوافق 8.65 h و هو يتعدى عدد ساعات العمل ليوم واحد. إذن من المتوقع أن المهندسون في المصنع يُفضلون رفع درجة حرارة التلدين بـ 20°C فقط بدلا من رفع زمن التلدين بأكثر من 8 ساعات.

1-2-4 تأثير تغير درجة الحرارة على منحنيات الصلادة :

يُمثل الشكل (III-40) منحنيات الصلادة لسلك ذو نسبة تشوه 81% عند درجات حرارة 530°C و 510°C و 490°C . يُلاحظ أن الشكل العام لتغير الصلادة مع الزمن متماثل تقريبا بالنسبة لدرجات الحرارة الثلاث.

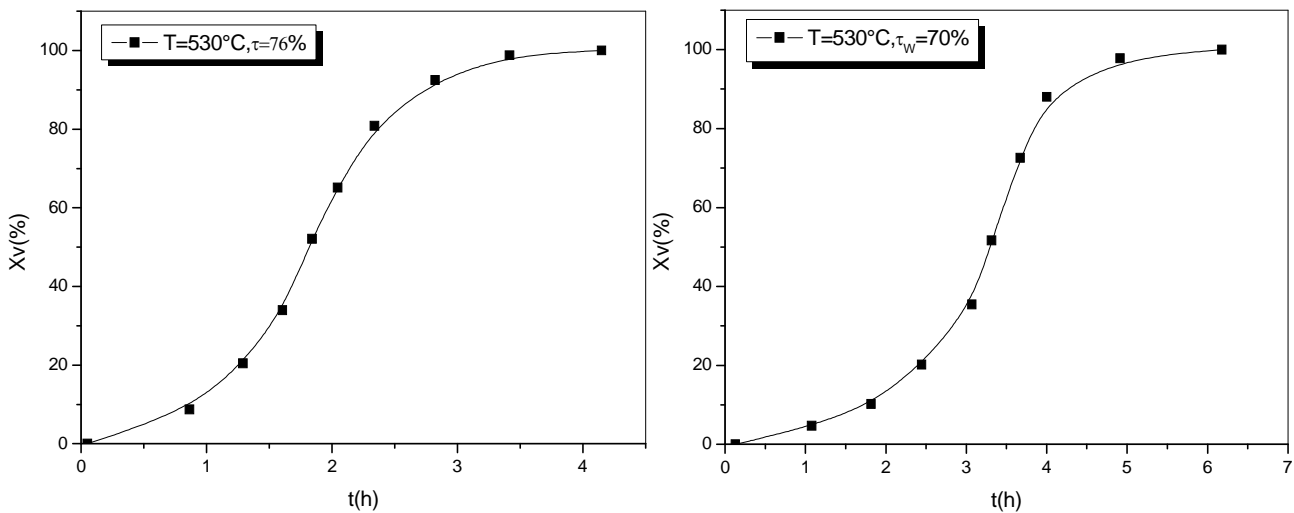


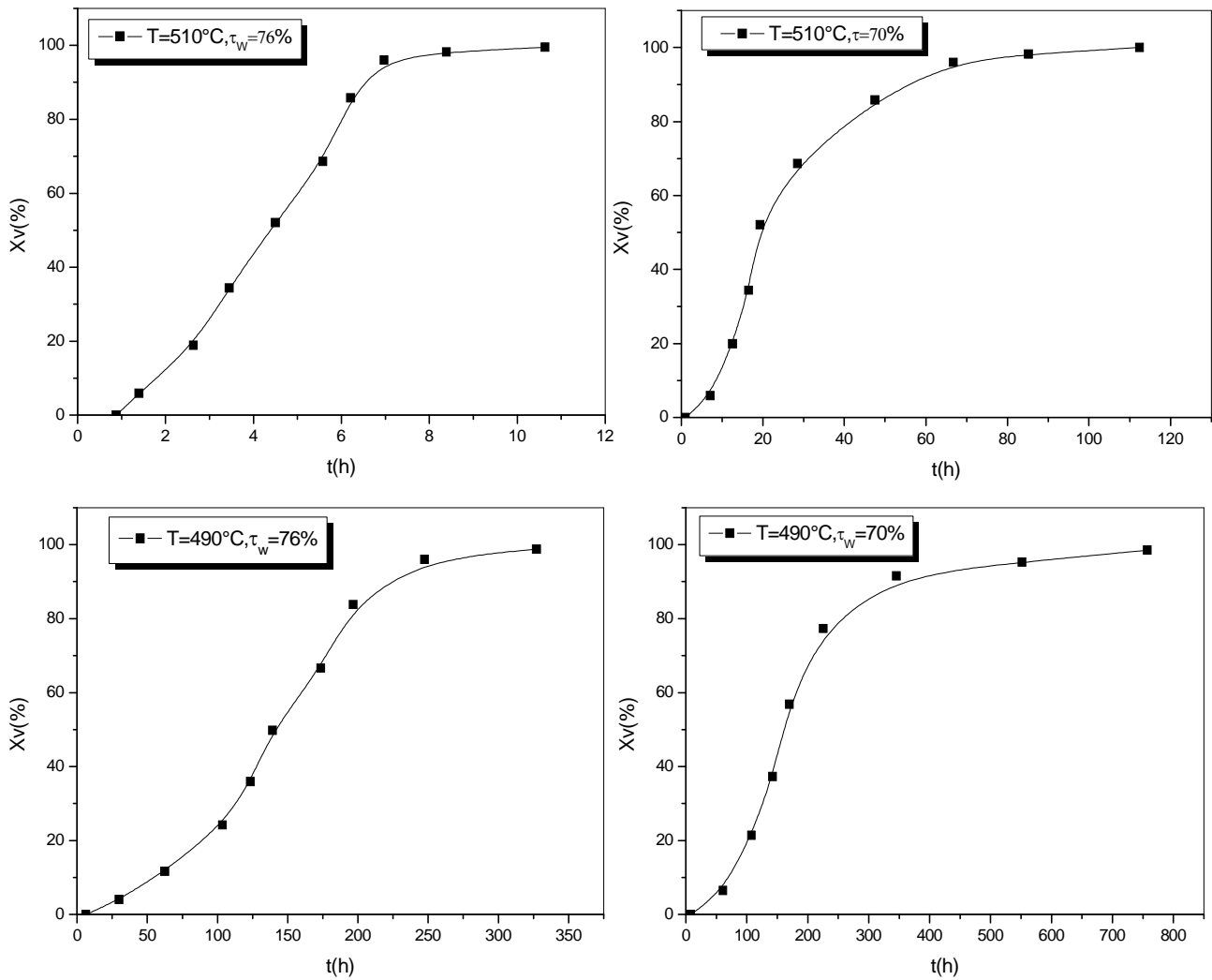
الشكل (III-40) : منحنيات الصلادة بدلالة الزمن

إن سرعة الانخفاض في الخواص الميكانيكية (قيم الصلادة) يكون حاداً جداً مع ارتفاع درجة الحرارة. هذه السرعة متقاربة نوعاً ما بالنسبة لـ 530°C و 510°C غير أنها مختلفة تماماً بالنسبة لـ 490°C . يلاحظ انخفاض في الصلادة (الخواص الميكانيكية) بـ 50% (أي $H_v = 227 \text{ kgf/mm}^2$) عند الأزمنة 0.54 h و 4.65 h و 30.1 h لدرجات الحرارة 530°C و 510°C و 490°C على التوالي. إذن، من المرجح أن درجة حرارة التلدين الموافقة لـ 490°C غير مرغوبة بالنسبة للصناعيين.

5-4 حساب طاقة النشاط لإعادة البلورة الأولية :

يوضح الشكل (III-41) منحنيات تغير النسبة الطورية X_v بدلالة الزمن t من أجل 76% و 70% τ_w .





الشكل (III-41) : منحنيات تغير X_v بدلالة t

تسمح مقارنة المنحنيات (III-33) و (III-39) و (III-41) بملاحظة انخفاض الزمن t_f مع ارتفاع درجة حرارة التلدين و نسبة التشويه τ_w . يلخص الجدول (III-11) الأزمنة $t_{1/2}$ بدلالة درجة حرارة التلدين (T_{rec}) للأسلاك الثلاثة. يساعد هذا الجدول على حساب طاقة النشاط اللازمة لإعادة البلورة الأولية (Q_{rec}).

$T_{rec} (^{\circ}C)$ $\tau_w(\%)$	$t_{1/2}(h)$		
	70	76	81
490	160	139	31
510	19	5.5	4.5
530	3.3	1.8	0.58

الجدول (III-11) : تغير $t_{1/2}$ بدلالة T_{rec} و τ_w

نذكر بالعلاقة (I-38) لحساب طاقة النشاط اللازمة لإعادة البلورة الأولية :

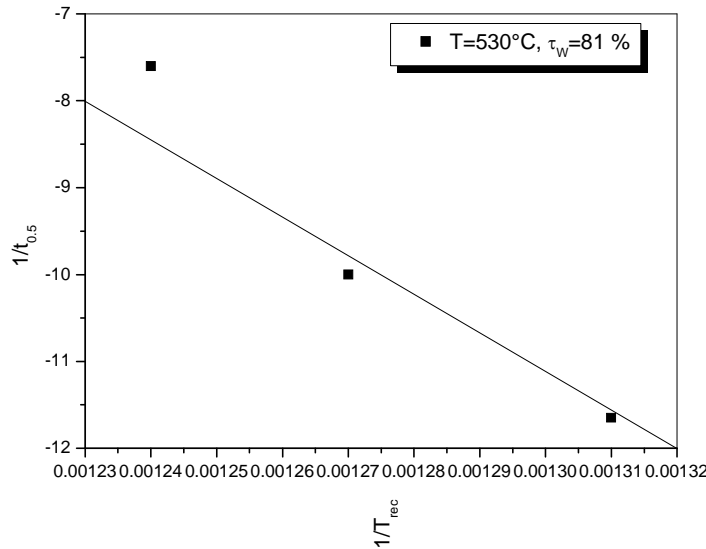
$$\ln \frac{1}{t_{0.5}} = \ln C - \frac{Q_{rec}}{R} \cdot \frac{1}{T_{rec}} \dots \dots \dots (I-39)$$

حيث :

$\frac{Q_{rec}}{R}$: يمثل ميل المستقيم الذي يمكن أن نستنتج منه مقدار الطاقة اللازمة لإعادة البلورة الأولية.

يوضّح الشكل (III-42) التغير الخطي للدالة $\frac{1}{t_{0.5}} = f\left(\frac{1}{T_{rec}}\right)$ لسلك مشوّه بـ 81% والذي يمكن أن

يُستخرج منه طاقة نشاط إعادة البلورة الأولية Q_{rec} .

الشكل (III-42) : تحديد Q_{rec}

يبرز الجدول (III-12) نتائج حساب طاقة إعادة البلورة الأولية للأسلاك الثلاثة.

$(\tau_w \%)$	Q_{rec} (kJ/mol)
70	455
76	444
81	353

الجدول (III-12): طاقة إعادة البلورة بدلالة نسب التشوه

يُلاحظ من الجدول السابق أن قيمة Q_{rec} تتناقص كلما إرتفعت τ_w . وُجد في دراسة سابقة [147] أجريت على فولاذ لئِن يحتوي على $0.12\%(\text{Ni})$ و $0.12\%(\text{Cu})$ و $0.12\%(\text{Cr})$ وذو نسبة تشوّه 83% و 72% أن طاقة إعادة البلورة الأولية تقدر بـ 347.80 kJ/mol و 446.56 kJ/mol على التوالي. يفسر المرجع [149] الظاهرة كما يلي : عند نسب تشويه عالية، تكون حركية حدود الحبيبات مرتفعة وبالتالي تتطلب طاقة نشاط منخفضة لتكوين حدود حبيبات جديدة.

تؤكد الدراسة [144] النتيجة السابقة حيث فُدرت طاقة النشاط لفولاذ لئِن مشوه بنسبة 80% و يحتوي على 0.003% من الكربون بـ 331 kJ/mol وهي قريبة من طاقة النشاط للفولاذ قيد الدراسة المشوه بنسبة 81% . تعتبر طاقة إعادة البلورة للفولاذ قيد الدراسة مرتفعة مقارنة مع سبائك النحاس المشوهة بنسبة 10% والتي تقدر بـ 129 kJ/mol [112].

يلاحظ أن القيمتين 331 kJ/mol و 353 kJ/mol (للفولاذ قيد الدراسة) قريبتان من قيمة طاقة النشاط للانتشار الذاتي في الحديد والتي تقدر بـ 331 kJ/mol [144].

تجدر الإشارة الى أن العناصر السببكية لها تأثير فعال على تغيير طاقة نشاط إعادة البلورة الأولية. أثبتت الدراسة [150] أن إضافة $0.34\% \text{Nb}$ و $0.067\% \text{Ti}$ إلى فولاذ يحتوي على $0.07\% \text{C}$ يخفض من الزمن $t_{1/2}$ بمقدار رتبة واحدة. يوافق هذا الانخفاض في $t_{1/2}$ انخفاض في طاقة نشاط إعادة البلورة الأولية.

6-4 الخاتمة الجزئية :

✓ ينخفض زمن الحضانة (t_s) وزمن نهاية إعادة البلورة الأولية (t_f) كلما ارتفعت درجة حرارة التلدين.

✓ ينخفض t_s و t_f بارتفاع نسبة التشوه.

✓ يرتفع المعامل (n) كلما ارتفعت نسبة التشوه.

✓ إن الإرتفاع بـ 20°C في درجة حرارة التلدين يكافئ ربعا بأكثر من 8 ساعات في الزمن اللازم لإعادة البلورة الأولية.

تنخفض طاقة النشاط اللازمة لإعادة البلورة الأولية كلما ارتفعت نسبة التشوه.

الخاتمة العامة

تم انجاز هذه الدراسة بمخبر البنية المجهرية والعيوب في المواد. يمكن تلخيص النتائج التجريبية التي توصلت إليها هذه الدراسة في النقاط التالية :

✓ أثبتت الدراسة أن التركيب الكيميائي لهذا الفولاذ يسمح بتلحيمة عند الانكسار ويمكن توجيهه لتشكيل أسلاك ذات أقطار مختلفة لأنه يتمتع بلدونة عالية و إجهاد حد مرونة و صلادة متوسطين. يلعب صغر الحجم الحبيبي لهذا الفولاذ ($11.3\mu\text{m}$) دورا مهما في تحسين خواصه الميكانيكية. بينت هذه الدراسة كذلك أن الفولاذ يحتوي على مكثفات. يعود سبب وجودها عادة إلى عدم مراعاة بدقة آليات التحضير (التنظيف) أو كذلك استيراد فولاذ نقاوته سيئة ومن المتوقع أن تؤثر هذه الأكاسيد على عملية تشكيل الفولاذ على شكل أسلاك مما يؤدي إلى انكسارها.

✓ أكدت هذه الدراسة دور التشويه في تقسية الأسلاك الفولاذية وتحسين خواصها الميكانيكية. بينت كذلك تشابه البنية المجهرية لسطح الانكسار (الانكسار المطيلي) و المظهر الماكروسكوبي للأسلاك (في الحالة المشوهة) و الحالة الابتدائية. يؤكد هذا النوع من الانكسار المطيلي إمكانية تصنيع أسلاك أخرى لها أقطار اقل من 2.4mm .

✓ وجد أن البنية المجهرية للأسلاك المغلفة تتكون من فريت و برليت. أثبتت هذه الدراسة كذلك اختلاف الخصائص الميكانيكية للأسلاك المغلفة عن الحالة الابتدائية و حالة الأسلاك (غير المغلفة). يظهر سمك طبقة الغلظة غير منتظم في السلك الواحد ويكون في بعض الحالات اقل من $10\mu\text{m}$ وهذا السمك غير كاف لحماية الأسلاك الفولاذية من التآكل. يؤثر وجود الأكاسيد قرب السطح على التحام طبقة الغلظة بالفولاذ. بينت هذه الدراسة كذلك وجود تشققات في طبقة الغلظة وفي بعض الأحيان غياب هذه الطبقة تماما. خلصت إلى أن الغلظة الجيدة للأسلاك تتطلب المراقبة الجيدة للتركيب الكيميائي للفولاذ ونقاوته كما يجب التأكد من درجة حرارة حوض الزنك و تركيبه الكيميائي.

✓ أثبتت هذه الدراسة أن زمن الحضانة (t_s) وزمن إتمام إعادة البلورة الأولية (t_f) ينخفضان كلما ارتفعت درجة حرارة إعادة البلورة الأولية. أكدت كذلك أن ارتفاع نسبة التشوه يؤدي إلى انخفاض زمن الحضانة وزمن إتمام إعادة البلورة الأولية و معامل JMAK (n) وكذلك طاقة النشاط اللازمة لإعادة البلورة الأولية.

المراجع

- [1] W. Soboyejo, "Mechanical proprieties of engineered materials", Ed. Marcel Dekker, INC, p.58, 2003
- [2] M. Bramat, "Technologie Des Matériaux, Contrôle et essai de Soudures", Ed. De Boeck, p.81, 2007
- [3] M.D. Charre, "La Microstructure Des Aciers et Des Fonte, Genèse et Interprétation", Ed. Sirpe, p.343, 2003
- [4] J.P. Marciers, G. Zambelli, W. Kurtz, "Introduction a la Science des Matériaux", Ed. (3^{eme}), presses Polytechnique, p.375, 2002
- [5] M. Dupeux, "Aide-mémoire Science Des Matériaux", Ed. Dunod, p.215, 2005
- [6] E.G. Mittemeijer, "Fundamental of Material Science", Ed. Springer-Verlag, p.386, 2010
- [7] H. Belhouchet, "Mémoire de magister", Université Mentouri de Constantine, 2001
- [8] I. Moussaoui, "Thèse de doctorat", Université Mentouri de Constantine, 2001
- [9] R.J. Borg, G.J. Diene, "The physical chemistry of solids", Ed. Academic press, Inc, p.85, 1992
- [10] R. Barbucci, "Integratted Biomateriams Science", Ed. Springer, p.268, 2002
- [11] J. Philibert et Cie, "Métallurgie du minerai au matériau", Ed. Masson, p.112, 1998
- [12] E.V. Levchenko, A.V. Evteev, I.V. Belova, G.E. Murch, Acta Materialia, Vol. 57, P.846, 2009
- [13] E. George, "Steel heat treatment Handbook", Ed. (2rd), Taylor et Francis, p.150, 2006
- [14] L. Lakhtine, "Metallographie et Traitement Thermique des Métaux", Ed. mir, p.137, 1977
- [15] J.D. Verhoeven, "Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist", Ed. ASM International, p.11, 2007
- [16] F. Ashby, Mechel, R.H. David, Jones, "Materiaux", Ed. (3^{eme}), Dunod, p.153, 2008
- [17] J.H.E. Fox, "An introduction to steel selection, parte 1, Carbone and Low Alloys steels", Ed. Design Council, p.12, 1997

- [18] Anon, "Classification and designation of carbon and low-alloy steels", ASM Handbook, Ed (10th), Vol. 1, ASM International, Materials Park, OH, p.140, 1990
- [19] A.K. Sinha, "Ferrous Physical Metallurgy", Ed. Butterworths, Stoneham, p.95, 1989
- [20] C. Hutchiso, "The Formation of Partitioned Pearlite in Fe-Mn-C Steels", Ed. Ph. D. University of Virginia, USA, p.108, 2001
- [21] M.A. Mangan, G.J. Shifle, Metall. Trans, 30A, P.2767, 1999
- [22] E.V.F. Zackay, H.I. Aaronson, "Decomposition of austenite by diffusional processes", Ed. Interscience Pub, USA, p.35, 1962
- [23] K.C. Russele, "Effects of solid-state diffusion on the incubation time for nucleation of solids, in Fundamentals and applications of ternary diffusion", Ed. Pergamon Press, p. 59, 1990
- [24] A.A. Kaya, D.V. Edmonds, Metall. Trans, 29A, 29, p.13, 1998
- [25] K. Kuo, J. Iron and Steel Inst, April, p. 433, 1954
- [26] W. Soboyejo, "Mechanical Proprieties of Engineered Materials", Ed. Marcel Dekker, INC, p.66, 2003
- [27] W.D. Callister, "Science et Génie des Matériaux", Ed. Dunod, p.69, 2003
- [28] G.A. Holzapfel, "Nonlinear Solid Mechanics", Ed. John Wiley & Sons, Chichester, p.357, 2000
- [29] L.L. Faulkner, "Practical Engineering Failure Analysis", Ed. Marcel Dakker, p.76, 2004
- [30] G. Langem,"Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle", Ed (5th), Wiley vch, Weinheim, p.114, 2001
- [31] J. Roesler, H. Harders, M. Baeker, "Mechanical Behavior of Engineering materials", Ed. Springer, p.92, 2007
- [32] Y. Wange, "Thèse de Doctorat", Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006
- [33] S. Queyreau, "Thèse de Doctorat", L'universite Pierre et Marie Curie, 2008
- [34] G. Berenger, "Le Livre De L'aciers", Ed. Technique et Documentation L'avoisier, p.216, 1994
- [35] D. J. Bacon, U.F. Kocks, R.O. Scattergood, Phil. Mag, 28, p.1241, 1973
- [36] A. Dumay, "Thèse de Doctorat ", Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008
- [37] A.J. Ardell, Metallurgical Transaction A, 16A, p.2131, 1985

- [38] L. Brown, R. Ham, "Dislocation-particle interactions, Strengthening Methods in Solids", Ed. A. Kelly and R. Nicholson, Applied Science Publishers, Barking, Essex (UK), p.221, 1971
- [39] Q. Fathallah, "Thèse de Doctorat ", Université de Paul Erlaine Metz, 2006
- [40] G. Saada, Acta Metall, 8, p.841, 1960
- [41] C. H. Young, H. K. D. H. Bhadeshia, Material Science and Technologie, Vol. 10, P. 209, 1994
- [42] E.O. Hall, Proceedings of the Physical Society, Section B, p.747, 1951
- [43] M.F. Ashby, Philosophical Magazine, 21, p.399, 1970
- [44] R. P. Carreker Jr, W.R. Hibbard Jr, Acta Metallurgica,1 , p.654, 1953
- [45] J. L. Collet, "Thèse de Doctorat ", Institut polytechnique de Grenoble, 2009
- [46] A. Bazergui, B.Q. Thang, G. McIntyre, A. Biron, C. Laberge, "Résistance des Matériaux", Ed. (3^{ème}), Presses Polytechnique, p.15, 2002
- [47] A. Haberken, "Thèse de doctorat", Université De Liege, 1989
- [48] S. Degallaix, M. Boussuge, "Caractérisation Expérimentale des Matériaux", Ed. PPUR presses polytechniques, p.153, 2007
- [49] Standard EN 10002 –1 Metallic materials – Tensile testing – Part 1, Method of test at ambient temperature, p.320, 1995
- [50] A. Zare, A. Ekrami, Materials Science and Engineering, A528, p.4422, 2011
- [51] J.R. Davis, "Tensile Testing", Ed. (2nd), ASM International, Ohio,p.7, 2004
- [52] A. Piobert, Morin et Diod, Men, Artilleries, Vol. V, P.505, 1842
- [53] W. Lüders, J. Polytech Dinglers, Vol. 18, P.155, 1860
- [54] P. Hähner, Appl. Phys, A58, P.41, 1994
- [55] K.I. Mori, "Simulation of Materials Processing", Ed. Taylor and Francis, p.479, 2001
- [56] E. Farah, "Thèse de Doctorat ", Université de Montréal, 2009
- [57] W. Ramberg, W. Osgood, "Description of stress-strain curves by three Parameters, "Technical Note no. 92, National Advisory Commitee for Aerospace, p.91, 1943
- [58] G. Taylor, Journal of the institute of Metals, 62, p.307, 1938
- [59] G. de Smet, "la pratique de traitement thermique des métaux industriel", Ed. Dunod, p.60, 1972
- [60] M.D. Charre, "La microstructure des aciers et des fontes Genèse et interprétation", Ed. Sirpe, p.166, 2003

- [61] M.F. Ashby, Y.J.M. Bréchet, D. Cebon, L. Salvo, "Selection strategies for materials and processes", Ed. Materials and Design, p.215, 2003
- [62] P.M. Chess, "Cathodic Protection of Steel in Concrete", Ed. E & FN Spon, P.4, 1998
- [63] S. Nourouzi, "Thèse de doctorat", Ecole doctorale sciences technologie-Santé, université de Limoges, 2004
- [64] M. Shigeyoshi, Progress in Organic Coatings, 52, p.227, 1996
- [65] R. Fourmantin, "Thèse de doctorat", Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004
- [66] Q. Daniele, Technique de l'ingénieur, Vol. M1534, p.275, 2005
- [67] D. Quantin, "Galvanisation à chaud", Techniques de l'Ingénieur, M 1534, p.28, 2003
- [68] L. Lacourcelle, "Traité de galvanotechnique", Ed. Galva-Conseils, p.32, 1996
- [69] M. Bretez, "Thèse de doctorat", Université de Lille, 1986
- [70] A.G Sylvain, Marcel, G. Alain, M. Henri, "Revêtement et traitement de surface", Ed. CNRS et L'INSA de Lyon, p.181, 1998
- [71] F. Ashby, Mechel, R.H. David, Jones, "Matériaux", Ed. (3^{ème}), Dunod, p.153, 2008
- [72] G.F. Bastin, F.J.J. Van Loo, G.D. Rieck, Z. Metallkd, 65, p. 656, 1974
- [73] P.J. Gellings, E.W. de Bree, G. Gierman, Z. Metallkd, 70, p.312, 1979
- [74] N. Dreullen, "Influence de l'aluminium dans la protection par le zinc de l'acier", Ed. Dunod, p.305, 1985
- [75] S. R. Yeomans, "Galvanized Steel Reinforcement in Concrete", Ed. Elsevier, Ltd, p.94, 2004
- [76] C.E. Jordan, A.R. Marder, Met. Mater. Trans, 28A, p.2695, 1997
- [77] N. Brown, Trans. Metall. Soc. A.I.M.E, Vol. 221, p.236, 1961
- [78] M.L. Giorgi, P. Durighello, R. Nicolle, J.B. Guillot, Mater. Sci, 39, p.5803, 2004
- [79] P. Pelerin, "Thèse de doctorat", Université de Lille, 1983
- [80] A. Nishimoto, J. Inagaki, K. Nakaoka, "Influence of Alloying Elements in Hot Dip Galvanized Steel on the Adhesion and Iron-Zinc Alloying Rate", Ed. Springer, p.228, 1982
- [81] G. Vourlias, N. Pistofidis, G. Stergioudis, D. Tsipas, Crystal Research and Technology, 39, p.23, 2004
- [82] A. Nishimoto, Itans ISIJ, 26, p.8073, 1986
- [83] A. Yoshitaka, Trans. Metall, A254, p.305, 1998

- [84] S. EL –sebakhy, D.J. Malik, "Effect of post hot dip galvanizing on automotive body structure", Ed. publ. SIRPE, p.98, 1991
- [85] R. Souske, "La galvanisation à chaud", Ed. Dunod, p.117, 1963
- [86] J.P. Naylor, "Manuel des traitements de surface", Ed. Dunod, p.158, 1987
- [87] R.W. Balluffi, J.S. Koehler, R.O. Simmons, "Recovery and Recrystallization of Metals", Ed. Himmel, Interscience, p.27, 1963
- [88] J.C.M. Li, "Recrystallization, Grain Growth and Texture", ASM, Metals Park, Ohio, p.45, 1966
- [89] H.M. Chan, F.J. Humphreys, Proc. El. Mic. Soc. America, 476, p.768, 1984
- [90] H. Hu, Trans. Metall. Soc. A.I.M.E, 233, p.1757, 1962
- [91] J.L. Lytton, K.H. Westmacott, L.C Potter, Trans. Metall. Soc. A.I.M.E, 233, p.1757, 1965
- [92] G. Van Druner, S. Saimoto, Acta Metall, 19, p.213, 1971
- [93] G. Masing, J. Raffelseeper, Z. Metallk. 41, p.65, 1950
- [94] J.T. Michalak, H.W. Paxton, Trans. Metall. Soc. A.I.M.E, 221, p.850, 1961
- [95] W.C. Leslie, J.T. Michalak, F.W. Anl, "Iron and its Dilute Solid Solusion", Ed. Spencer and Werner, Interscience, New York, p.49, 1963
- [96] N. Hansen, T. leffers, J.K. Kjems, Acta Metall, 29, p.1523, 1981
- [97] P. Cotterill, P.R. Mould, "Recrystallization and Grain Growth in Metals", Ed. Surrey Univ. Press, London, p.18, 1976
- [98] J.E Burke, D. Turnbull, Prog. Metal Phys, 3, p.220, 1952
- [99] J.W. Christian, "The Theory of Transformations in Metals and Alloys", Ed. Pergamon, Oxford, p.198, 2002
- [100] P.A. Beck, P.R. Sperry, H. Hu, J. Appl. Phys, 21, p.420, 1950
- [101] W.G. Burgers, "Rekristallisation, Verformter Zustand und Erholung", Ed. Leipzig, p.39, 1941
- [102] Y. Huang, F.J. Humphreys, M. ferry, Mats. Sci. and Tech, 16, p.1367, 2000
- [103] A.N. Kolmogorov, Izv. Akad. Nauk. USSR-Ser-Matemat, 13, p.355, 1973
- [104] W.A. Johnson, R.F. Mehl, Trans. Metall, Soc. A.I.M.E, 135, p.416, 1939
- [105] M. Avrami, J. Chem. Phys, 7, p.1103, 1939
- [106] L. Ryde, W.B. Hutchinson, S. Jonson, "Recrystallization", Ed. Chandra, TMS, P.313, 1960
- [107] J.C. Blade, P.L. Morris, Proc. (4th) Int. Conf. on Textures, Cambridge, p.171, 1975

- [108] D.J. Jensen, Acta Metall. Mater, 43, p.1117, 1995
- [109] M. Hatherly, Proc. (6th) Int. conf. on strength of Metals and Alloys, Oxford, p.1181, 1982
- [110] O. Dimitrov, R. Fromageau, C. Dimitrov, "Recrystallization of Metallic Materials", Ed. Haessner, Riederer-Verlag GMBH, Stuttgart, p.137, 1978
- [111] G.J. Marchall, R.A. Richs, proc. Recrystallisation 92, San Sebastian, Spain, p.245, 1992
- [112] C.M. Sellars, G. Davies, "Hot working and forming processes", Ed. The Metals Society, London, p.3, 1980.
- [113] A.W Bowen, Mats. Sci. and Tech, 6, p.1058, 1990
- [114] G.T. Higgins, Met. Sci .J, 8, p.143, 1974
- [115] P.Gordon, T.A. El Bassyouni, Trans. Metal. Soc. A.I.M.E, 223, p.391, 1965
- [116] ASTM Standard Deination, E 112-88., 1994, "Book of ASTM Standard", Vol.3, Pheladelphia, P.A, p.227, 1997
- [117] H. Bouhlais, "Mémoire de magister", Université Mentouri de Constantine, 2008
- [118] K. Martinez, "Advanced Topics in Material Science and Engineering", Ed. Plenum press, New york, p. 47, 1993
- [119] P. Sabatier, "Thèse de doctorat ", Université de Toulouse, 2009
- [120] J.A.M. Delgado, "Thèse de doctorat ", Université des Science et Technologies de Lile, 2009
- [121] G.E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", Ed. (3rd), McGraw-Hill book company, printed in Singapore, p.75, 1986
- [122] G. de Smet, "Pratique des Traitement Thermique des Métaux Industriel ", Ed. Dunod, p.28, 1972
- [123] Q. Auzoux, "Thèse de doctorat ", Ecole National Supérieure des Mince de Paris, 2004
- [124] H. Mechel, M. Gautois, "Principe et possibilités d'application industrielle des procédés de dépôts physiques", Ed. L'avoisier, p.210, 1985
- [125] A.R. Khantoul, "Mémoire de magister", Université Mentouri de Constantine, 2010
- [126] C. Richardet, "Structure et Propriétés des Métaux", Ed. (2^{eme}), Dunod, p.86, 1970
- [127] L. Pawlowski, "The Science and Engineering of Thermal Spray Coating", Ed. John Wiley & Sons, Ltd, England, p198, 1195

- [128] N. Lavaire, "Thèse de doctorat, "Institut des science appliquées de layon, 2001
- [129] J. Foct, P. Perrot, G. Reumont, Scripta Met. Mat, 28, p.1195, 1993
- [130] R.P. Krepski, Solid films, Vol. 72, p.229, 1980
- [131] Mohl & Co, "Société de Tréfilage et de Fabrication des Produit de Soudage, Trifisoud", ulma-setif, 1979
- [132] P.G. Caceres, Mat. Sci. Technol, 2, p.871, 1986
- [133] G. Vicent, "Thèse de doctorat ", Université de Metz, 2004
- [134] P. Pernier, "Métallographie par les Méthodes de Diffraction", Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, Vol. M 100, 1993
- [135] A. Iost, J. Foct, "Mesure de la ténacité par indentation application à la galvanisation", Ed. Elsevier, Ltd, p.127, 1978
- [136] D. Jaffrey, J.D. Browne, T.J. Howard, Met. Trans. B, Vol. 11B, p.631, 1980
- [137] V. Rangaragajan, N.M. Giallorakis, O.K. Matlock, G. Krauss, J. Mater. Shapinge Technol, 6, p.217, 1989
- [138] A. Nichimoto, Itans ISIJ, 26, p.807, 1986
- [139] A.R. Marder, Prog. Mater. Sci, 45, p.191, 2000
- [140] P. Bicao, W. jiahau, S. Xuping, L. Zhi, Y. Fucheng, surface & Coating, 202, p.1785, 2008
- [141] A. Borhan-Tavakoli, Trans JIM, 26, p.94, 1985
- [142] P. Pelerin, "Thèse de doctorat ", Université de Lille, 1983
- [143] R. El hadj, "Mémoire de magister", Université de M'sila, 2007
- [144] W. Ye, R. le Gall, G. Saindrenan, ISITEM, 03, p.44306, 2001
- [145] S. Jakani, "Thèse de doctorat", Université Paris Sud - Orsay, 2004
- [146] F.J. Humphreys, M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", Ed. Elsevier, Ltd, p.479, 1995
- [147] F.Z. Mezahi, "Mémoire de magister", Université Mentouri de Constantine, 2000
- [148] J.T. Michalak, W.R. Hibbard, Trans. ASM, 53, p.331, 1961
- [149] J.W. Cahn, Acta Met, 10, p.789, 1962
- [150] B. Wang, X. Xu, X. Liu, G. Wang, J. Iron Steel Res. Int, 13, p.49, 2006

Résumé

Ce travail est consacré à l'étude des propriétés structurales, mécaniques et à la cinétique de recristallisation primaire des fils d'acier à bas carbone (0,07%C) destiné à la galvanisation. Ce matériau est importé par TREFISOUD (El Eulma- Sétif-) en tant que fil de 5,5 mm de diamètre. Il est utilisé pour la production de fils de 3 : 2,7 ; et 2,4 mm de diamètre qui sont ensuite galvanisés (à chaud) contre la corrosion. Au cours du tréfilage et / ou après le processus de galvanisation, la rupture de fils se produit et l'adhérence de la couche de galvanisation à l'acier se trouve à être très faible.

Les propriétés structurales et mécaniques des fils avant et après galvanisation sont déterminées, à l'aide du microscope optique, microscope électronique à balayage (MEB) et des essais de traction.

Il est constaté que le matériel importé est en acier sale et contient des inclusions, d'oxyde de fer, réparties aléatoirement dans les fils. L'examen de la couche de galvanisation montre que son épaisseur n'est pas régulière, au sein du même fil. Elle varie de 8 à 17 μ m et contient des fissures. En outre, en raison de l'absence de la couche de galvanisation, certaines parties du fil ne sont pas protégées contre la corrosion, affectant négativement la production industrielle des fils galvanisés. Ce travail montre l'intérêt du contrôle du processus de galvanisation et ces conditions.

A la lumière de cette étude, les valeurs des coefficients de JMAK n et k ainsi que l'énergie de la recristallisation primaire sont déterminés.

Mots clés: Acier doux, Galvanisation, Recristallisation primaire

Abstract

The aim of this study is to investigate structural and mechanical properties and the primary recrystallization kinetic of low carbon steel wire used for galvanization. The present material is low carbon steel (containing 0.07%C) imported by TREFISOUD (El-eulma – Setif) as wire of 5.5mm of diameter and used for wires production (3mm, 2.7mm and 2.4mm diameter). These wires are later galvanized against corrosion (hot dip galvanization). During wiredrawing and/or after galvanization process, fracture of wires occurred and the adherence of the galvanization layer to the steel is found to be very weak.

Structural and mechanical properties of wires prior to galvanization and after galvanization are determined, using optical and scanning electronic microscopes (SEM) and tensile tests.

It is found that the imported material is dirty steel and contains inclusions such as iron oxides, randomly distributed within the wires. The examination of the galvanization layer shows that its thickness is not regular, within one wire, varies from 8 to 17 μ m and contains cracks. Moreover, the galvanization layer vanishes in some wire zones which results in the non protection of wires from corrosion and in the reduction of wire productions. It can be concluded that the galvanization process and its conditions have to be inspected.

Primary recrystallization kinetic is examined and parameters such as n, k, and activation energy are also determined.

Key words: Low carbon steel, Galvanization, Primary recrystallization

ملخص

يهتمّ هذا البحث بتحديد الخواص البنيوية والميكانيكية ودراسة حركية إعادة البلورة الأولية لأسلاك فولاذية موجهة للغلنة. يستورد فولاذ لين (يحتوي على 0.070% C) على شكل سلك قطره 5.5mm من طرف شركة الشرق الجزائري للقلاد (العلة- سطيف). تنتج هذه الشركة أسلاك ذات أقطار 3mm و 2.7mm و 2.4mm ، ثمّ تقوم بعد ذلك بتغطيتها بطبقة من الزنك (غلنتها على الساخن). تعاني هذه الأسلاك عند استخدامها من الإنكسارات وضعف التحام طبقة الغلنة بالفولاذ.

سمح المجهر الضوئي و الإلكتروني للمسح (SEM) و كذلك تجربة الشد بتحديد مختلف الخواص البنيوية والميكانيكية للأسلاك في حالة الإستقبال و بعد تصنيعها و غلنتها.

بيّنت النتائج أن الفولاذ المستورد غير نقي و يحتوي بداخله على أكاسيد الحديد لا يمكن التخلص منها لا بعد تشكيل الأسلاك ولا بعد غلنتها. تمّ التأكد أن الخواص الميكانيكية للأسلاك ترتفع مع زيادة نسبة التشويه. سمحت هذه الدراسة كذلك بفحص طبقة الغلنة فوجد أنها غير منتظمة و يتراوح سمكها بين $8\mu\text{m}$ و $17\mu\text{m}$ في السلك الواحد. اتضح كذلك غياب هذه الطبقة في بعض المناطق و هذا معناه أن الأسلاك غير محمية ضد التآكل و تكون معرضة للإنكسار في تلك المناطق مما يؤثر سلبيا على نوعية الإنتاج. وُجد كذلك أن ظهور الأكاسيد قرب سطح الأسلاك يؤثر على التحام طبقة الغلنة بالفولاذ وبيّنت الدراسة أن هذه الطبقة تحتوي على تشققات. خلصت النتائج إلى أنه من الضروري مراقبة آلية وشروط الغلنة .

على ضوء هذه الدراسة، تمّ دراسة حركية إعادة البلورة الأولية وتحديد المعاملات التي تميزها من n و k وكذلك الطاقة اللازمة لإعادة البلورة الأولية لهذا الفولاذ.

الكلمات الدليلية : الفولاذ اللين، آلية الغلنة، إعادة البلورة الأولية.