

الفصل الثالث: تحولات البنية المجهرية للأوستنيت الحرارية (TTT et TRC)

1. تمهيد: في هذا الفصل سنتكلم عن تحول الأوستنيت، و إنصهاره تبعا لدرجة الحرارة مع ذكر التحولات الناتجة: البرلتية، البايثية، المارتنزيتية و كذا تحول الأوستنيت تحت تبريد مستمر و قبل التطرق إلى هذا الموضوع إرتأينا التحدث و لو بإيجاز عن المعالجة الحرارية للحديد الصلب و هذا لعلاقتها بهذه التحولات.

2. المعالجات الحرارية لحديد الصلب:

1.2 **عموميات:** المعالجات الحرارية هي عمليات تسخين متبوعة بتبريد من أجل إعطاء قطعة معدنية خواص أكثر إنسجاما لإستعمالها أو تشكيلها. و هي تسمح بتحسين و بشكل كبير المميزات الميكانيكية للفولاذ بتركيب معلوم. و الأهداف الرئيسية تبحث في زيادة حدود المرونة و نقصان في سرعة الكسر. و بما أن أهمية حديد الصلب راجعة و بقسط كبير إلى أنواعه المتعددة و التي يمكن الحصول عليها بتغيير في التركيب الكيميائي للمعدن لكنها ترتبط بإمكانية التحول لمميزات الصلب ذي التركيب الكيميائي المعلوم بالمعالجة الحرارية تقنيا أي معالجة حرارية تعرف بتغيير درجة حرارة المعدن بدلالة الزمن (Cycle Thermique) و بصفة عامة المعالجة الحرارية لا تغير التركيب الكيميائي للسبيكة، لكن قد تأتي بتغييرات مرتبطة بثلاث جهات نظر:

- 1- التشكيل (حالة الكربون و الشكل التآصلي للحديد).
- 2- البنية (حجم الحبيبات، و توزيع المكونات).
- 3- الحالة الميكانيكية (الفروق بين درجات حرارة النقاط المختلفة للقطعة المؤدية إلى الإنتظام في التمدد الذي يستطيع خلق إجهادات ذاتية، و بسبب تشوهات خارجية).

و المعالجات الحرارية التقليدية للفولاذ هي: السقاية، المراجعة، التلدين.

2.2. أنواع المعالجات الحرارية للحديد الصلب: و تتمثل في:

1.2.2 السقاية: بصورة عامة تهدف إلى إعطاء الحديد الصلب صلادة كبيرة (تستعمل من أجل تحسين أنواع الفولاذ للإستعمال).

الدورة الحرارية: الدورة الحرارية تحوي ثلاثة أطوار متتالية:

أ- تسخين حتى درجة حرارة θ_t (تدعى درجة حرارة السقاية) موافقة لحالة أوستنيتيكية (Austenitique) و لا بد أن يكون زمن بقاءه عند درجة الحرارة هاته كافية و طويلة من أجل المجانسة الحرارية المحققة حتى قلب القطعة المعدني.

ب- المحافظة على درجة الحرارة هذه θ_t التي تسمح بمجانسة العينة.

ج- تبريد سريع، و ذلك بواسطة الغمس في وسط مناسب. و يكون سريعا و ذلك من أجل إلغاء التحولات الموضحة في منحنى الإتران.

2.2.2. **المراجعة:** الفولاذ المسقي يعتبر أكبر صلابة. و عموما سريع الكسر عند إستعماله. و السقاية عادة تتبع بمراجعة و التي تهدف إلى التقليل من تأثيرات السقاية و إزالة أو التخلص من معظم الإجهادات الداخلية الناتجة عن تحول طور الأوستنيت إلى مارتنزيت و التي تعد سببا جزئيا في هشاشة الصلب المسقي مع تخفيض طفيف للصلادة.

الدورة الحرارية: تحوي ثلاث أطوار:

أ- تسخين إلى درجة حرارة $T > 180^\circ C$

ب- الحفاظ عليه في هذه الدرجة لمدة ساعتين

ج- تبريد بطيء

3.2.2. **التلدين:** و يقصد به تحويل السبيكة إلى الحالة اللدنة (الطرية) و تتم المعالجة الحرارية بثلاث طرق هي:

أ- رفع درجة حرارة الصلب إلى درجة حرارة معينة

ب- الحفاظ على درجة الحرارة هاته

ج- تبريد بطيء عموما

و توجد عدة أنواع من التلدين نذكر منها:

- 1- تلدين المجانسة: هذا التلدين يكون في درجة الحرارة العالية و المخصص لتحقيق أو محو العناصر المتباينة ذات التركيب الكيميائي الناتجة عن ظاهرة الفصل.
- 2- تلدين التنعيم: و الهدف منه تخفيض صلادة المعدن لتسهيل عمليات التشغيل.
- 3- تلدين الإسترجاع: الهدف منه تنقية و تسوية حبيبات الصلب

3 - عموميات حول تحول الأوستنيت:

1.3. بيان التحول الإيزותרمي (منحنى الزمن-درجة الحرارة-التحول) Temps TTT :Température Transformation

مبدأ و أهداف الدراسة:

ان استعمال المعالجات الحرارية الإيزوترمية تسمح بدراسة تأثير عوامل الزمن و درجة الحرارة منفصلة على تحولات الأوستنيت. فإذا كان لدينا عينة بأبعاد صغيرة أوستنيتية (θ_a, t_a) تبرد بسرعة كبيرة في حمام سقاية عند درجة حرارة θ_i . هذا التبريد شبه فوري لا يسمح بالتحولات التي تظهر ببيان الأطوار و يقود إلى الأوستنيت الذي يتحول في شروط عند التوازن، ندرس عند الحفاظ على درجة الحرارة θ_i ، هذا التطور الكمي و النوعي للطور الأوستنيتي بدلالة الزمن. التقنيات المكروغرافية، التحليل التمديدي (Analyse delatometrique)، التحليل المغناطيسي و الحراري، تسمح بتمييز المكونات المتشكلة (الطبيعية، البنية المجهرية، التركيز) لكل درجة حرارة θ_i (الشكل 1-3 و 2-3).

تجريبيا:

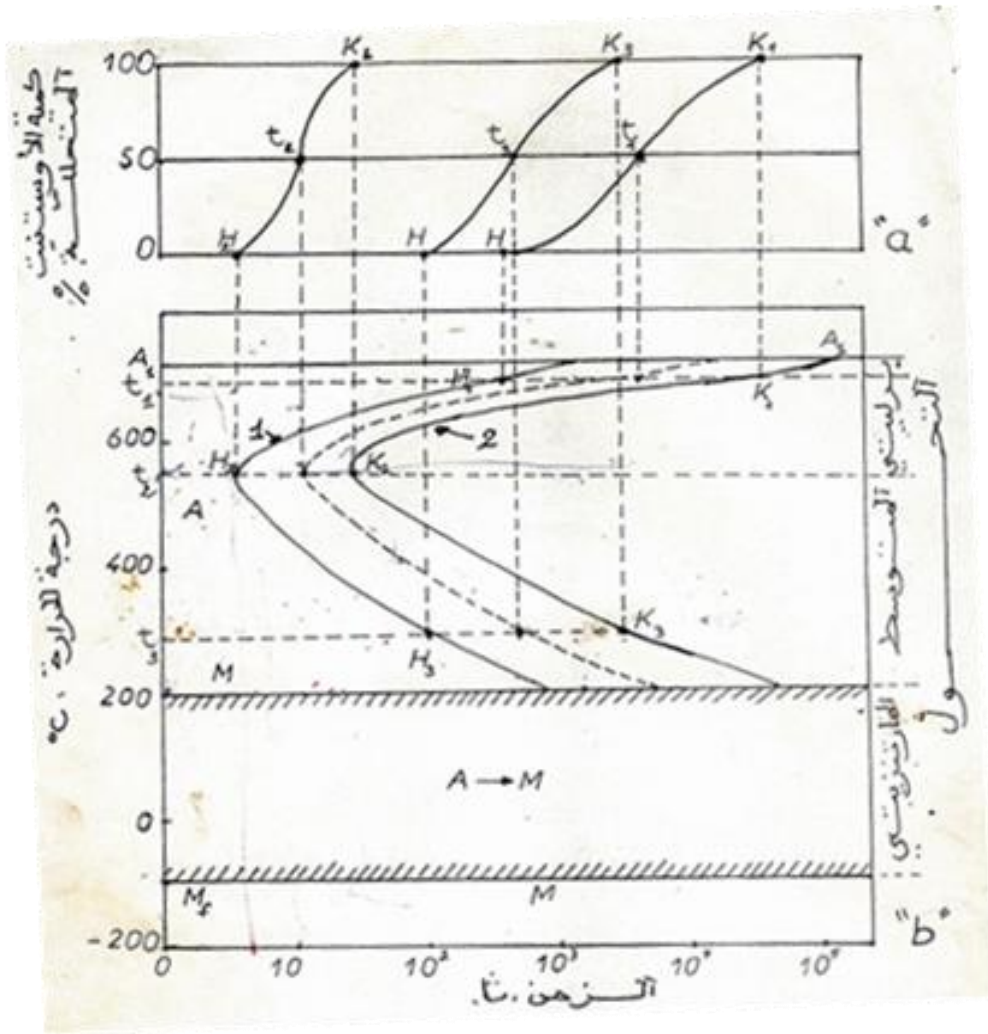
إذا أخذنا فولاذ ذو بنية أوستنيتية نتحصل عليه بالتسخين حتى درجة حرارة أعلى من 910°C (فولاذ فوق أوتكتويدي) أو عند الخط SE (فولاذ تحت اليونكتويدي) و بتبريده في درجة حرارة أقل من 727°C الأوستنيت يكتسب حالة لاستقرة و يخضع إلى تحولات. و لوصف الطريقة الحركية لهذه التحولات نستعمل البيانات (المنحنيات) (الزمن- درجة الحرارة-التحول TTT) حيث نقوم تجريبيا خصائص التحولات الإيزوترمية للأوستنيت، بمعنى التحولات التي تنتج عند درجات حرارة ثابتة.

- ♦ التحول الأيزوتامي للأوستنيت يدرس بتسخين عينات صغيرة من الفولاذ حتى درجات الحرارة التي توافق تواجد الأوستنيت المستقر (فوق النقطة الحرجة) ثم نبردها بسرعة حتى درجة حرارة أقل من 727°C مثلا حتى $500, 600, 700^\circ\text{C}$... و نبقئها في هذه الدرجات حتى التحليل التام للأوستنيت.
 - ♦ نتائج الأبحاث مميزة ببيان يوضح كمية الأوستنيت المتحللة بدلالة الزمن المناسب منذ بداية التحليل
- شكل 1-3- (a)

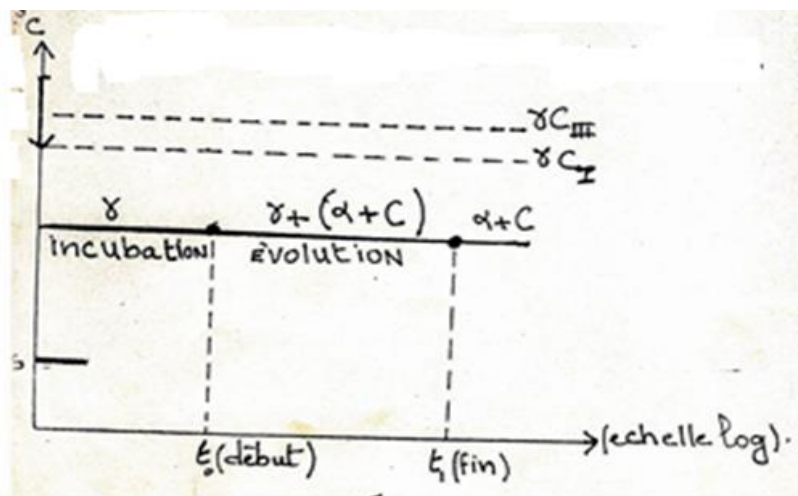
و كما نلاحظ في الشكل أثناء مجال من الزمن (H_3, H_2, H_1) عند درجات حرارة مختلفة تحلل الأوستنيت لم يبدأ بعد تجريبيا و هذا المجال يسمى الحضانة incubation و ما إن ينتهي هذا المجال يبدأ الأوستنيت في التحلل مع تكوين خليط: فريت + سمنتيت التحلل في البداية سريع ثم يصبح شيئا فشيئا يبطيء و بعد مدة معينة (k_3, k_2, k_1) يكتمل هذا البروز (النتوء) أو يتوقف. تحدث بيانات من هذا

النموذج من أجل عدة درجات إنصهار: (t_1, t_2, \dots) و نحصل على بيان التحول الإيزوترمي للأوستنيت أو بيان TTT و بهذا الصدد يجب إرجاع أجزاء الزمن التي توافق بداية (H_3, H_2, H_1) و نهاية (k_3, k_2, k_1) التحلل الأوستنيت من أجل كل درجات الحرارة المدروسة (t_1, t_2, \dots) على البيان أين محور الفواصل يحدد الزمن و محور الترتيب يحدد درجة الحرارة المرتبطة بنقاط مطابقة (مماثلة) بواسطة منحنيات منظمة.

- ◆ المنحنى (1) من بيان التحول الإيزوترمي لأوستنيت، يميز بداية التحلل.
- ◆ المنحنى (2) الزمن اللازم لإكتماله
- ◆ المنطقة (الحيز) الموجودة يسار المنحنى لبداية التحلل تحدد مدة الحضانة في مجال، درجة الحرارة و الزمن المحددين بهذه المنطقة.
- ◆ الأوستنيت في حالة إنصهار لا يتحلل عمليا.
- ◆ مدة الحضانة تميز إستقرار الأوستنيت المنصهر عندما ترتفع درجة الحرارة فإن هذا الإستقرار يضعف بسرعة ليصل إلى الحد الأدنى، بعد ذلك يصبح من جديد أقوى.
- ◆ في درجة حرارة الإستقرار الدنيا – سرعة تحول الأوستنيت كبيرة و في هذه الشروط مدة حضانة الفولاذ للكربون لا تتجاوز 1 إلى 1.5 ثانية ضعف إستقرار الأوستنيت و زيادة سرعة التحول مع رفع درجة الإنصهار تفسر بالفرق بين الطاقات الحرة للأوستنيت و الأطوار المتكونة في هذه الشروط النسبية الحرجة للحبيبات القابلة للنمو نقل، بينما عدد حجوم الأوستنيت الأولى القادرة على أن تنتج حبيبات الطور الجديد تزداد.
- ◆ عندما ينصهر الأوستنيت حتى درجة حرارة أقل من النقطة M_S التي توافق درجة بداية تحول الأوستنيت إلى مارتنزيت. النتوءات المنتشرة مبعدة كليا عن بعضها البعض و تكوين الخليط: فريت + سمنتيت يصبح مستحيل. و هي حالة التحول بدون إنتشار للأوستنيت إلى بنية الفولاذ المستقر يدعى المارتنزيت، و هو عبارة عن محلول صلب فوق مشبع بالكربون في الحديد α أين نسبة كربون المارتنزيت غير مميز بالتقريب بالنسبة للأوستنيت المنصهر. تبعا لدرجة حرارة الإنصهار للأوستنيت توجد ثلاث مجالات لدرجة الحرارة أو مناطق التحولات: البرليت-البنيت (متوسط)، و المارتنزيت. علما بأن البنيت يوجد بين التحولات البرليتية و التحولات المارتنزية.



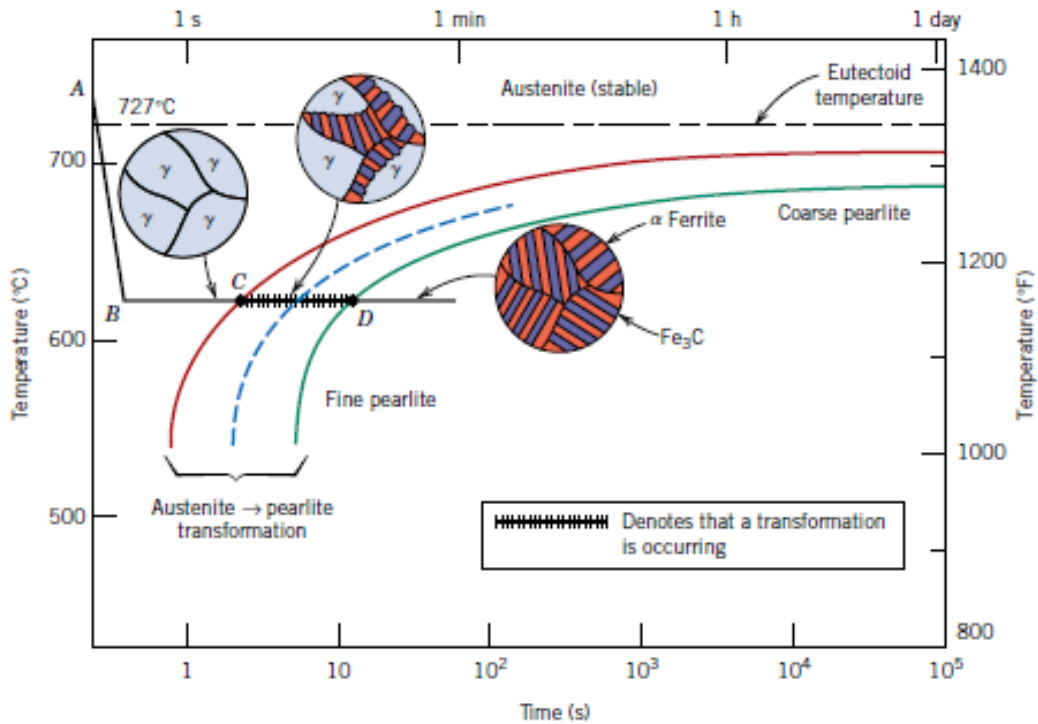
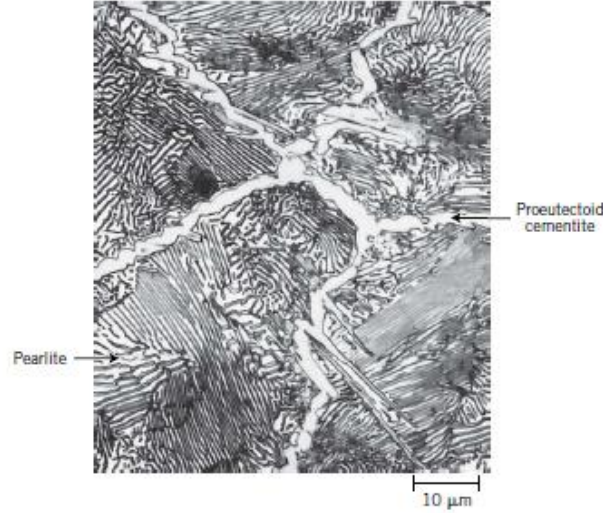
الشكل (1-3) المنحنى الايزوترمي (TTT) للفولاذ اليوتكتويدي ($x_c=0.77\%$)
 a منحنى حركية التحول b منحنى الايزوترم (TTT)



الشكل (2-3)

2.3. المنطقة البرليتية (Zone perlitique): تمتد على مجال درجة الحرارة فيه محصورة بين النقطة A_1 (727°C) و تغير المنحنى الإيزوترمي حوالي 500°C و درجات الحرارة هذه يرافقها تحلل الأوستنيت بالإنشار ليعطى خليط: فريت+ سمنتيت مع بنية رقائبية (شرائحية) الشكل (3-3).

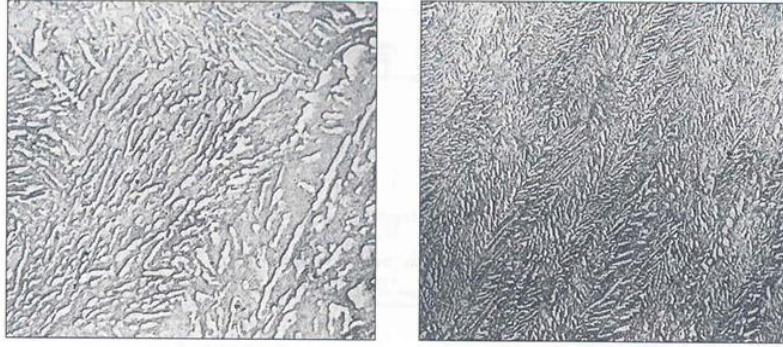
(a)



(b)

الشكل (3-3)

3.3. التحول الباييني (Transformation bainitique): ينتج في درجة حرارة محصورة بين درجة التغير إتجاه المنحنى (نقطة الإنعطاف) و تساوي تقريبا 550 °C و النقطة M_S هذه المنطقة تتميز بعدة خصائص ذاتية عند التحول البرليني (بالإنتشار) و لها أيضا خصائص ذاتية عند التحول المارتنزيتي بدون إنتشار تعديل (تغيير) الأوستنيت المنصهر يؤدي إلى تكون خليط من السمنتيت والطور α البنية تسمى بالباينيت (bainitique) هذه البنية تكون مشبعة بقليل من الكربون وله بنية إبرية (شكل b-3) . وأخيرا في درجة الحرارة الأقل من النقطة M_S الأوستنيت المنصهر يتحول بدون إنتشار إلى مانتزيت.



(b)

(a)

الشكل (4-3)

4.3. التحول البرليني:

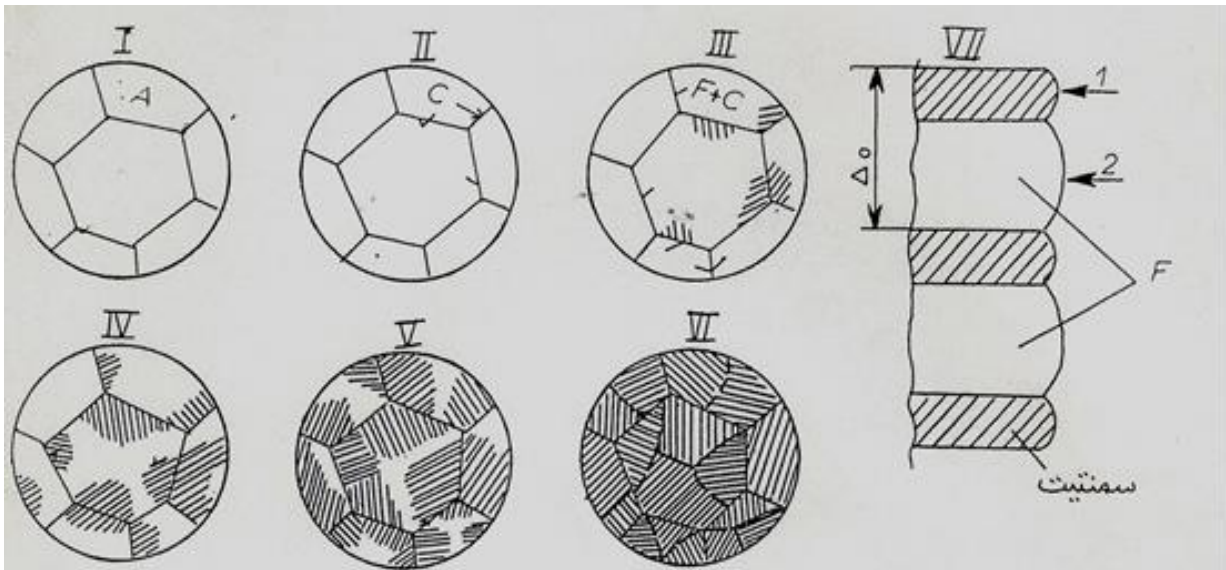
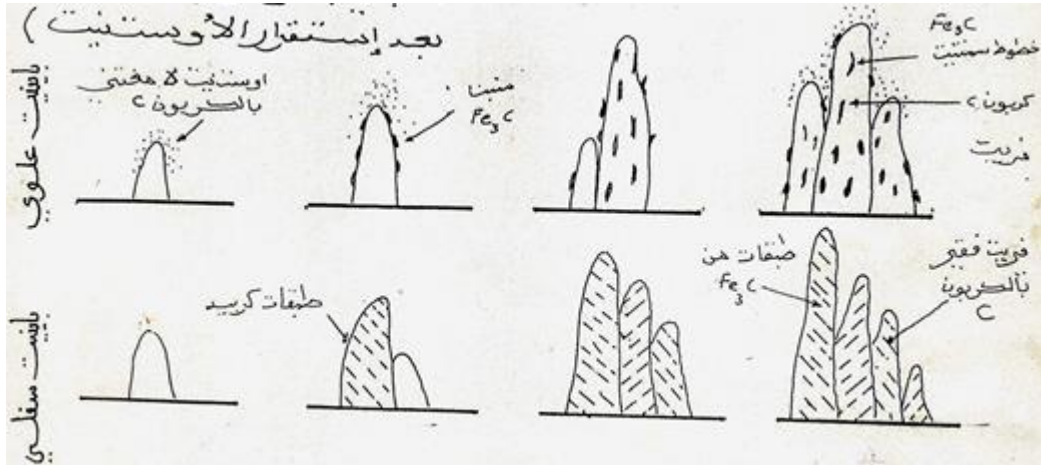
التحول البرليني للأوستنيت فوق المشبع له هيئة بلورية أنجزت بالانتشار وهو على شكل رقائقي، لأن الأوستنيت عمليا متجانس فيما يخص تركيز الكربون، يتحلل الأوستنيت بترسب الفريت (الحديد تقريبا نقي) والسمنتيت الذي يحتوي على 6.7% كربون بعبارة أخرى خليط من الأطوار أين تكون نسبة الكربون فيها متباينة، وحببيات السمنتيت تتشكل عموما على حدود حببيات الأوستنيت للكربون المحيطة بصفيحة السمنتيت والتي تساهم في تحولها إلى الفريت.

-نمو رقائقي الفريت يثري الفريت المحاط بالكربون والذي يرجح التحول $\alpha \rightarrow \gamma$ أكثر صعوبة . وهذا الاوستنيت الغني بالكربون هو منطقة تولد ونمو رقائقي Fe_3C (الكربيد).

هذه الطرق لتكوين ونمو جزيئات Fe_3C تثبت الشروط المساعدة لظهور بلورات جديدة (رقائقي) من الفريت وزيادة رقائقي موجودة من قبل والذي ينتج نمو مشترك (شامل) لبلورات صغيرة من الفريت والسيمنتيت ، واللذان يشكلان أعمدة (طبقات متتالية) من البرليت (الشكل 3-5) .

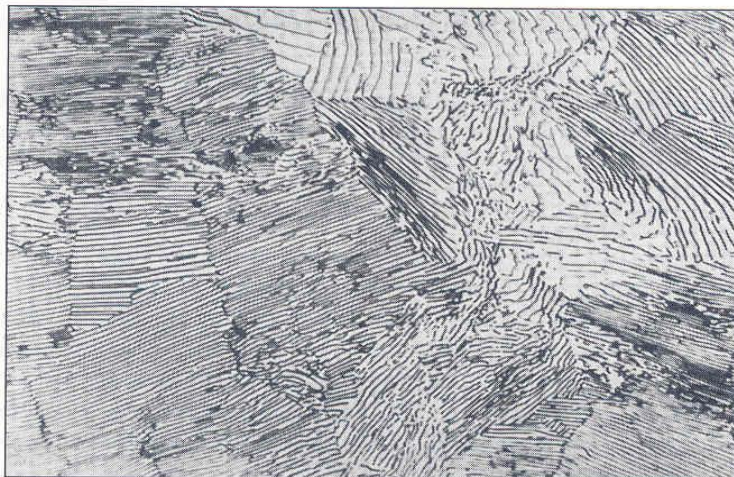
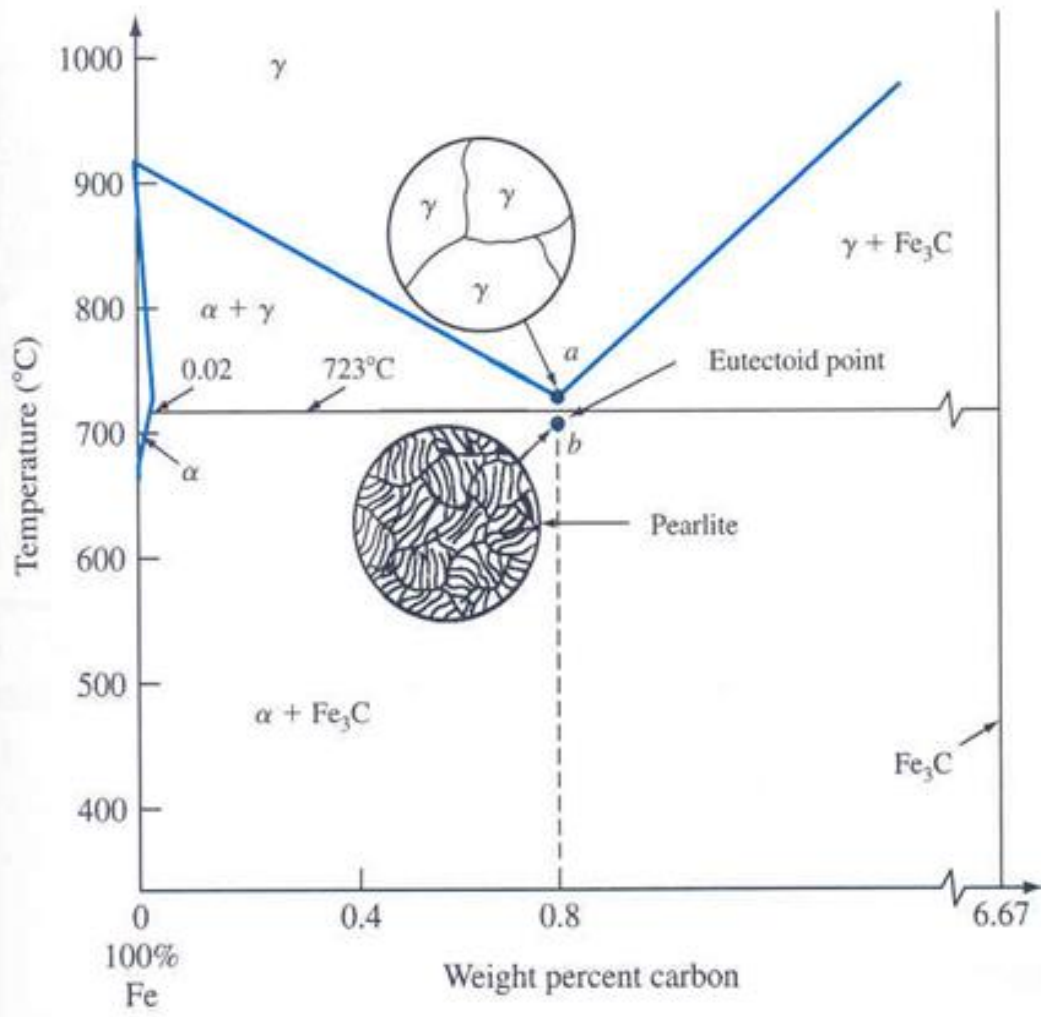
-نتائج التحول البرليني لها بنية رقائقية، كلما كان الإنصهار أقوى كلما كانت بنية الفريت – السيمنتيت : دقيقة (بعبارة أخرى كلما كان البعد المتوسط (الواقع في الوسط) مساوي إلى متوسط سموك (جمع سمك)

لشريحة من الفريت وأخرى من السمنتيت صغيرة كلما كانت الصلاحية كبيرة . البنية الشرائحية على هيئة يوتكتويدي معرفة غالبا مثل البرليت ، سوربيت ، تروستيت (Troostite-sorbite) أو مثل برليت غليظ . مع ذلك يجب أن لا تنسى بأن تقسيم بنية (الفريت- سمنتيت) في البرليت .
 - سوربيت (sorbite) وتروستيت (troostite) اللذان يتشكلان بتحلل الأوستنيت المنصهر بالانتشار هما بنيتان شرائحيتان للفريت والسمنتيت واللذان لا يتميزان بينهما إلا بدرجة التبدد أو الانتشار .



I. الأوستنيت : II. ولادة حبيبات السمنتيت في وصلات حبيبات الأوستنيت
 III. ولادة إبر الفريت IV إلى VII : ولادة ونمو إبر جديدة من السمنتيت والفريت (البرليت)
 VII : إعادة توزيع الكربون أثناء تكوين البرليت
 1. تركيز عالي للكربون (السمنتيت 6,7%)
 2. تركيز منخفض للكربون (الفريت 0,02% C)

الشكل (5-3)



الشكل (6-3)

5.3. التحول المارتنزيتي :

1.5.3. طبيعة المارتنزيت : المارتنزيت هو محلول صلب بإدماج الكربون في الحديد α بنسب أكبر، ففي حالة الإتزان ذوبانية الكربون في الحديد α عند 20 C° لا تتعدى 0.002% نسبها في المارتنزيت يمكن أن تكون نفسها في الأوستنيت الابتدائي ، بعبارة أخرى يمكن أن تصل إلى القيمة الحدية 2.1% في شبكة الحديد α (المارتنزيت) ذات الكربون تحتل الفجوات (المواقع) الثمانية في الإتجاه [001] وتنتج إنحرافات (إلتواءات) قوية في الشبكة، للمارتنزيت شبكة رباعية (الشكل 3-7) أين يساوي البعد "C" أكبر من أو البعد a ، بزيادة نسبة الكربون إرتفاع الموشور الرباعي يزداد بينما البعد a للقاعدة ينقص، وبالتالي كلما كانت النسبة C/a أكبر، بعبارة أخرى كلما كانت رباعية الشبكة كبيرة بالنسبة

$$\frac{C}{a} = 1 + 0.046 G$$

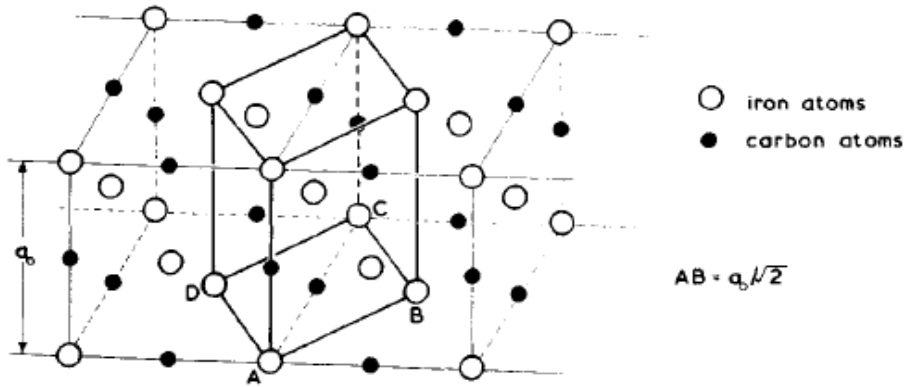
حيث G تركيز الكربون في المارتنزيت ب % (تبعاً للكتلة).

2.5.3. آلية التحول المارتنزيتي :

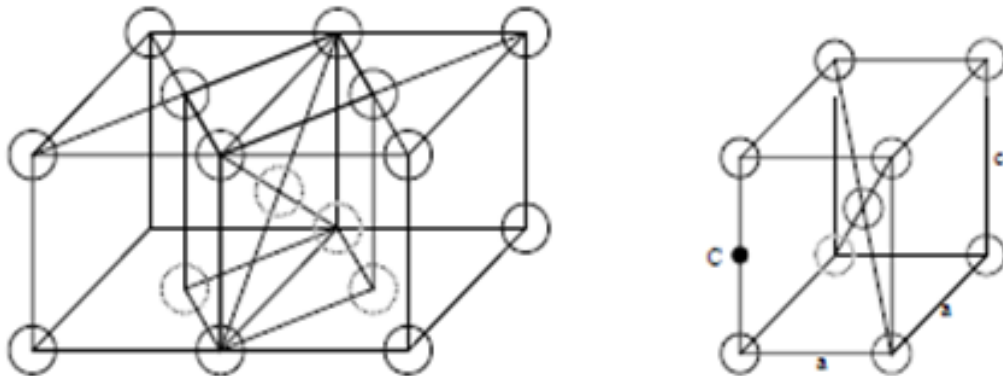
هذا التحول يحدث فقط عندما ينتج لنا التبريد السريع إنصهار الأوستنيت حتى درجات منخفضة و التي ترجع الإنتشار مستحيل. و بالتالي النتوءات تسير بدون إنتشار (أي لا تتبع بإعادة إنتشار ذرات الكربون في شبكة الأوستنيت).

- ◆ التحول المارتنزيتي يتحقق بالإنزلاق بدون تغير تركيب المحلول الصلب الاصيلي (الأوستنيت).
- ◆ آلية هذا الإنزلاق تقوم على الإنتقال التعاوني الموجه للذرات أثناء إعادة تكوين الشبكة البلورية.
- ◆ الذرات المنعزلة تنتقل بعضها بالنسبة للبعض بمسافات لا تتعدى المسافات بين الذرات (نصف ذرية) مع محافظة الكل على الجوار المتبادل و ينتج إنزلاق عياني و الذي يبدأ خارجياً بالظهور على سطح مقطع معدني نتوءات إبرية. و أثناء هذا التحول بلورات المارتنزيت تنضم إلى الأوستنيت تبعاً لمستويات بلورية محددة و لا تتشكل سطوح بينية بين الأطوار.
- ◆ سرعة إنتاج و نمو بلورات المارتنزيت كبيرة جداً أكبر من 10^3 m/s لأن الاضطراب الحراري للذرات يلعب دوراً هاماً في التحول المارتنزيتي و هذه الأخيرة تمشي بسرعة كبيرة نفسها عند درجات حرارة بجوار الصفر المطلق.
- ◆ تلاحم الشبكات يوجد مضطرباً كذلك، عندما تصل بلورة في حال نمو إلى وصلات (الفواصل، الحبيبات) أو عيب بلوري آخر مع اضطراب تلاحم شبكات الممر المعد للذرات الأوستنيت في بلورات المارتنزيت يصبح مستحيل، و الذي يضع حداً لنمو بلورات المارتنزيت.

- ◆ في درجات حرارة منخفضة إنتشار ذرات بلورات الأستنييت في المارتنزيت مستحيل، التحول يتبع تحت فعل تكون بلورات جديدة من المارتنزيت.
- ◆ إتجاه (توجه) بلورات المارتنزيت مرتبط بشبكة الأوستنييت و هذا ما يرجع سرعة نموها مختلفة في إتجاهات مختلفة و ينتج تكوين المارتنزيت على هيئة صفائح منظمة و موجهة في الأوستنييت الإبتدائي.
- ◆ البنية للبلورات المارتنزية و كذا مورفولوجيتها يمكن أن يتغيرا تبعا لتركيب الفولاذ، و بدلالة درجة حرارة تكوينها. المارتنزيت يمكن أن يأخذ شكلين: شرائحي (صفائحي) و شكل عصيات.



The face-centred cubic structure of austenite showing its relationship to a body-centred tetragonal cell based on ABCD.



Maille Quadratique centrée de la martensite

الشكل (7-3)

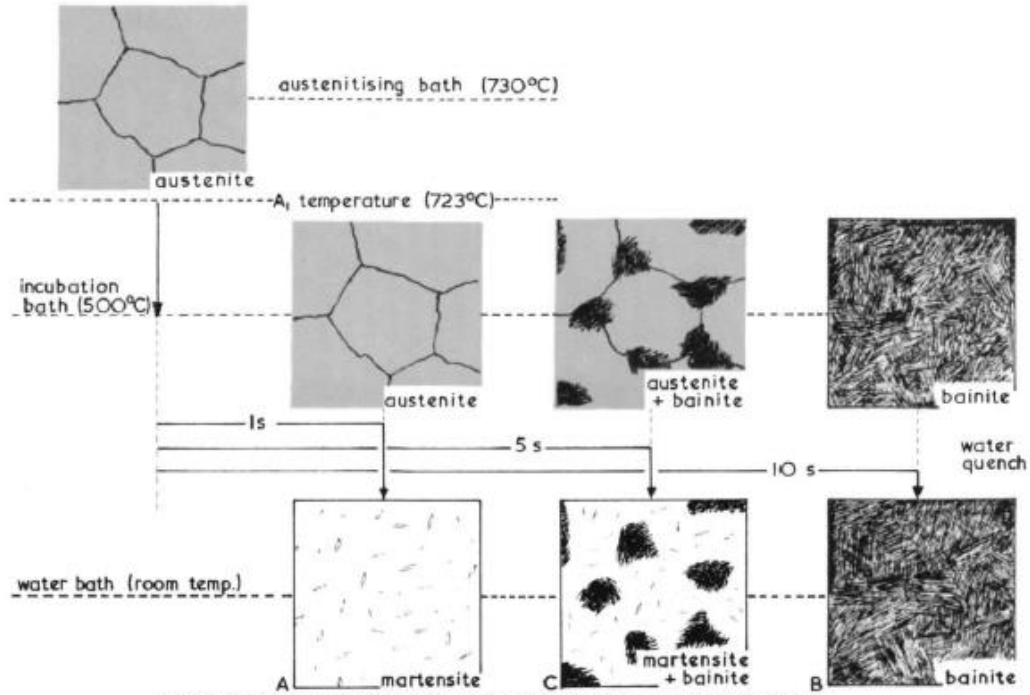
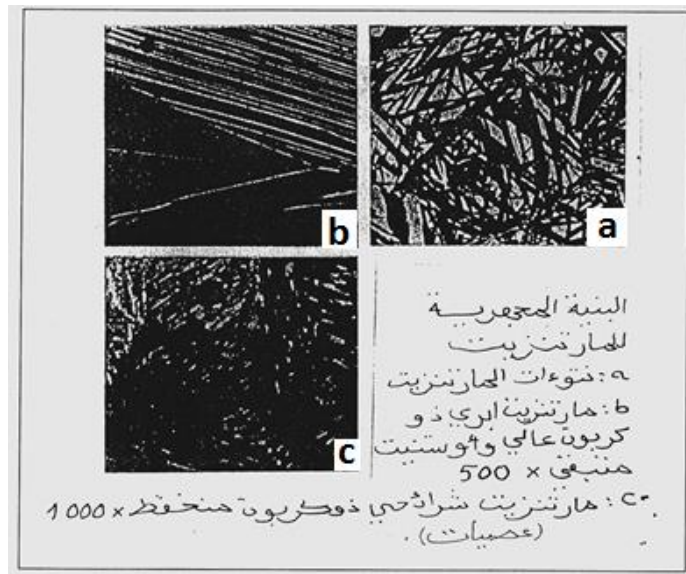


Fig. 12.7 The extent to which transformation takes place during incubation for different time intervals at a fixed temperature.

الشكل (8-3)

3.5.3. المارتنزيت الصفاحي :

يظهر في حالة الفولاذ ذو نسبة الكربون العالية و مميز بدرجة الحرارة المنخفضة لنقاط المارتنزيت. إذن بلورات المارتنزيت تحوي في الوسط من منطقة مركبة من الحبيبات المجهرية تسمى عادة ميديرب midrib وتعني الشريط المتوسط. عرض هذه الأخيرة يمكن أن يصل إلى مئات الأنغسترومات البنية المجهرية لمثل هذا المارتنزيت موضحة في الشكل (b-9-3)، هذه البلورات تشكل شرائح واسعة و في مستوى القطع لها على هيئة إبر.



الشكل (9-3)

و مهما تكن مرفولوجية المارتنزيت فأبعاد البلورة محددة بضخامة حبيبات الأوستنيت البدائية، هذه البلورات أكثر ضخامة من حبايت الأوستنيت و طول أول صفيحة مارتنزيتية يوافق الأبعاد العرضية لحبايت الأوستنيت. والبلورات التي تنشأ عند درجات حرارة منخفضة تشكلها يكون اصعب، و أبعادها أكثر صغرا.

4.5.3. المارتنزيت ذو شكل عصيات :

غالبا ما يكون لبلورات المارتنزيت شكل عصيات رقيقة ممدودة (فولاذ المنشآت) الشكل (c-9-3) و لها نفس الإتجاه.

6.3. حركية التحول المارتنزيتي:

في الحالة العامة التحول المارتنزيتي لا يمكن إخماده بتبريد سريع مثلما هو في تحولات الإنتشار التي تتبع التبلور العادي.

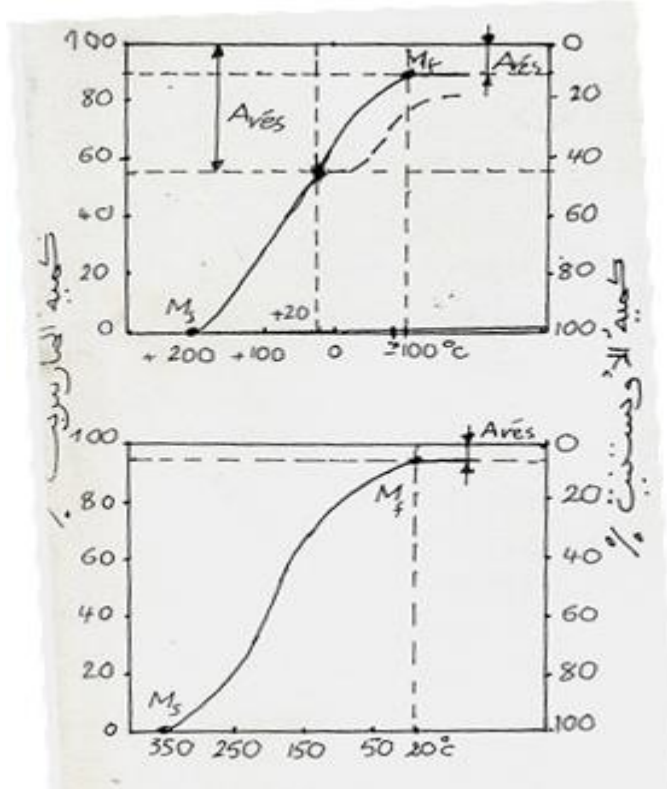
◆ التحول يبدأ من الدرجة M_S (البداية) و الذي لا يحدث في شروط إيزوتارمية (درجة حرارة ثابتة) و لكن في مجال درجة حرارة الإنصهار حتى درجة حرارة M_S تسبب تحول الأوستنيت في المارتنزيت، و لتأمين سير هذا التحول يجب أن يبرد بطريقة مستمرة تحت M_S ، حيث أن الإنقطاع في التبريد يضع عمليا حدا لتحول المارتنزيت.

◆ هذه الطريقة الخاصة تميز بوضوح تحول المارتنزيت لإنتشار البرليت، و الذي يتبع من البداية حتى النهاية في الشروط الإيزوتارمية تحت درجة حرارة أقل من A_1 (727°C)، و بالتالي كمية المارتنزيت المشكلة يمكن أن تعبر بدلالة درجة حرارة تبريد العينة بمنحنى يدعى منحنى المارتنزيت الشكل -3-10-.

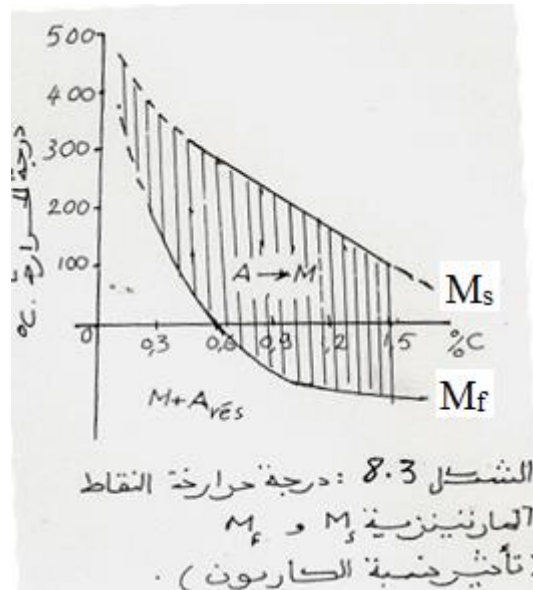
◆ كلما كانت درجة الحرارة منخفضة كلما تكون المارتنزيت.
◆ تحت هذه الشروط كمية المارتنزيت تزداد تحت تأثير تكوين (تشكيل) بلورات دائما جديدة، و ليس بسبب بلورات موجودة من قبل على السطح الفاصل (البيني).
◆ عند الوصول إلى درجة حرارة محددة لكل فولاذ. الأوستنيت يتوقف عن التحول إلى المارتنزيت، هذه الدرجة نرمز لها ب M_f .

◆ موقع النقاط M_S و M_f لا يتعلق بسرعة التبريد و إنما يتعلق بشرط التركيب الكيميائي للأوستنيت. درجة حرارة النقطتين M_S و M_f كذلك أخفض من نسبة الأوستنيت من الكربون المرتفعة شكل -3-11- كل عناصر السبائك بإستثناء الكوبالت و الألمنيوم يخفضان النقطتين M_S و M_f .

◆ تحول المارتنزيت حساس للإجهادات (الضغوط) بينما تشوه الأوستنيت يمكن أن يسبب تحولات نفسها في درجة حرارة أعلى من M_s .



الشكل (10-3) منحنيات تغير نسبة تشكل المارتنزيت و الأوستنيت المتبقي بدلالة درجة الحرارة لعينتان الاعلى ذات تركيز كاربوني عالي و السفلية ذات تركيز متوسط (المنحنى المنقط بعد الاستقرار)



الشكل (11-3) تغير درجة حرارة بداية و نهاية تشكل المارتنزيت بدلالة تركيز الكربون في السبيكة

7.3. الأوستنيت المتبقي: - التحول المارتنزيتي لا يستمر حتى النهاية، و لهذا ففي فولاذ مسقى و الذي فيه النقطة M_f أقل من 20°C خصوصا في الفولاذ الذي نسبة الكربون به أكثر من 0.4% حتى 0.5% الشكل (3-11).

في فولاذ به 0.6% حتى 1% كربون كمية الأوستنيت المتبقية لا تتعدى 10% ، و في فولاذ نسبة الكربون به 1.3% حتى 1.5% فهي تصل إلى 30% أو 50% .

◆ في بعض أنواع الفولاذ أين نسبة الكربون و عناصر السبيكة مرتفعة مثلا: في فولاذ به $1.3\%C$ و $12\%Cr$ أو $0.1\%C$ و $18\%Cr$ و $8\%Ni$ ، كمية الأوستنيت المتبقي يمكن أن تصل بعد التسقية 80% أو 100% . و هذا ما يفسر بدرجة حرارة النقطة M_s التي تنتقل في منطقة درجات الحرارة المنخفضة عندما تكون كمية الأوستنيت المتبقية كبيرة (20% إلى 30%) ، البنية المجهرية للفولاذ المسقى يمكن أن تكون على شكل حقول (مجالات) واضحة بين إبر المارتنزيت شكل (3-9-b).

8.3. إستقرار الأوستنيت:

إذا بردنا أو أبقينا درجة الحرارة مدة من الزمن في مستوى أقل من النقطة M_s مثلا عند درجة 20°C ، الأوستنيت الغير متحول حتى هذه الدرجة يصبح أكثر إستقرارا.

◆ هذا الإستقرار ناتج عن فعل الإنخفاض المتتابع لدرجة الحرارة، و التي لا تؤدي فورا لتحول الأوستنيت إلى المارتنزيت و الذي يبدأ عند درجة حرارة أقل، و يكون بشدة منخفضة. و في هذه الشروط ستتكون كمية من المارتنزيت أضعف من حالة التبريد المستمر.

◆ ظاهرة الإستقرار هذه أكثر شدة (حدة) في مجال درجة الحرارة بين M_s و M_f ، M_f تتعلق بدرجة الحرارة التي عندها التبريد ينقطع.

◆ قوليايف Gouliayev: إقترح النقطة M_{stab} : درجة الحرارة التي تحتها يظهر مفعول الإستقرار، البعض يفسر ظاهرة الإستقرار بإسترخاء الإجهادات التي تنشأ التحول المارتنزيتي.

9.3. إستقرار المارتنزيت:

يتميز المارتنزيت بالصلابة (القساوة) و بمقاومة عالية، صلابة المارتنزيت تزايد مع زيادة نسبة الكربون و مرونة المارتنزيت أين نسبة الكربون أعلى من 0.35% أو 0.4% تكون ضعيفة و سهولة الإنكسار. و لهذا من المستحيل تحديد مقاومة فولاذ المسقى ذو بنية مارتنزيتية.

-زيادة حجم الفولاذ بعد التسقية تتعلق بنسبة المارتنزيت من الكربون

1.2	0.83	0.7	0.6	0.4	نسبة الكربون
*0.9	1.13	0.85	0.46	0.4	الزيادة المئوية في الحجم

(*) هي الحالة التي ينقص فيها الحجم لأنه في بنية الفولاذ المسقى كمية الأوستنيت المتبقي-حيث الحجم الابتدائي صغير-ترداد، و النسبة العظمى للحجم تلاحظ في حالة الفولاذ اليوتكتويدي.

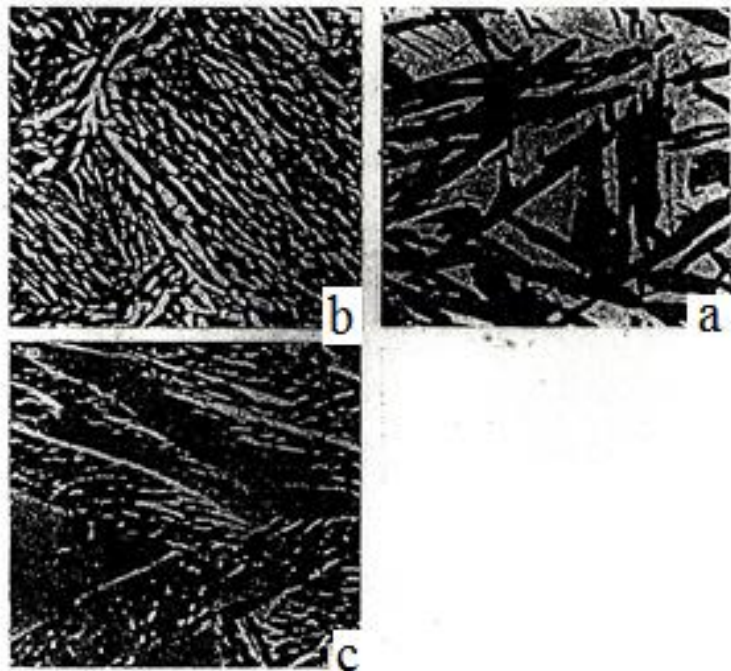
10.3. التحول المتوسط (البائيت):

1.10.3. طبيعة البائيت: التحول البائيتي (المتوسط) ينتج في منطقة درجة الحرارة الواقعة بين التحول البرليتي و المارتنزيتي.

-التحول المتوسط يعمل على تشكيل البائيت و هو عبارة عن بنية مركبة من محلول جامد α ، الخاضع لتحول مارتنزيتي و المشبع بقليل من الكربون و جزيئات السمنتيت.

○ **البائيت العلوي:** يظهر عموماً بين 500°C و 350°C وله بنية على شكل ريش أين جزيئات السمنتيت لا تشكل صفائح كما في البرليت و لكن جزيئات ضيقة و معزولة شكل (a-12-3).

○ **البائيت السفلي:** يظهر في المجال الحراري المحصور بين 350°C و النقطة M_s ، و له بنية إبرية أو مارتنزيتية شكل (b-12-3). جزيئات سمنتيت البائيت السفلي تتوضع في رقائق (صفائح) طور α شكل (c-12-3).



الشكل (12-3) a) باينيت علوي. b) باينيت سفلي. c) ايبيدام (ibidem)

2.10.3. آلية التحول الباييني:

التحول الباييني (المتوسط) للأوستنيت المنصهر ترسب عناصر التحول البرليتي و المارتنزيتي: هجرة الكربون بالانتشار في الأوستنيت و بين نتائج تحله و التحول المارتنزيتي $\alpha \rightarrow \gamma$.

♦ التحول الباييني يسير في درجات حرارة التي ترجع عمليا الإنتشار الذاتي للحديد و إنتشار عناصر السبائك مستحيلا، بينما يكون إنتشار الكربون مرتفعا، و هذا ما يحدد خصائصه.

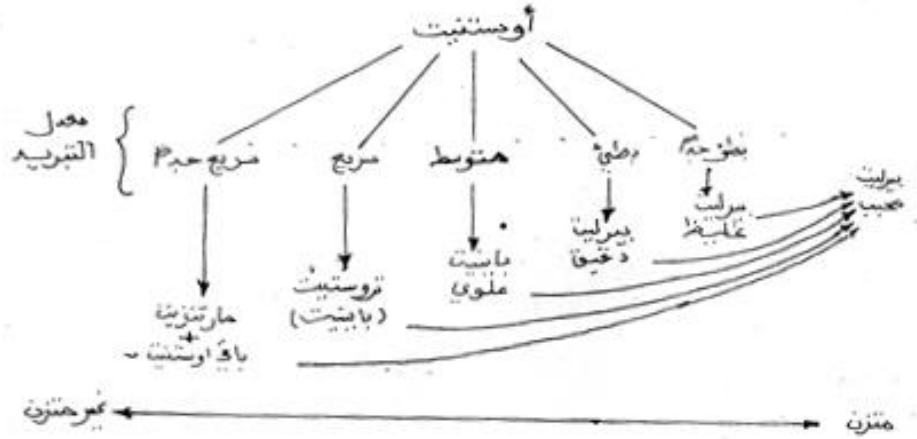
♦ و باعتبار الأوستنيت مركز توزيع الكربون بالانتشار فإنه يؤدي إلى ظهور سطوح غنية و فقيرة من الكربون. سطوح الأوستنيت الفقيرة من الكربون (النقطة M_S) التي تقع في منطقة درجات حرارة التحول المتوسط الشكل (3-11) خاضعة للتحول $\alpha \rightarrow \gamma$ و الذي يحدث تبعا لآلية المارتنزيت.

♦ في حالة فوق التشبع حجوم الأوستنيت أين نسبة الكربون مرتفعة، مكوث درجة الحرارة (الإيزوتارم) يؤدي إلى ترسب السمنتيت و هذا ما يفقر طبيعيا هذه الحجوم من الكربون، و يساهم في تطور التحول تبعا لآلية المارتنزيت.

♦ آلية تكوين البايينيت العلوي و البايينيت السفلي في الأساس نفسها، و الإختلاف يكمن من المحتمل في منطقة التشكيل البايينيت العلوي، بلورات الأوستنيت تعتبر مركز تفريق تركيز الكربون و هذا ما يثري بعض حجوم الأوستنيت بالكربون، و يشترط كذلك تشكيل الطور α الأكثر إفتقارا للكربون و لهذا السمنتيت تحرر من الأوستنيت.

♦ و في حالة البايينيت السفلي نلاحظ الظاهرة العكسية: عموما الأوستنيت يثري شيئا ما بالكربون بينما تشبع الطور α أكثر أهمية. و ينتج بأن السمنتيت يحرق داخل بلورات الفريت كما في الشكل (3-13).

♦ لأوستنيت غير المتحلل بالإبقاء على درجة الحرارة الثابتة يمكن أن يخضع إلى تبريد بالتحول المارتنزيتي أكثر أو أقل قوة أو يحفظ (أوستنيت متبقي).



الشكل (13-3)

11.3. الخصائص الميكانيكية لفولاذ ذو بنية باينيتية:

- تكوين البايينيت العلوي (متحلل عند 550°C أو 450°C) ينقص من لدونة الفولاذ بينما القساوة و المقاومة فلا يتغيران. اللدونة المنخفضة بالباينيت العلوي ناتجة عن تحرير سمنتيت غليظ نسبيا في وصلات الفريت.
- تحلل الأوستنيت الذي يحدث في المنطقة السفلى من التحول المتوسط، المقاومة و الصلابة و اللدونة تكون محسنة قليلا. بالنسبة إلى نتائج تحلل الأوستنيت في منطقة البرليت (سوربيت، تروستيت) الصلابة و مقاومة البايينيت السفلي تزداد بينما اللدونة تبقى مرتفعة.
- الخصائص الميكانيكية الجيدة للباينيت ناجمة عن وجود ذرات الكربون الإنغراسية و الكثافة الكبيرة للإنخلاعات في الطور α (مارتنزيت) و كذلك ناجمة عن تكوين السمنتيت المبعثرة في بلورات هذا الطور.
- المعالجة الحرارية التي تقوم على تطبيق التحول المتوسط -(السقاية في درجة الحرارة ثابتة)- للحصول على باينيت سفلي يجب أن نضمن الرفع من كل الخصائص الميكانيكية و هذا ما يجلب لنا على الخصوص مقاومة تشكيل مرتفعة) و لهذا نلجأ إليها بوفرة في الصناعة من أجل تقسية عناصر الآلات

4. تحول الأوستنيت تحت التبريد المستمر TRC

:Transformation en Refroidissement Continu

إذا كانت لدينا عينات بأبعاد صغيرة بعد العملية الأوستنتيكية ، تخضع لقوانين تبريد مختلفة حسب العينة، بفرق في درجات الحرارة لكل ساعة أو مئات الدرجات لكل ثانية. نستطيع أيضا تصنع بالتقريب قوانين التبريد المميزة لمختلف المواضع لقطعة حسب كثافتها و حسب مائع السقاية المستعمل عند التبريد المستمر أو اونيزوترم (Anisotherme). تحول الأوستنيت نتيجة التبريد المستمر متنوعة بتبريد بطيء جدا (Dilatometrie differentiel)، تبريدات بطيئة و سريعة (Dilatometrie absolue) بالتحليل الحراري و المغناطيسي (تبريدات سريعة جدا).

الإختبارات الميكروغرافية تسمح بتوضيح و تأكيد النتائج للتحليل التمددي (Analyse

$$dilatométrique) \text{ النتائج التجريبية تجمع في بيان } \frac{\theta(^{\circ}C)}{\lg t}$$

نحدد المجالات المختلفة للتحويلات مع تراكب مختلف سرع التبريد المدروسة، نسجل في آن واحد الرسومات المتحصل عليها. تدعى هذه الأخيرة ببيانات TRC.

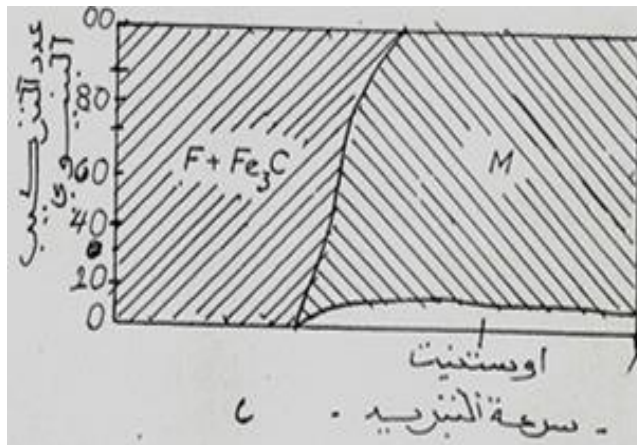
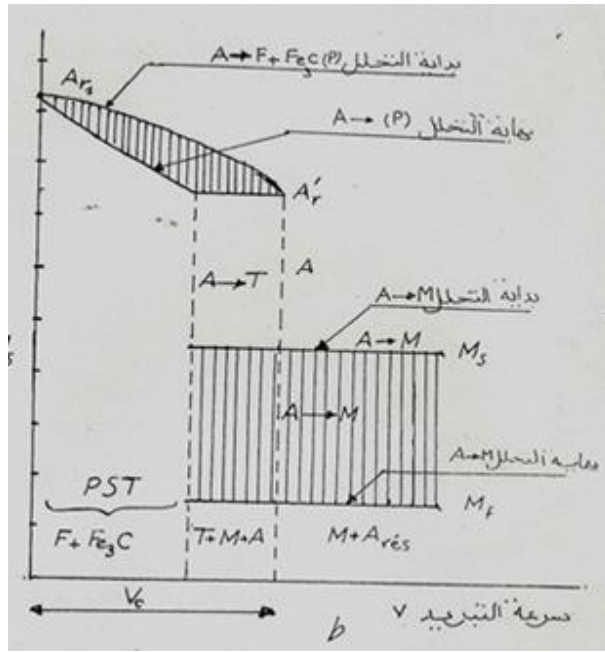
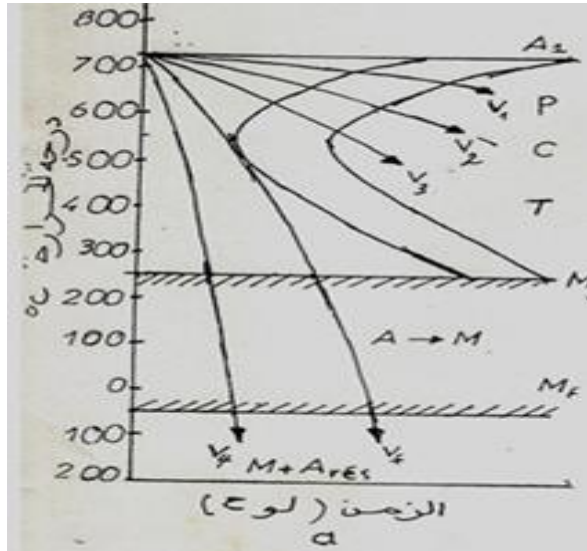
إنصهار الأوستنيت حتى الدرجة A_1 يساوي عمليا طاقته الحرة لتلك الأطوار المستقرة في درجة حرارة منخفضة لهذا و في هذه الشروط تحول الأوستنيت لايمكن أن يحدث. سرعات التبريد الفعلية فوق إنصهار الأوستنيت ينتج تحت النقطة A_1 . الأوستنيت يصبح لا مستقر و يتحول ليكون بنى أكثر إستقرارا. شرط ضروري للحصول على تسقية للفولاذ بعملية السقاية.

الزيادة في سرعة التبريد ترفع من درجة فوق إنصهار الأوستنيت بالنسبة إلى نقطة التوازن A_1 الشكل 3-14 يوضح تأثير سرعة التبريد المطبقة على درجة حرارة تحلل الأوستنيت و على كمية مركبات بنى الفولاذ من الكربون اليوتكتويدي بعد تبريدها. كلما كانت سرعة التبريد كبيرة و درجة حرارة تحلل الأوستنيت منخفضة، كلما كان تراكم فيريت+سمنتيت مشنت (مبعثر) و نفس الشيء في حالة التحلل الإيزوتارمي للأوستنيت و نتيجة لذلك سرعة التبريد الضعيفة V_1 تطلق (تحرض) تكوين البرليت شكل (a-14-3)، و بسرعة أكبر V_2 يتكون السوربيت و بسرعة كبيرة كبيرة أكثر من قبل V_3 يتكون التروستيت، التبريد المستمر لفولاذ مكرن (أي به كربون) عموما لا يعطي وجود تكوين البايينيت.

و بسرعات تبريد كبيرة جزء من الأوستنيت المنصهر حتى النقطة M_S يتحول إلى مارتنزيت، و البنية المتحصل عليها في هذه الحالة تتركب من تروستيت و مارتنزيت.

و عندما يكون التبريد سريع جدا، تحلل الأوستنيت بالانتشار يصبح مستحيل و بالتالي الأوستنيت يخضع إلى فوق إنصهار حتى النقطة M_S و يتحول إلى مارتنزيت.

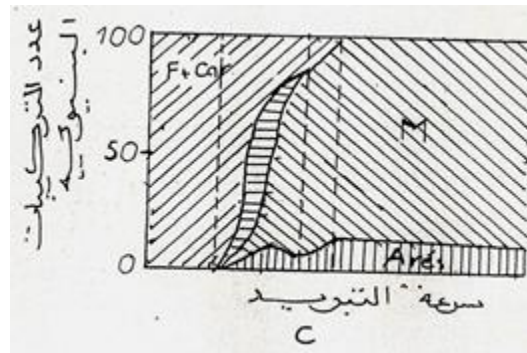
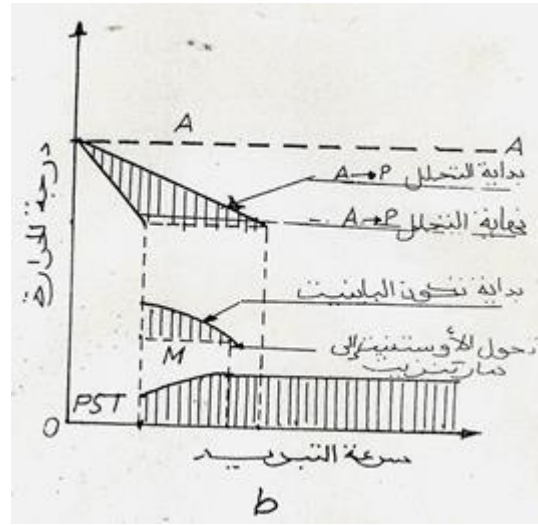
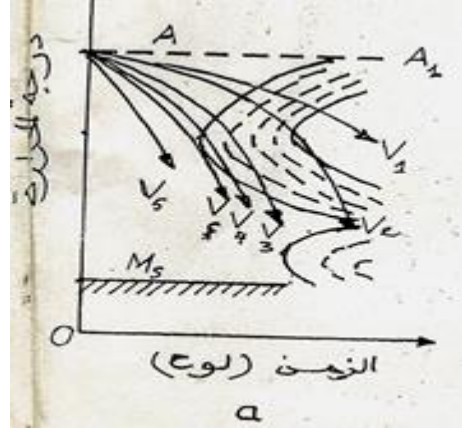
الشكل (a-14-3) المنحنى V_4 . (*)



الشكل (3-14) تطبيق منحنيات التبريد على منحنى TTT للأوستنيت المنصهر
 b مخطط تأثير سرعة التبريد على درجة تكون الأوستنيت
 C نسبة (كمية) المركبات البنيوية لفولاذ يوتكتويدي

- سرعة التبريد الدنيا (المنحنى Vf الشكل (a-14-3)) و التي وافق تحول كل الأوستنيت المنصهر- حتى النقطة M_S - إلى مارتنزيت تسمى السرعة الحرجة للتسقية.
- و في حالة التبريد بسرعه مختلفة لفلوآذ به شوائب نحصل على بنى أكثر تعقيدا، عندما يكون تحلل الأوستنيت في منطقة البيرليت أكثر سرعة من تحلله في منطقة البايينيت التبريد بسرعه ضعيفة لا يؤدي إلى أي تحول بيرليني للأوستنيت (المنحنيان V_1 و V_2) و بتبريد أكثر بسرعه V_3 ينتج تحول برليني متبوع بتحول بايني. في هذه الشروط جزء الأوستنيت و الذي لم يخضع إلى تحلل في المناطق البيرلينية و البايينية يتحول إلى مارتنزيت.
- إذن الفلوآذ يأخذ بنية: البيرليت+ البايينيت+ المارتنزيت و بعض من كميات الأوستنيت المتبقى، التحول الجزئي في منطقة البايينيت يعدل تركيب الأوستنيت: إذ يثرى بالكربون و هذا ما يحفظ نقطة المارتنزيت و رفع كمية الأوستنيت المتبقى الشكل (c-15-3).
- عندما تصبح سرعة التبريد أكبر مرة أخرى V_4 الشكل (c-15-3) التحول الباييني لا يحدث، و نثبت تحلل جزئي في المجال البيرليني و ينتج لنا إنصهار الجزء الكبير للأوستنيت حتى النقطة M_S و يتحول إلى مارتنزيت.
- بعد تبريد الفلوآذ يأخذ البنية: تروستيت+مارتنزيت+أوستنيت متبقى
- عندما تتجاوز سرعة التبريد السرعة الحرجة للتسقية V_f مثلا V_5 الأوستنيت لا يخضع إلا إلى تحول مارتنزيتي.
- -قيمة السرعة الحرجة للتسقية تختلف تبعا للفلوايد و تتعلق بإستقرار الأوستنيت المحدد بتحلل الفلوآذ، و كلما كان إستقرار الأوستنيت كبيرا كلما كانت السرعة الحرجة للتسقية ضعيفة، و من أجل الفلوآذ المكربن هذه الرعة مرتفعة من 800°C/s إلى 200°C/s .
- تحول الأوستنيت إلى مارتنزيت لا يستمر إلى النهاية، و لهذا فالفلوآذ المسقى يسمح دائما بتثبيت - بالإضافة إلى المارتنزيت- كميات من الأوستنيت المتبقى الشكل (c-a-10)
- السرعة الحرجة للتسقية أصغر مايمكن في حالة الفلوآذ البيوتكتويدي
- إستقرار الأوستنيت المنصهر مرتفع كذلك و السرعة الحرجة للتسقية صغيرة كذلك، حيث أن حبيبات الأوستنيت أضخم و تماثله أكثر دلالة (بمعنى درجة حرارة التسخين عالية).

- بزيادة إستقرار الأوستنيت عناصر السبيكة تنقص فجأة السرعة الحرجة للتسقية مثلا: إضافة 1%Cr في الفولاذ بنسبة 1%C تنصف السرعة الحرجة للتسقية و إضافة 0.4%Mo ترجع السرعة من 200 إلى 50°C/s. في هذا الإتجاه فعل المنغنيز و النيكل قوي بينما التنغستن أكثر ضعفا.
- من أجل عدة فواليد بها شوائب، السرعة الحرجة للتسقية تنخفض من 20 حتى 30، و الكوبالت هو العنصر السبائكي الوحيد الذي ينقص من إستقرار الأوستنيت و يرفع من السرعة الحرجة للتسقية.



الشكل (3-16) تحول الأوستنيت المنصهر لفولاذ مشوب ذو استقرار عالي في درجات التحول المتوسطة
a) حركية التحول الأيزותרمي للأوستنيت المنصهر b) تأثير سرعة التبريد على نسبة المركبات المئوية بعد التحول