

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
هيئة التعليم التقني  
المعهد التقني - نجف  
قسم الميكانيك

# ملخص الحقيبة التدريسية

لمادة

المعادن

المرحلة الثانية

من إعداد

سوسن عبد الشهيد

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان المعرفة في علم المعادن	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان:-  ١- يتعرف على علم المعادن ، والتبلور ، والتبلور التشجيرى  ٢- يتعرف على تأثير معدل التبريد على بيئة المعادن	عرض/ حوار  عرض/ حوار	السبورة +النماذج  مكبرة من الرسوم تعرض	٦٠  ٤٠	اسئلة حول المادة موجه للطلبة

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
انتقان المعرفة بالصبات	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادرًا "على ان:- ١- يتعرف على تركيب الكتل المعدنية (تجميد الصبات) ٢- العيوب الشائعة في الصبات	عرض/حوار عرض/ حوار	السيبورة + نماذج مكبرة مرسومة تعرض للطالب	٤٠ ٦٠	اسئلة حول المادة

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان المعرفة في معامل الاكتظاظ الذري	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً "على ان:-  ١- يتمكن في معرفة معامل الاكتظاظ الذري ، الاتجاهات البلورية ، المستويات البلورية  ٢- ظاهرة التأصل	عرض / حوار  عرض / حوار	السيبورة + نماذج مكبرة من الرسوم	٧٠  ٢٠	١- اسئلة حول المادة موجه للطلبة اختبار اسبوعي للدروس السابق لمدة (١٠) دقائق

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان المعرفة في معامل الشبكة البلورية	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً "على ان:-  يتعرف على عيوب الشبكة البلورية  ١- التعرف على التشكيل المرن ٢- التعرف على التشكيل اللدن (الانزلاق، التوأمية	عرض / حوار	السيبورة + نماذج مكبرة من الرسوم	١٠٠  ٨٠  ٢٠	اسئلة حول المادة موجه للطلبة

التغذية الراجعة	الوقت بالدقيقة	الوسائل التعليمية	اسلوب التدريس	الاهداف التعليمية والادائية	انتقان المعرفة بانواع التشغيل
اختبار للدرس السابق لمدة (١٠) دقائق	٢٠	السيبورة +نماذج مكبرة من الرسوم	عرض/ حوار	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً" على ان:-	
	٧٠		عرض/ حوار	٣- التعرف على التشكيل المرن ٤- التعرف على التشكيل اللدن (الانزلاق، التوأمية	

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان المعرفة بالاصلاذ الانفعالي وانواع التشكيل على المعادن	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً "على ان:- ١- يتعرف على الاصلاذ الانفعالي ٢- التشكيل على البارد	عرض / حوار عرض / حوار	السيورة رسوم توضيحية مكبرة	١٠ ٦٠ ٣٠	اسئلة حول المادة لمحاولة المقارنة بين انواع التشغيل

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان الاداء المعرفي للتخمير	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً "على ان:- ١- التعرف على التخمير واعادة التبلور والنمو البلوري	عرض / حوار	السيورة + رسوم توضيحية مكبرة	٨٠	امتحان يومي شفهي بالمحاضرة السابقة لمدة (٢٠) دقيقة



هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان الاداء في منحنيات الاجهاد الانفعال	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً "على ان : -  التعرف على منحنيات الاجهاد الانفعال في الحني، المد، الكسر انواع الكسر التحول من التأثير المطيلي الى الهشي	عرض / حوار	السيورة + رسوم توضيحية مكبرة	١٠٠	اسئلة موجه للطلبة حول المنحني للاجهاد الانفعال

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
انتقان الاداء في الكلال	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان :- ١- معرفة الكلال ٢- الية حدوث الكلال والمواد المقاومة للكلال	عرض / حوار	السيورة نماذج مكبرة من الرسوم	٤٠ ٦٠	اسئله موجه للطلبة حول الكلال

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

الخطة التدريسية للاسبوع العاشر / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان الاداء في الزحف	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان:-  ١- معرفة الزحف والية حدوثه والمواد المقاومة للزحف	عرض / حوار	السيبورة + نماذج مكبرة من الرسوم	١٠٠	اسئلة موجهة للطلبة حول الزحف

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع الحادي عشر / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان الاداء بالمركب والنظام السباتكي	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان:-  ١- يتعرف على المركب الطور، المحلول، الجليد، النظام  ٢- الاتزان ، تكوين السباتك الخليط الميكانيكي الايو تكيل	عرض / حوار	السيبورة نماذج مكبرة من الرسوم	٤٠  ٦٠	اسئلة موجه للطلبة حول الموضوع

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع الثاني عشر / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة

انتقان الاداء في  
مخططات  
التوازن  
الحراري

الاهداف التعليمية والادائية

- سيكون الطالب في نهاية  
الدرس قادراً " على ان:-
- ١- لمخطط الاتزان الحراري  
لنظام ثنائي تام الاذابة في  
الحالة السائلة والصلبة
  - ٢- مخطط الاتزان الحراري  
لنظام ثنائي تام الاذابة في  
الحالة السائلة وعديم الاذابة  
في الحالة الصلبة (الايونكتيل)

اسلوب التدريس

عرض / حوار

الوسائل التعليمية

السيورة  
نماذج مكبرة من  
الرسوم

الوقت بالدقيقة

٢٠

٦٠

التغذية الراجعة

اسئلة موجه للطلبة  
حول الموضوع

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

خطة التدريسية للاسبوع الثالث عشر / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عددالساعات = ٢ اسبوعياً

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

التغذية الراجعة

الوقت بالدقيقة

الوسائل التعليمية

اسلوب التدريس

الاهداف التعليمية والادائية

هدف المهمة

حل مسائل داخل  
الشعبة وعلى هيئة  
مجاميع

١٠٠

السيبورة

عرض / حوار

سيكون الطالب في نهاية  
الدرس قادراً " على ان:-  
١- مخطط الاتزان الحار  
لنظام ثنائي تام الاذابة  
في الحالة السائلة ومحدد  
الاذابة في الحالة الصلبة

اتقان الاداء في  
مخطط الاتزان  
الحراري للنظام  
ثنائي تام الاذابة

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع الرابع عشر / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان الاداء في مخطط الاتزان الحراري ثنائي تام الاذابة في الحالة السائلة ومركب كيمياوي عند الاعتماد	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان:- مخطط الاتزان الحراري لنظام ثنائي تام الاذابة في الحالة السائلة ويكون مركب كيمياوي عند الانجماد	عرض / حوار	السبورة	١٠٠	حل امثلة داخل الشعبة

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان الاداء في الحديد كربون ومخطط اتزانه	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان :- ١- يتعرف على الحديد وذوبان الكربون في الحديد ٢- مخطط الاتزان الحاري لنظام حديد / الكربون واهم التفاعلات التي يتضمنها المخطط	عرض/ حوار	السيبورة + رسوم مكبرة	٦٠+١٠٠	اسئلة موجه للطلبة حول المخطط



هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان الاداء في الاوستنايت وتحولاته	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان:-  ٣- يتعرف على تكوين الايوستنايت والية تحول البرلايت الى اوستنايت  ٤- تحولات الاوستنايت بثبوت درجة الحرارة	عرض/ حوار	السيبورة + نماذج مكبرة من الرسوم	١٠٠	اسئلة موجه للطلبة حول المادة

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع التاسع عشر + العشرون / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
انتقان المعرفة بالمعاملات الحرارية (التلدين المعادلة التقسية المراجعة)	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان:- ١- يتعرف على المعاملات الحرارية (التلدين، المعادلة التقسية المراجعة)	عرض / حوار	السيبورة + رسوم توضحية مكبرة	١٠٠	١- اسئلة حول المعاملات ٢- اختبار حول المادة السابقة (الاستنتاجات)

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع الحادي والعشرون / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة

اتقان المعرفة  
بالتقسية  
السطحية

الاهداف التعليمية والادائية

سيكون الطالب في نهاية الدرس  
قادراً " على ان:-

يتعرف على التقسية  
السطحية ( الكربته، النترده،  
الستيدة) والمعاملات  
الحرارية

اسلوب التدريس

عرض/ حوار

الوسائل التعليمية

السيبورة + رسوم  
توضحية مكبرة

الوقت بالدقيقة

٩٠

التغذية الراجعة

١- اختباريومي  
بعد الانتهاء  
من المحاضرة  
لمدة (١٠)  
دقائق بالمادة  
التقسية

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية الثاني والعشرون / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة

اتقان المعرفة  
بالصلب  
السيانكي

الاهداف التعليمية والادائية

سيكون الطالب في نهاية الدرس  
قادراً " على ان:-

١- يتعرف على الصلب  
السيانكي على خواص  
الصلب

اسلوب التدريس

عرض / حوار

الوسائل التعليمية

السيورة

الوقت بالدقيقة

٩٠

التغذية الراجعة

امتحان بعدي  
(بعد انتهاء  
المحاضرة  
لمدة (١٠)  
دقائق

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع الثالث والعشرون/ معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عددالساعات= ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة

اتقان المعرفة  
بالصلب المقاوم  
للصدأ (صلب  
العدد)

الاهداف التعليمية والادائية

سيكون الطالب في نهاية الدرس  
قادراً " على ان:-

يتعرف على الصلب  
المقاوم للصدأ صلب العدد

اسلوب التدريس

عرض/ حوار

الوسائل التعليمية

السمبورة

الوقت بالدقيقة

١٠٠

التغذية الراجعة

اسئله حول المادة  
موجه للطلبة

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع الرابع والعشرون + الخامس والعشرون/ معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة

انتقان المعرفة  
بحديد الزهر

الاهداف التعليمية والادائية

سيكون الطالب في نهاية الدرس  
قادراً " على ان:-

يتعرف على انتاج حديد  
الزهر ومعاملاته الحرارية

اسلوب التدريس

عرض/ حوار

الوسائل التعليمية

السيبورة + رسوم  
توضحية

الوقت بالدقيقة

١٠٠

التغذية الراجعة

اسئله حول المادة  
موجه للطلبة

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني  
الزبيدي

خطة التدريسية للاسبوع السادس والعشرون / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد

هدف المهمة

اتقان المعرفة  
بالتأكل

الاهداف التعليمية والادائية

سيكون الطالب في نهاية الدرس  
قادراً " على ان :-

- ١- يتعرف على التأكل
- ٢- التكاليف الاقتصادية  
المباشرة وغير المباشرة  
للتأكل
- ٣- الية حدوث التأكل

اسلوب التدريس

عرض / حوار  
عرض / حوار

عرض

الوسائل التعليمية

السيبورة  
السيبورة

السيبورة

الوقت بالدقيقة

٤٠  
٤٠  
٢٠

التغذية الراجعة

اسئلة موجه للطلبة  
حول التأكل

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع السابع والعشرون + والثامن والعشرون/ معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عددالساعات= ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان المعرفة بانواع التآكل	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان:- ١- يتعرف على السلبية وقانون فاراداي ٢- يتعرف على انواع (تآكل كلفاني تآكل كهفي)تآكل مصاحب للتربة ، التآكل الاختباري التآكل ما بين البلورات) التآكل المصاحب للاجهاد	عرض/ حوار  عرض/ حوار	السيبورة  نماذج مكبرة من الرسوم	٦٠  ٤٠	امتحان بعدي لمدة (١٥) دقيقة من التآكل



قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع التاسع والعشرون / معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عدد الساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة

اتقان المعرفة  
في الاختبار  
الامتثل للمادة

الاهداف التعليمية والادائية

سيكون الطالب في نهاية الدرس  
قادراً " على ان:-

يتعرف على الاختبار  
الامتثل للمادة

اسلوب التدريس

عرض / حوار

الوسائل التعليمية

السبورة

الوقت بالدقيقة

١٠٠

التغذية الراجعة

اسئله حول المادة  
موجه للطلبة

قسم / الميكانيك  
الصف : الثاني

خطة التدريسية للاسبوع الثلاثون/ معادن  
للعام ٢٠٠٩-٢٠١٠ عددالساعات = ٢ اسبوعياً

المادة : معادن  
المدرس : سوسن عبد الشهيد الزبيدي

هدف المهمة	الاهداف التعليمية والادائية	اسلوب التدريس	الوسائل التعليمية	الوقت بالدقيقة	التغذية الراجعة
اتقان المعرفة في طرق الوقاية من التآكل	سيكون الطالب في نهاية الدرس قادراً " على ان:- يتعرف على طرق الوقاية من التآكل	عرض/ حوار	السبورة	٧٥	اختبار شامل عن التآكل (٢٥ دقيقة)

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/284167493>

## الباب الثالث - خصائص البلورات-3

Data · November 2015

CITATIONS  
0

READS  
3,918

1 author:



[Yosry Moustafa](#)

Umm Al-Qura University & Mansoura University

107 PUBLICATIONS 897 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



ترجمة كتاب علم الصوتيات تأليف ليو أل. بيرناك [View project](#)



موسوعة التأثيرات والطواهر الفيزيائية وتطبيقاتها [View project](#)

الباب الثالث  
خصائص البلورات

# Crystals Properties





## الباب الثالث

### خصائص البلورات

## Crystals Properties

### المحتوى

- 1-3 الاتجاهات البلورية.
- 2-3 المسافة الفاصلة بين المستويات المتوازية.
- 3-3 العلاقة بين المسافة الفاصلة بين المستويات المتوازية وثابت الشبيكة المكعبة.
- 4-3 النطاق ومحور النطاق
- 5-3 الزوايا بين النطاقات.
- 6-3 التركيب الذرى للبلورات.
- 7-3 العبوة المتراسة المكعبة والسداسية.
- 8-3 خصائص التركيب المكعبى المتمركز الأوجه والمتمركز الجسم.
- 9-3 التركيب البلوري لبعض البلورات البسيطة.
- 10-3 تعيين طاقة ترابط البلورة الأيونية.

### الأهداف

بعد استكمال دراسة هذا الباب يكون الدارس قادراً على:-

- وصف الاتجاهات البلورية بواسطة أدلة ميلر.
- تعيين المسافة بين المستويات المتوازية بدلالة أبعاد الخلية.
- تعريف النطاق ومحور النطاق وحساب الزوايا بين النطاقات.
- حساب عدد الذرات في البلورة وتعيين نصف القطر الذرى.
- فهم معنى عدد التناسق للذرة وكيفية حسابه.
- معرفة خصائص التركيب المكعبى المتمركز الأوجه والمتمركز الجسم.
- شرح التركيب البلوري للعبوة المتراسة المكعبة والسداسية.
- شرح التركيب البلوري لبعض البلورات البسيطة وحساب كثافة الرص لها.
- استنتاج الصيغة الرياضية لطاقة الترابط فى البلورة الأيونية.

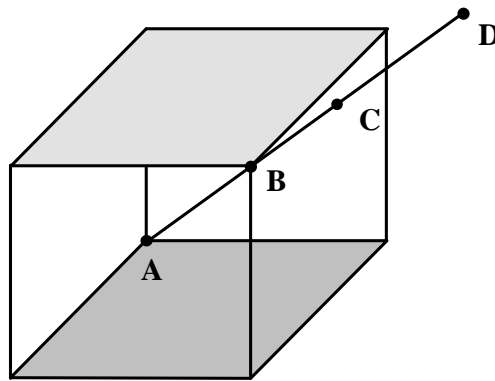
### 1-3 الاتجاهات البلورية CRYSTAL DIRECTIONS

نظرا لعدم تجانس الخواص الفيزيائية للبلورات في الاتجاهات البلورية المختلفة، فإنه من الواجب إيجاد طريقة لتعيين الاتجاهات في البلورة وتحديد مسميات لها. في الباب السابق، تم وصف المستويات البلورية بأدلة ميلر، وفي هذا الفصل سنعين أدلة ميلر للاتجاهات في البلورة.

يمكن تحديد الاتجاه في البلورة كما يلي. افترض أن خط مستقيم يمر عبر نقط الشبكة A و B و C، كما هو مبين بالشكل 1-3. لتحديد هذه النقط، نختار نقطة من نقط الشبكة ونعتبرها نقطة الأصل ولتكن النقطة A. ثم نختار متجه الشبكة الذي يصل النقطة A بأي نقطة على الخط ولتكن النقطة B، وهكذا. يمكن التعبير عن هذا المتجه بواسطة متجهات الأساس على الصورة،

$$\vec{R} = n_1 \vec{a} + n_2 \vec{b} + n_3 \vec{c} \quad 1-3$$

يتحدد الاتجاه، الآن، بمجموعة من الأعداد هي  $[n_1, n_2, n_3]$ . يجب حذف العامل المشترك بين هذه الأعداد إن وجد، بمعنى يجب أن تكون هذه المجموعة هي أصغر الأعداد التي لها نفس النسبة. وهكذا، يكون الاتجاه المبين في الشكل 1-3 ويرمز له بدلالة أدلة ميلر على النحو  $[111]$ .



الشكل 1-3 المتجه البلوري.



يلاحظ أن أدلة الاتجاه لاتجاه معين هي نفسها أدلة ميلر للمستوى العمودي على

هذا الاتجاه، فمثلا الأدلة [321] هي أدلة الاتجاه العمودي على المستوى (321).

عندما يتوفر لخلية الوحدة بعض التماثل الدوراني، فربما يوجد العديد من

الاتجاهات غير المتوازية والتي تكون متكافئة من وجهه نظر التماثل، وبالتالي نجد أن

الاتجاهات [100] و [010] و [001] في البلورة المكعبة متكافئة. يشار إلى جميع الاتجاهات

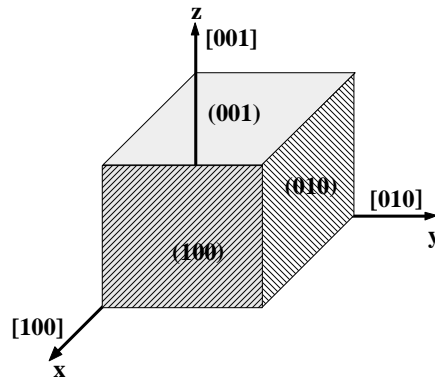
المتكافئة مع الاتجاه  $[n_1n_2n_3]$  بالرمز  $\langle n_1n_2n_3 \rangle$  ذي الأقواس الزاوية وهكذا، فإن

الرمز  $\langle 100 \rangle$  في نظام المكعب يشير إلى الاتجاهات الستة التالية، [100]، [010]،

[001]،  $[0\bar{1}0]$ ،  $[\bar{1}00]$ ،  $[00\bar{1}]$ . تدل الإشارة السالبة فوق العدد إلى القيمة السالبة للعدد،

وبالمثل فإن الرمز  $\langle 111 \rangle$  يشير إلى أقطار المكعب، الذي لا يكافئ الاتجاه  $\langle 100 \rangle$  بالطبع.

يبين الشكل 2-3 أدلة ميلر لثلاثة أوجه في المكعب وأدلة ميلر للاتجاهات العمودية عليها.



الشكل 2-3 الاتجاهات الأساسية في المكعب.

### مثال 1-3

أرسم المستوى (110) والمتجه [110] في المكعب البسيط.

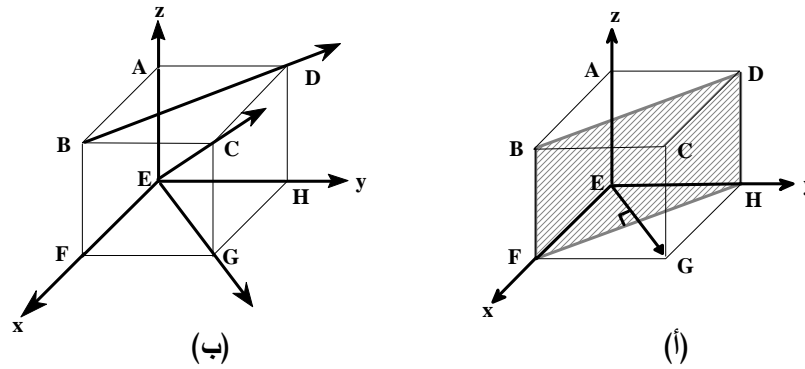
الحل

من الشكل 3-3 (أ) يكون المستوى BFHD هو المستوى (110) حيث تكون

تقاطعات هذا المستوى مع المحاور هي  $\frac{1}{1}, \frac{1}{1}, 0$  أي  $1, 1, \infty$ . المتجه  $\vec{EG}$  هو المتجه

العمودي على المستوى السابق وله الأدلة [110] ويكون مسقطه على محور x يساوى 1

وعلى المحور y هو 1 ومسقطه على محور z هو 0.



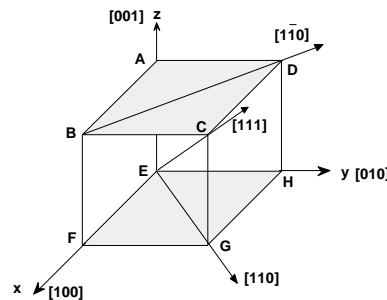
الشكل 3-3

مثال 2-3

عين أدلة ميلر للمتجهات المحددة في الشكل 3-3 (ب).

الحل

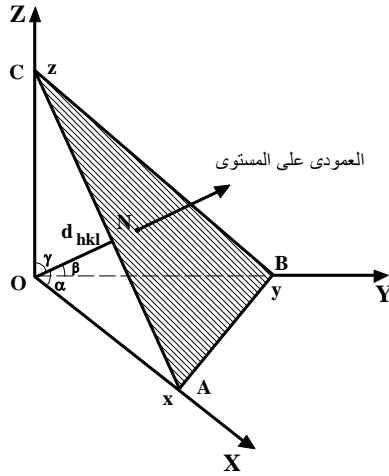
تكون أدلة ميلر للمتجهات المبينة بالشكل 3-3 (ب) كما هو مبين بالشكل 4-3.



الشكل 4-3

### 2-3 المسافة الفاصلة بين المستويات المتوازية

في تشتت الأشعة السينية بواسطة البلورة يحتاج المرء لمعرفة المسافة الفاصلة بين المستويات المتوازية (التي يكون لها نفس أدلة ميلر،  $(hkl)$ ). دعنا نرمز لهذه المسافة بين المستوى  $(hkl)$  و نقطة الأصل بالرمز  $d_{hkl}$ . تعتمد المعادلة الحقيقية التي تعبر عن هذه المسافة على التركيب البلوري، حيث سنعتبر فيما يلي فقط الحالة التي تكون فيها المحاور متعامدة، بهدف التبسيط (وسوف ندرس حالة المكعب بالتفصيل في فصل لاحق). يمكننا حساب تلك المسافة وذلك بالرجوع إلى الشكل 3-5.



الشكل 3-5 إيجاد المسافة بين المستويات.

ينتمي المستوى المظلل إلى مجموعة المستويات  $\langle hkl \rangle$ . نتخيل مستوى آخر موازى للمستوى المظلل ويمر بنقطة الأصل. وهكذا فإن طول العمود ON المرسوم من نقطة الأصل على هذا المستوى يمثل المسافة  $d_{hkl}$  التي تفصل بين هذه المجموعة من المستويات المتوازية. نفترض أن هذا العمودي يصنع زوايا  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$  مع المحاور X و Y و Z وأن المستوى يقطع هذه المحاور في النقاط x و y و z، على وجه الترتيب.

يتضح من الشكل 3-5 أن:

$$d_{hkl} = x \cos \alpha = y \cos \beta = z \cos \gamma. \quad 2-3$$

وحيث أنه طبقا لقانون جيب تمام الزاوية يكون

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1. \quad 3-3$$

من المعادلتين السابقتين 2-3 و 3-3 وبعد التعويض عن جيوب التمام للزاويا نحصل على

تعبير للمسافة  $d_{hkl}$  التي تفصل بين المستويات المتوازية  $\langle hkl \rangle$  على الصورة الآتية،

$$\therefore d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{x^2} + \frac{1}{y^2} + \frac{1}{z^2}}} \quad 4-3$$

وحيث أن المسافات المقطوعة  $x$  و  $y$  و  $z$  ترتبط بأدلة ميلر  $h$  و  $k$  و  $l$  بالعلاقة،

$$h = n \frac{a}{x}, \quad k = n \frac{b}{y}, \quad l = n \frac{c}{z} \quad 5-3$$

حيث  $n$  هو عامل مشترك يستخدم لاختزال الأدلة إلى أصغر أعداد ممكنة و  $a$  و  $b$  و  $c$  هي

أبعاد الخلية. بالتعويض بهذه المعادلة في المعادلة 4-3 وبحذف  $x$  و  $y$  و  $z$  نحصل على

العلاقة،

$$\therefore d_{hkl} = \frac{n}{\sqrt{\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}}}. \quad 6-3$$

ومن هذه المعادلة يمكن حساب المسافة بين المستويات بمعرفة أدلة ميلر وفواصل البلورة

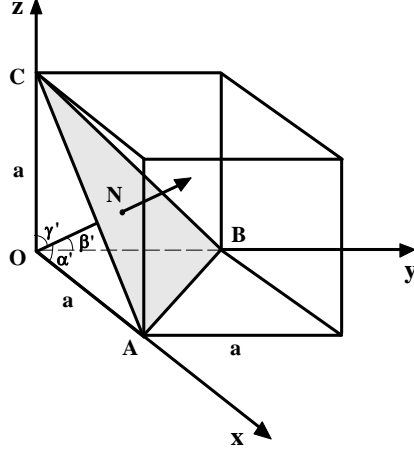
(أبعادها).

### 3-3 العلاقة بين المسافة الفاصلة بين المستويات المتوازية وثابت الشبكة المكعبة

لتعيين العلاقة بين المسافة الفاصلة بين المستويات المتوازية ( $d$ ) وثابت الشبكة

للمكعب (a) نفرض أن المستوى المظلل في الشكل 6-3 ينتمي إلى مجموعة المستويات

$$\cdot \langle hkl \rangle$$



الشكل 6-3

يمثل العمود ON المرسوم من نقطة الأصل على هذا المستوى المسافة d التي

تفصل بين هذه المجموعة من المستويات المتوازية. نفترض أن هذا العمودي يصنع زوايا

$\alpha'$  و  $\beta'$  و  $\gamma'$  مع المحاور x و y و z على وجه الترتيب. وحيث أن مسافات تقاطع هذا

المستوى مع المحاور هي  $OA = \frac{a}{h}$  و  $OB = \frac{a}{k}$  و  $OC = \frac{a}{l}$  وحيث أن  $ON = d$ ، إذن يتضح

من الشكل 6-3 أن:

$$\cos \alpha' = \frac{d}{OA} = \frac{dh}{a}$$

$$\cos \beta' = \frac{d}{OB} = \frac{dk}{a}$$

$$\cos \gamma' = \frac{d}{OC} = \frac{dl}{a}$$

وحيث أنه طبقا لقانون جيب تمام الزاوية يكون

$$\cos^2 \alpha' + \cos^2 \beta' + \cos^2 \gamma' = 1$$

$$\therefore \left( \frac{dh}{a} \right)^2 + \left( \frac{dk}{a} \right)^2 + \left( \frac{dl}{a} \right)^2 = 1$$

$$\therefore \frac{d^2}{a^2}(h^2 + k^2 + l^2) = 1$$

أو

$$\therefore d^2 = \frac{a^2}{h^2 + k^2 + l^2}$$

$$\therefore d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

7-3

وهكذا، نجد أن المسافة بين المستويات (111) في بلورة المكعب البسيط هي

$$d = \frac{a}{\sqrt{3}}, \text{ حيث } a \text{ هو طول ضلع المكعب.}$$

### مثال 3-3

إذا كان التركيب البلوري للرصاص هو FCC ونصف القطر الذري للرصاص هو

1.746 وحدة ذرية (au). أوجد المسافة بين مجموعة المستويات  $\langle 200 \rangle$ .

### الحل

كما سنبين لاحقاً، أن العلاقة بين نصف قطر الذرة وطول ضلع المكعب المتمركز

الأوجه، FCC،  $a = \frac{4r}{\sqrt{2}}$  فإنه في حالة بلورة الرصاص نحصل على،

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}} = \frac{4 \times 1.746}{\sqrt{2}} = 4.93 \text{ au} .$$

وحيث أن لمجموعات المستويات  $\langle 200 \rangle$  يكون لها قيم المعاملات  $h = 2$  و  $k = 0$  و  $l = 0$ ،

فإن المسافة بين هذه المستويات تكون،

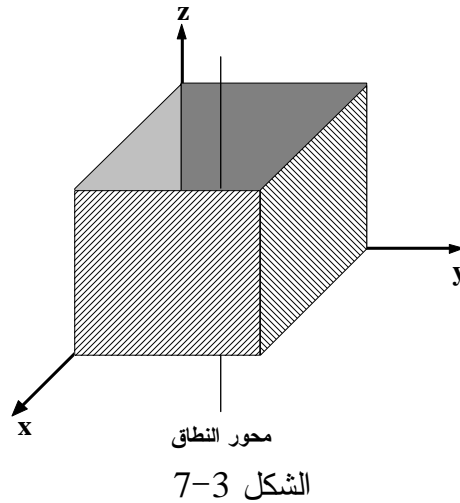
$$\therefore d_{200} = \frac{4.93 \text{ au}}{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}} = 2.456 \text{ au} .$$

### ZONE AND ZONE AXIS

### 4-3 النطاق ومحور النطاق

تقع بعض أوجه البلورة غالبا في مجموعة ويقال أن هذه المجموعة من الأوجه موجودة في نطاق واحد والاتجاه الموازي لهذه المجموعة يسمى محور النطاق ويمر بمركز البلورة. فمثلا، المستويات الرأسية الأربعة في المكعب (جوانب المكعب) تقع في نطاق واحد (رأسي)، كما هو مبين بالشكل 3-7. وعندما يتلاقى مستويان يقعان في نطاق واحد ويكونان غير متوازيين فإن اتجاه تقاطعهما يكون موازيا لمحور النطاق  $[uvw]$  ومن ثم يمكن تعيين اتجاه محور النطاق باستخدام قانون فايس (Weiss) الآتي ذكره.

تعرف العلاقة بين أدلة ميلر  $(uvw)$  للمستوى وأدلة اتجاه محور النطاق  $[uvw]$  بقانون فايس. ينص قانون فايس على أنه إذا كان  $[uvw]$  هو اتجاه محور النطاق وكانت  $(hkl)$  هي أدلة ميلر لمستوى في النطاق فإن  $hu + kv + lw = 0$ . يمكن استخدام هذا القانون لإيجاد أدلة الاتجاه لمتجه يقع في مستويين، كما يتبين في المثال التالي.



#### مثال 3-4

بفرض أن المتجه  $[uvw]$  يقع في كل من المستوى  $(h_1k_1l_1)$  والمستوى  $(h_2k_2l_2)$

والمطلوب إيجاد أدلة هذا المتجه بدلالة أدلة ميلر للمستويين.

### الحل

طبقا لقانون فايس وحيث أن المتجه  $[uvw]$  يقع في المستوى  $(h_1k_1l_1)$  فإن،

$$h_1u + k_1v + l_1w = 0 \quad 8-3$$

وبالمثل، بما أن المتجه  $[uvw]$  يقع في المستوى  $(h_2k_2l_2)$  نحصل على

$$h_2u + k_2v + l_2w = 0 \quad 9-3$$

بحل المعادلتين السابقتين يمكن الحصول على أدلة الاتجاه  $[uvw]$ .

من الواضح انه لا يمكن حل المعادلتين السابقتين بالطرق المعتادة نظرا لوجود

معادلتين فقط وثلاثة مجاهيل ورغم ذلك يمكن تعيين الحل بطريقة مبسطة وذلك بكتابة

أدلة ميلر للمستوى الأول مرتين في صف واحد وأدلة ميلر للمستوى الثاني مرتين في

صف ثاني وبإجراء عملية الضرب تبعا للأسهم الموضحة في المعادلة التالية ويمكن

إيجاد  $[uvw]$ .

$$\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} h_1 | k_1 \\ h_2 | k_2 \end{array} \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{c} l_1 \\ l_2 \end{array} & \begin{array}{c} h_1 | k_1 \\ h_2 | k_2 \end{array} \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{c} l_1 \\ l_2 \end{array} & \begin{array}{c} h_1 | k_1 \\ h_2 | k_2 \end{array} \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{c} l_1 \\ l_2 \end{array} \\ \hline (k_1l_2 - k_2l_1) & (h_2l_1 - h_1l_2) & (h_1k_2 - h_2k_1) \\ u & v & w \end{array}$$

10-3

لاحظ أن قيمة أدلة الاتجاه لا تعتمد على أي من المستويين كتب أولا فإن ذلك لا

يغير سوى إشارة أدلة الاتجاه من  $[uvw]$  لتصبح  $[\bar{u}\bar{v}\bar{w}]$  وهي نفسها أدلة تحقق (تصف)

الاتجاه ذاته.

يمكن باستخدام قانون فايس أيضا إيجاد أدلة ميلر لمستوى بمعلومية اتجاهين



لمحوري نطاق يجمعهما ذلك المستوى، كما يتضح من المثال التالي.

### مثال 3-5

إذا كان لدينا اتجاهين لمحوري نطاقين لهما أدلة ميلر  $[u_1 v_1 w_1]$  و  $[u_2 v_2 w_2]$ ،  
أوجد أدلة ميلر للمستوى الذي يجمعهما  $(hkl)$ .

### الحل

نفرض أن أدلة ميلر للمستوى المذكور هي  $(hkl)$ .

طبقاً لقانون فايس يكون

$$hu_1 + kv_1 + lw_1 = 0$$

$$hu_2 + kv_2 + lw_2 = 0$$

وبحل المعادلتين نحصل على أدلة ميلر للمستوى المذكور كما يلي:

$$\frac{\begin{array}{c|c} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_2 \end{array} \begin{array}{c} \nearrow w_1 \\ \searrow w_2 \end{array}}{\begin{array}{c} (v_1 w_2 - v_2 w_1) \\ h \end{array}} \frac{\begin{array}{c|c} u_1 & w_1 \\ u_2 & w_2 \end{array} \begin{array}{c} \nearrow v_1 \\ \searrow v_2 \end{array}}{\begin{array}{c} (w_1 u_2 - w_2 u_1) \\ k \end{array}} \frac{\begin{array}{c|c} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{array} \begin{array}{c} \nearrow u_1 \\ \searrow u_2 \end{array}}{\begin{array}{c} (u_1 v_2 - u_2 v_1) \\ l \end{array}}$$

### مثال 3-6

أوجد أدلة ميلر للوجه المشترك مع النطاقين  $[134, 100]$  و  $[010, 323]$ .

### الحل

نعين اتجاه محور النطاق الأول كما يلي:

$$\begin{array}{c|ccc|c} 1 & 3 & 4 & 1 & 4 \\ & \nearrow & \searrow & \nearrow & \\ & 0 & 0 & 1 & \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}$$


---


$$[0\ 4\ \bar{3}]$$

وبالتالي تكون أدلة ميلر لاتجاه محور النطاق الأول هي  $[04\bar{3}]$ .

بالمثل، نعين اتجاه محور النطاق الثاني كما يأتي:

$$\begin{array}{c|ccc|c} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & \nearrow & \searrow & \nearrow & \\ & 2 & 3 & 3 & \\ 3 & 2 & 3 & 3 & 2 \end{array}$$


---


$$[3\ 0\ \bar{3}]$$

وبالتالي يكون اتجاه محور النطاق الثاني هو  $[30\bar{3}]$ . ثم نعين أدلة ميلر للوجه

المشترك مع النطاقين كما يلي:

$$\begin{array}{c|ccc|c} 0 & 4 & \bar{3} & 0 & \bar{3} \\ & \nearrow & \searrow & \nearrow & \\ & 0 & \bar{3} & 3 & \\ 3 & 0 & \bar{3} & 3 & \bar{3} \end{array}$$


---


$$[\bar{12}\ \bar{9}\ \bar{12}]$$

وعلى ذلك تكون أدلة ميلر للوجه المشترك مع النطاقين هي  $[\bar{12}\ \bar{9}\ \bar{12}]$  وهذه الأدلة

تكافئ  $[434]$ .

### مثال 3-7

إذا علمت أن أدلة الشكل السداسي هي  $(hkil)$ . أوجد أدلة الوجه المشترك بين

النطاقين  $[12\bar{33}, 20\bar{2}1]$  و  $[01\bar{1}0, 32\bar{5}3]$ .

بإهمال المعامل  $i$  (مؤقتاً) في السداسي يمكن إيجاد اتجاه محور النطاق الأول كما

يلى:

$$\begin{array}{c|ccc|c} 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ & \swarrow & \searrow & \swarrow & \searrow & \swarrow & \searrow \\ 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \end{array} \quad \begin{array}{l} 3 \\ 1 \end{array}$$

$$[2\ 5\ \bar{4}]$$

وبالتالي تكون أدلة اتجاه محور النطاق الأول هي  $[25\bar{4}]$ .

وبنفس الطريقة يمكن إيجاد اتجاه محور النطاق الثاني كما يلي:

$$\begin{array}{c|ccc|c} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & \swarrow & \searrow & \swarrow & \searrow & \swarrow & \searrow \\ 3 & 2 & 3 & 3 & 2 & 3 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{l} 0 \\ 3 \end{array}$$

$$[3\ 0\ \bar{3}]$$

وبالتالي تكون أدلة اتجاه محور النطاق الثاني هي  $[30\bar{3}]$ .

ثم نعين الأدلة  $hkl$  للوجه المشترك بين الاتجاهين كالآتي:

$$\begin{array}{c|ccc|c} 2 & 5 & \bar{4} & 2 & 5 & \bar{4} \\ & \swarrow & \searrow & \swarrow & \searrow & \swarrow & \searrow \\ 3 & 0 & \bar{3} & 3 & 0 & \bar{3} \end{array} \quad \begin{array}{l} \bar{4} \\ \bar{3} \end{array}$$

$$[\bar{15}\ \bar{6}\ \bar{15}]$$

فتكون الأدلة  $hkl$  للوجه المشترك في حالة السداسي هي  $\bar{15}\bar{6}\bar{15}$  التي هي  $\bar{5}25$  أو

ولإيجاد المعامل  $i$ ، الذي أجبناه في بداية الحل، نعلم انه في حالة السداسي يكون

$h + k + i = 0$  وبالتالي فإن  $i = -(h + k) = -(5 + 2)$  ويكون  $i = -7$ . وعلى ذلك تكون أدلة ميلر

للوجه المشترك بين النطاقيين المذكورين في هذا المثال هي  $(5\bar{2}7)$ .

### 5-3 الزوايا بين النطاقات ANGLES BETWEEN ZONES

يمكن إيجاد الزاوية  $\theta$  بين الاتجاهين  $[u_1v_1w_1]$ ،  $[u_2v_2w_2]$  بواسطة العلاقة

الآتية،

$$\cos\theta = \frac{u_1u_2 + v_1v_2 + w_1w_2}{\sqrt{u_1^2 + v_1^2 + w_1^2}\sqrt{u_2^2 + v_2^2 + w_2^2}} \quad 11-3$$

وحيث أن أدلة الاتجاه للعمودي على المستوى الذي له الأدلة العددية  $(hkl)$  تكون

$[hkl]$ ، فإنه يمكن إيجاد الزاوية بين المستويين  $(u_1v_1w_1)$  و  $(u_2v_2w_2)$  بالعلاقة السابقة.

### مثال 8-3

في وحدة خلية المكعبى البسيط SC، أوجد الزاوية بين العمودين على الوجهين

الذين لهما أدلة ميلر للوجهين هي  $(100)$  و  $(010)$ .

**الحل**

باستخدام المعادلة 11-3 نحصل على

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \frac{1 \times 0 + 0 \times 1 + 0 \times 0}{(1^2 + 0^2 + 0^2)^{\frac{1}{2}}(0^2 + 1^2 + 0^2)^{\frac{1}{2}}} = 0 \\ \therefore \theta &= \cos^{-1}0 = 90^\circ \end{aligned}$$

### 3-6 التركيب الذري للبلورات ATOMIC STRUCTURE OF CRYSTALS

تتأثر الخصائص الفيزيائية للمواد البلورية بالشكل الهندسي للبلورة وكما تتأثر أيضا بالتركيب الذري لها. يقصد بالتركيب الذري للبلورة شكل ترتيب الذرات فيها بالإضافة إلى عدد الذرات في وحدة الخلية والتي تؤثر بشكل كبير في حجم وكثافة الخلية وبالتالي معظم الخصائص البلورية.

#### 3-6-1 عدد الذرات في وحدة الخلية

لتعيين عدد الذرات في وحدة الخلية يجب معرفة الشكل الهندسي للخلية ونصف القطر الذري لها. يعرف نصف القطر الذري على أنه نصف المسافة بين أقرب ذرتين متجاورتين في بلورة عنصر نقي مع مراعاة أن أقرب ذرتين متجاورتين يجب أن تلامس كل منهما الأخرى، كما سنبين لاحقا.

تأتي أهمية دراسة شبكات المكعبى بوجه عام والمتمركز الجسم والأوجه بوجه خاص لأن أغلب عناصر الجدول الدوري تتبلور مكونة شبكية بلورية مكعبة، ولهذا سنولى هذه الفصيلة مزيدا من الاهتمام في هذا الفصل.

#### أ- المكعبى البسيط SIMPLE CUBIC, SC

في حالة المكعبى البسيط، SC، توجد ذرة عند كل ركن من أركان الخلية الثمانية وتشارك هذه الذرة ثمانية خلايا مجاورة. يكون نصيب كل خلية من هذه الذرة هو  $\frac{1}{8}$  ذرة.

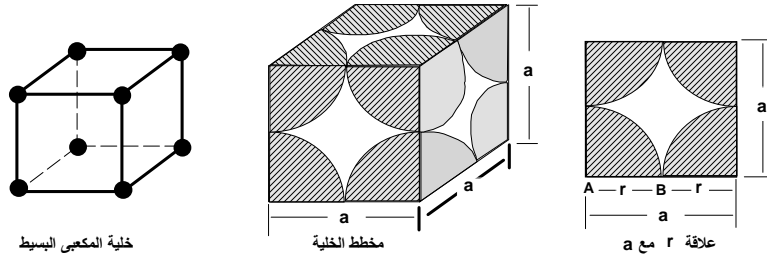
---

وحيث أن لكل خلية 8 أركان فإن عدد الذرات في وحدة الخلية في هذه الحالة هو  $1 = 8 \times \frac{1}{8}$

أي ذرة واحدة. ويمكن حساب نصف قطر الذرة في المكعبى البسيط، بالرجوع إلى الشكل

8-3 كالآتي. طبقا للتعريف، تكون المسافة AB هي نصف القطر الذرى، ومن الشكل

يتضح أن  $r = \frac{a}{2}$ ، حيث a هو طول ضلع الخلية المكعبة.



الشكل 8-3 شكل الذرات في خلية المكعبى البسيط

### BODY CANTERED CUBIC, BCC

### ب- المكعبى المتمركز الجسم

في هذه الحالة، بالإضافة إلى الثماني ذرات الموجودة عند الأركان توجد ذرة

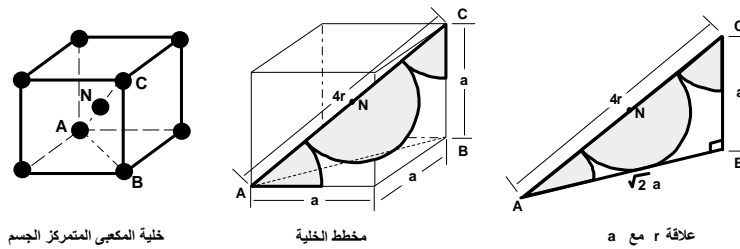
كاملة عند مركز الخلية وعلى ذلك يكون عدد الذرات في وحدة الخلية هو  $2 = 1 + 8 \times \frac{1}{8}$ ،

أي ذرتين فقط. ولحساب نصف القطر الذرى في هذه الحالة نشير إلى الشكل 9-3.

يتضح من الشكل أن الذرتين C و N هما أقرب الجيران كل منهما للأخر. ومن هندسة

الشكل نجد أن  $r = \frac{CN}{2}$  وحيث أن

$$AC = \sqrt{AB^2 + BC^2} = \sqrt{(\sqrt{2}a)^2 + a^2} = \sqrt{3}a$$



الشكل 9-3 شكل الذرات في خلية المكعبى المتمركز الجسم

ويكون نصف القطر الذري هو

$$r = \frac{CN}{2} = \frac{AC}{4} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$$

$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$$

أو

### ج- المكعبى المتمركز الأوجه FACE CENTERED CUBIC, FCC

في المكعبى المتمركز الأوجه توجد ذرة واحدة في مركز كل وجه وتكون هذه الذرة مشاركة بين خليتين متجاورتين، هذا بالإضافة إلى الثماني ذرات الموجودة عند الأركان. مما سبق يتضح أن عدد الذرات في وحدة الخلية في هذه الحالة هو  $4 = 8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2}$  أي أربع ذرات.

من الشكل 10-3 يمكن تعيين العلاقة بين نصف القطر الذري و أبعاد الخلية كما

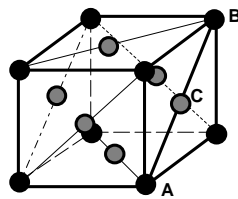
يلى: يتضح أن الذرتين A و C هما أقرب الجيران كل منهما للأخر وبالتالي يكون نصف

القطر الذري هو

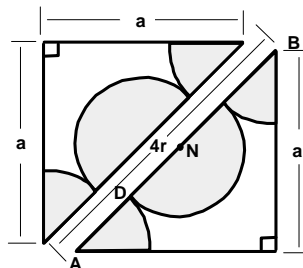
$$r = AD = \frac{AC}{2} = \frac{AB}{4}$$

$$\therefore AB = \sqrt{2} a$$

$$\therefore r = \frac{\sqrt{2}}{4} a \quad \& \quad a = \frac{4r}{\sqrt{2}}$$



خلية المكعبى المتمركز الوجه



علاقة r مع a

الشكل 10-3 شكل الذرات في المكعبى المتمركز الأوجه

من الشكل 3-10 يتضح أنّ القطر AB يساوي أربعة أمثال نصف القطر الذرى.

من الدراسة السابقة (في الباب السابق)، نلاحظ أن الخلايا الأولية لشبكات

المكعبى المتمركزة الأوجه والمتمركزة الجسم ليس لها تماثل (تتاظر) المكعب أو أن

تماثلها أقلّ من تماثل المكعب. وطالما أن تماثل المكعب هو نفس تماثل الشبكة المكعبة

سواء كانت متمركزة الأوجه أو الجسم فإنه عادة يتم التعامل مع خلايا الوحدة غير الأولية

لأنها مكعبة الشكل. في الجدول 3-1 نوجز بعض الخصائص المهمة للشبكية المكعبة.

الجدول 3-1 بعض خصائص الشبكة المكعبة

الخصائص	المكعبى البسيط	المكعبى المتمركز الجسم	المكعبى المتمركز الأوجه
حجم خلية الوحدة	$a^3$	$a^3$	$a^3$
حجم الخلية الأولية	$a^3$	$\frac{a^3}{2}$	$\frac{a^3}{4}$
عدد العقد لكل وحدة خلية	1	2	4
عدد العقد لوحدة الحجم	$\frac{1}{a^3}$	$\frac{2}{a^3}$	$\frac{4}{a^3}$
العدد التناسقى	6	8	12
عدد العقد المجاورة للجوار المباشر	12	6	6
المسافة بين أقرب عقدتين	A	$\frac{\sqrt{3} a}{2} = 0.86 a$	$\frac{a}{\sqrt{2}} = 0.7 a$

### مثال 3-9

إذا كان الوزن الجزئ للحديد هو ( $W = 55.85$ ) وكثافته هي 7.86 جم/سم<sup>3</sup> أوجد

طول ضلع الخلية إذا كان الحديد يتواجد في صورة مكعبى متمركز الجسم. (عدد

أفوجادرو  $N = 6.02 \times 10^{23}$  /gm/mole).



## الحل

يكون عدد ذرات الحديد لوحة الخلية هو  $n = 8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$  ومن العلاقة

حيث  $\rho$  هو الكثافة و  $W$  هو الوزن الجزيء و  $n$  هو عدد الذرات لوحة الخلية  $a^3 \rho = \frac{WA}{N}$

و  $a$  هو طول ضلع الخلية نحصل على،

$$a^3 \times 7.86 = \frac{2 \times 55.85 W}{6.02 \times 10^{23}}$$

$$a = 2.87 \times 10^{-8} \text{ cm} = 2.87 \text{ \AA}$$

## مثال 3-10

أحسب طول ضلع خلية الوحدة لكل من :

(أ) شبكة الفضة المتمركز الأوجه إذا كان نصف قطر ذرة الفضة هو 1.441 أنجستروم.

(ب) شبكة النحاس المتمركز الأوجه إذا كان نصف قطر ذرة النحاس هو 1.276

أنجستروم.

## الحل

(أ) في حالة الفضة يكون

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}} = \frac{4 \times 1.441}{\sqrt{2}} = 3.078 \text{ \AA}$$

(ب) في حالة النحاس يكون

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}} = \frac{4 \times 1.276}{\sqrt{2}} = 3.08 \text{ \AA}$$

### 3-6-2 الكثافة الذرية لمستويات البلورة ATOMIC DENSITY OF CRYSTAL PLANES

لدراسة الخصائص الميكانيكية (وخاصة السلوك اللدن) لبلورات المعادن، يجب معرفة كثافة الذرات الواقعة على المستويات البلورية المختلفة وذلك لتحديد إمكانية انزلاق المستويات على بعضها بعض من عدمه. تعرف الكثافة الذرية للمستوى البلوري بأنها عدد الذرات لوحدة المساحات في مستوى بلوري معين. يمكن توضيح كيفية حساب الكثافة الذرية للمستوى بواسطة الأمثلة الآتية:

#### مثال 3-11

في بلورة الرصاص، أحسب الكثافة الذرية للمستويات: أ- (100) ، ب- (111) و ج- (110)، إذا علمت أن الرصاص يتبلور على شكل مكعبي متمركز الأوجه وله  $a = 4.93 \text{ \AA}$ .

#### الحل

(أ) في المستوى (100) يكون توزيع الذرات كما هو مبين بالشكل 3-11 (أ). يحتوى هذا المستوى على ذرتين اثنتين  $\left(2 = 1 + 4 \times \frac{1}{4}\right)$  وبالتالي تكون الكثافة الذرية لهذا المستوى ،  $\rho_{(100)}$ ، بأنها تساوى عدد الذرات مقسوم على المساحة، أي

$$\rho_{(100)} = \frac{2 \text{ atoms}}{(a \text{ mm})^2} = \frac{2 \text{ atoms}}{(4.93 \times 10^{-7})^2 \text{ mm}^2} = 8.23 \times 10^{12} \text{ atoms/mm}^2$$

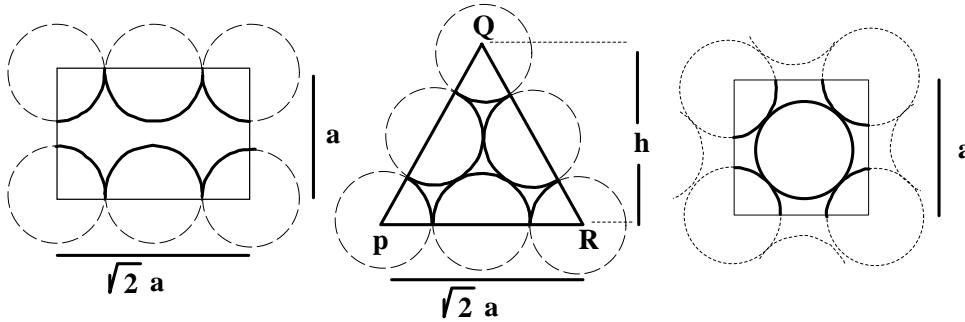
(ب) في المستوى (111) يكون توزيع الذرات كما هو مبين بالشكل 3-11 (ب). يحتوى هذا

المستوى على ذرتين اثنتين  $\left(2 = 3 \times \frac{1}{6} + 3 \times \frac{1}{2}\right)$  لكل مثلث PRQ، ارتفاعه  $h = \sqrt{2} a \cos 30^\circ$

وطول قاعدته تساوى  $\sqrt{2} a$  وبالتالي تكون مساحته تساوى  $\frac{1}{2} \times \sqrt{2} a \times \sqrt{2} a \times \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2$

و تكون الكثافة الذرية لهذا المستوى تساوى

$$\rho_{(111)} = \frac{4 \text{ atoms}}{\sqrt{3} a^2} = \frac{4 \text{ atoms}}{\sqrt{3} (4.93 \times 10^{-7})^2 \text{ mm}^2} = 9.5 \times 10^{12} \text{ atoms/mm}^2$$



ج- المستوى (110)

ب- المستوى (111)

أ- المستوى (100)

الشكل 3-11 توزيع الذرات في المستويات المطلوبة.

(ج) فى المستوى (110) يكون توزيع الذرات كما هو مبين بالشكل 3-11 (ج). يحتوى هذا

المستوى على ذرتين اثنتين  $\left(2 = 4 \times \frac{1}{4} + 2 \times \frac{1}{2}\right)$  لكل وجه من أوجه خلية الوحدة وبالتالي

تكون الكثافة الذرية لهذا المستوى هي

$$\rho_{(110)} = \frac{2 \text{ atoms}}{\sqrt{2} a^2 \text{ mm}^2} = \frac{2 \text{ atoms}}{\sqrt{2} (4.93 \times 10^{-7})^2 \text{ mm}^2} .$$

$$= 5.82 \times 10^{12} \text{ atoms/mm}^2$$

### 3-6-3 عدد التناسق للذرة ATOMIC COORDINATION NUMBER

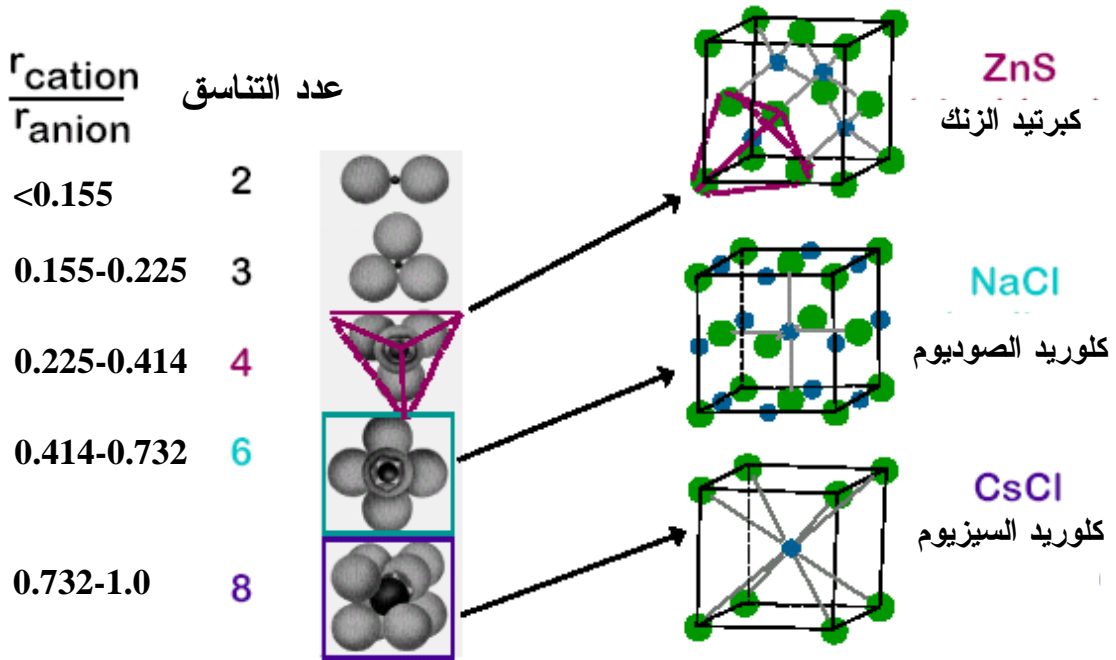
يمثل عدد التناسق لعقدة فى الشبكة (الذرة) مدى قدرة تراص الذرات فى الشبكة

البلورية ويعرف بأنه عدد أقرب العقد فى الشبكة بالنسبة لعقدة معينة، أي أنه عدد أقرب

العقد المجاورة لتلك العقدة. وحيث أن العقد فى الشبكة البرافية متماثلة من ناحية التوزيع

الفضائي مع ما يحيط بكل عقدة من بقية العقد فإن عدد التناسق يكون هو نفسه لكل عقد شبكة معينة أو يكون خاصية من خصائص تلك الشبكة. في المكعبى البسيط نجد أن عدد التناسق هو ستة، كما يتبين في الشكل 3-12. كذلك، يكون عدد التناسق في المكعبى المتمركز الجسم هو 8 ، بينما يكون 12 في المكعبى المتمركز الأوجه.

نعلم أن المركبات الأيونية تتركب من ايونات مختلفة حيث يرتبط كل كاتيون مع أنيون وهكذا. يتكرر هذا الشكل من الارتباط وتتكون بلورات هذه المواد. لذلك فإن للمركبات الأيونية عدنان للتناسق، يكون العدد الأول عدد التناسق للكاتيونات ويكون الثاني عدد التناسق للأنيونات. وبشكل عام، يزداد عدد التناسق في المركبات الأيونية مع زيادة النسبة بين نصف قطر الكاتيون ونصف قطر الأنيون  $(\frac{r_{cation}}{r_{anion}})$ ، بمعنى كم من الأنيونات يمكنك ترتيبها حول الكاتيون. يبين الشكل 3-12 المفهوم السابق وبعض أمثلة التركيب.



الشكل 3-12 بعض الأمثلة على العدد التناسق

### مثال 3-12

بناء على نصف القطر الأيوني المسجل في الجدول التالي، ما التركيب البلوري

الذي تتوقعه لأكسيد الحديد، FeO؟

نصف القطر الأيوني للأنيونات $a_{\text{anion}}(\text{nm})$		نصف القطر الأيوني للكاتيونات $r_{\text{cation}}(\text{nm})$	
0.140	$\text{O}^{2-}$	0.053	$\text{Al}^{3+}$
0.181	$\text{Cl}^-$	0.077	$\text{Fe}^{2+}$
0.133	$\text{F}^-$	0.069	$\text{Fe}^{3+}$
--	---	0.100	$\text{Ca}^{2+}$

الحل

بالتعويض عن أنصاف الأقطار وتعيين النسبة نجد

$$\frac{r_{\text{cation}}}{r_{\text{anion}}} = \frac{r_{\text{Fe}}}{r_{\text{O}}} = \frac{0.077}{0.140} = 0.55$$

بناء على النسب المعطاة في الشكل 3-12 يكون العدد التناسقي = 6 ويكون

التركيب البلوري مماثل لتركيب بلورة كلوريد الصوديوم، أي مكعبى متمركز الوجه.

### مثال 3-13

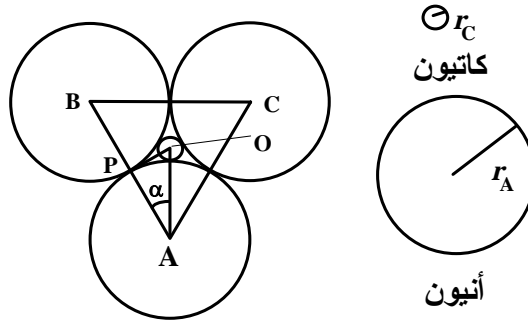
اثبت أن أقل نسبة بين نصف قطر الكاتيون ونصف قطر الأنيون للعدد التناسقي

3 هي 0.155.

الحل

بفرض أن نصف قطر الكاتيون هو  $r_c$  و نصف قطر الأنيون هو  $r_a$  كما يبين

## الشكل 3-13



الشكل 3-13

$$\therefore \overline{AP} = r_A \text{ \& } \overline{AO} = r_A + r_C$$

$$\therefore \frac{\overline{AP}}{\overline{AO}} = \frac{r_A}{r_A + r_C} = \cos \alpha = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\therefore \frac{r_C}{r_A} = \frac{1 - \frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = 0.155$$

## 7-3 العبوة المتراسة المكعبة والسداسية CUBIC AND HEXAGONAL CLOSE-PACKED

لدراسة التركيب البلوري للمواد يتم استبدال الذرات أو المجموعات الذرية بنقط

فراغية أو عقد ليتكون هيكل نظري يعتبر بمثابة الشبكة البرافية. الفرق بين هذه الشبكة

النظرية والتركيب البلوري الحقيقي هو أن الذرات لا تمثل نقط منفصلة ولكنها تكون

مرتبة بالشكل الذي يملأ فراغ البلورة كما إنها تكون قريبة بعضها من بعض بحيث تبدو

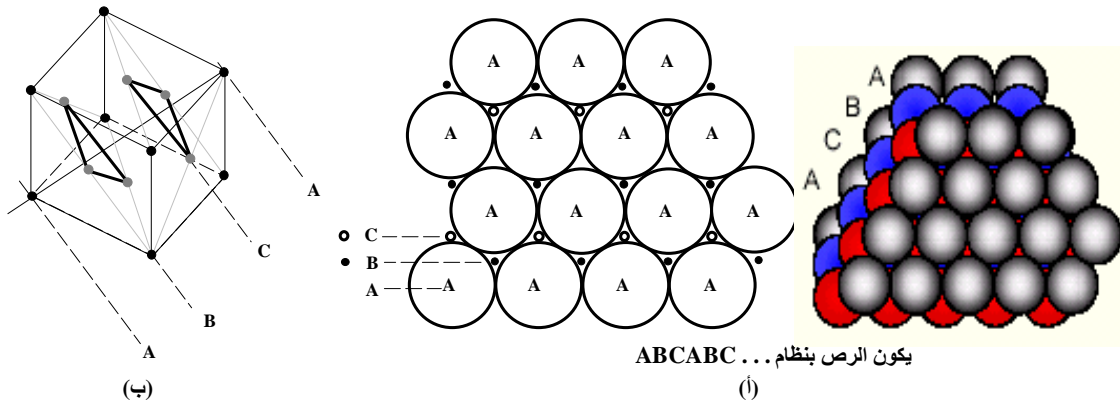
كأنها متلامسة. سندرس الآن نمودجا نظريا للتركيب البلوري وسنفترض أن الذرات

كرات مصمتة غير قابلة للانضغاط.

عند تعبئة كرات متشابهة (لها نصف القطر  $r$ ) في وعاء كبير، فإن مراكز هذه

الكرات تكون بمثابة نقط فراغية وتكون شبكية، ولكي يكون الرص جيدا يجب أن يكون الفراغ المتروك (الحجم الخالي) بين الكرات أقل ما يمكن، نرتب في البداية مجموعة من الكرات لتكون طبقة متراسة نسميها الطبقة A، كما بالشكل 3-14(أ)، بحيث تتماس كل كرة مع ستة كرات مجاورة. نقوم بتعبئة طبقة ثانية من الكرات (B) فوق الطبقة الأولى. لاحظ أن كل كرة من الطبقة B ستقع في الفجوات بين الكرات A وتتماس مع ثلاث كرات من الطبقة A. عند وضع الطبقة الثالثة على الطبقة الثانية هناك احتمالين لترتيب الطبقة

الثالثة:



الشكل 3-14

الأول : أن تشغل كرات الطبقة C (التي تقع فوق كرات الطبقة B) موقعا يقع مباشرة فوق الفجوات (بين كرات الطبقة A). تقع كرات الطبقة الرابعة تماما فوق كرات الطبقة A، وهكذا نحصل على توزيع للكرات على الصورة (ABCABC...) الذي يكون وحدة خلية مكعبة متمركزة الأوجه. تشغل طبقات الكرات المستويات العمودية على القطر الجسمي للمكعب (الاتجاه (111))، كما هو مبين بالشكل 3-14(ب). تسمى هذه الخلية المكعبة بالعبوة المكعبة المتلاصقة الرص.

تعرف كثافة الرص (Packing Density, PD) بأنها النسبة بين الحجم المشغول

بالذرات إلى حجم الخلية. في المكعبى المتمركز الأوجه تحتوى الخلية على أربع ذرات

( $4 = 8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2}$ ) ويكون نصف القطر الذرى هو  $\frac{\sqrt{2}}{4} a$ ، وحيث أن حجم الذرة هو

$\frac{4}{3}\pi r^3$  فإن الحجم الفعلي للذرات الأربعة يكون  $4 \times \frac{4}{3}\pi (\frac{\sqrt{2}}{4} a)^3 = 0.74 a^3$  بناء على ما

سبق، نجد أن كثافة الرص في المكعبى المتمركز الأوجه هي،

$$PD = \frac{0.74 a^3}{a^3} = 0.74 \quad \text{or} \quad 74\%$$

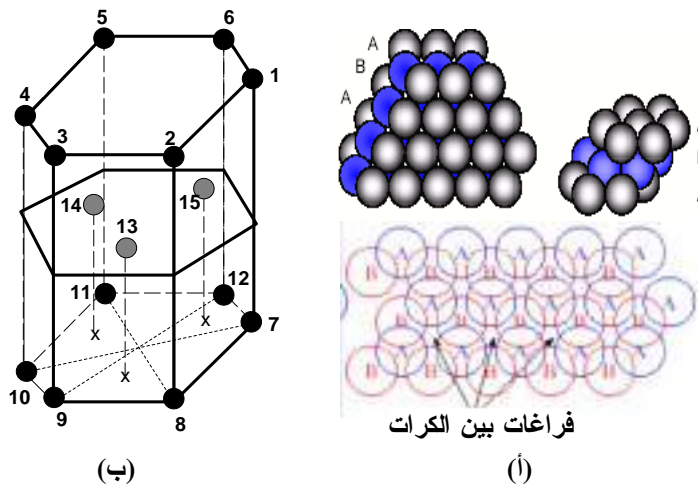
الثاني: أن تشغل كرات الطبقة الثالثة (C) مكانا يقع تماما فوق كرات الطبقة A،

ولذلك تسمى الطبقة الثالثة A أيضا. نلاحظ في هذه الحالة وجود فراغات بين الكرات،

كما يتبين من الشكل 3-15 (أ). بهذا الأسلوب نحصل على توزيع للكرات على الصورة

(ABABAB...) وهذا النوع من الرص يكون وحدة خلية سداسية الشكل، كما هو مبين

بالشكل 3-15(ب).



الشكل 3-15

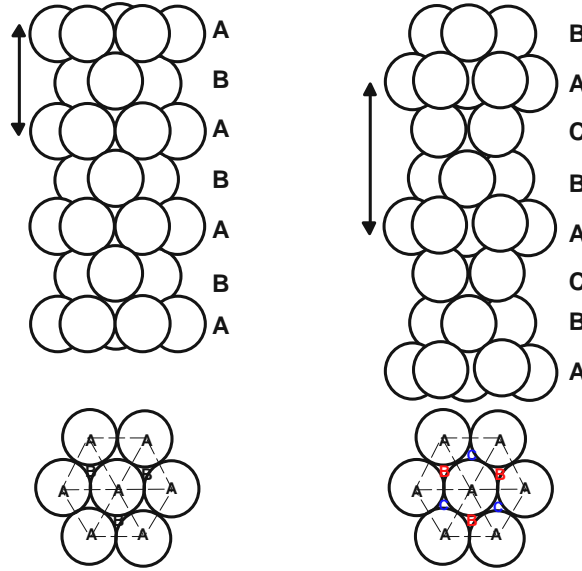
تسمى هذه الخلية المتكونة بهذه الصورة بالعبوة السداسية المتلاصقة الرص.



تحتوى هذه العبوة على أربع ذرات  $(4 = 12 \times \frac{1}{12} + 3 \times 1)$  وتكون كثافة الرص لهذه الخلية

هي نفسها كما في الحالة الأولى وتساوى 74 % تقريبا. يبين الشكل 3-16 مقارنة بين

تركيب المكعب المتراصق الرص والسداسي المتراصق الرص.



الشكل 3-16 مقارنة بين تركيب المكعب المتراصق الرص والسداسي المتراصق الرص.

ولاستنتاج الخلية الأولية في السداسي نتبع الأسلوب التالي: من نموذج رص

الكرات نجد العلاقة بين ارتفاع الخلية السداسية،  $c$ ، (المسافة بين أقرب طبقتين متشابهتين)

وطول ضلع القاعدة،  $a$ ، تكون على النحو،

$$c = \left(\frac{8}{3}\right)^{\frac{1}{2}} a = 1.633a \quad 12-3$$

نلاحظ أن الخلية السداسية تمثل ثلاث خلايا وحدة غير أولية كل منهم عبارة عن

الجزء المظلل بالشكل 3-17 (أ). تكون خلية الوحدة التي تم اختيارها متشابهة مع الشبكة

السداسية، من ناحية التناظر. بالرجوع إلى الشكل، نجد أن شبكة التركيب السداسية لا

تمثل شبكة برافية لسببين: أولهما، لأنها تختلف عن بعضها من ناحية التوزيع الفضائي

لما يحيط بكل عقدة من بقية العقد. والسبب الثاني، لأنه لا يمكن ضبط المتجه الانتقالي الأصلي (الذي يمثل شبكة السداسي) بالشكل  $\vec{R} = n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c}$  الذي يمكنه أن يعين كل عقد الشبكة. ولكن يمكن أن نعبر عن شبكة السداسي كشبكة برافية باختيار قاعدة (أساس) جديدة بحيث تتكون كل قاعدة من عقدتين. لتحقيق ذلك، نأخذ المتجهات  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$  و  $\vec{c}$  كمتجهات أساسية بحيث تكون الزاوية بين  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$  تساوى  $120^\circ$  وأطوالها هي  $a$  و  $b$  و  $c$  على وجه الترتيب، بحيث  $a = b \neq c$  والمتجه  $\vec{c}$  عمودي على المتجهين الآخرين، كما هو موضح بالشكل 17-3 (ب). وبناء على الافتراض السابق فإن القاعدة تتكون من العقدتين (000) و  $(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ . نجد الشبكة المتكونة بواسطة هذه القواعد العقدية تكون شبكة سداسي برافية وهي عبارة عن شبكة خليتها الأولية سداسي بسيط، كما هو موضح بالشكل 17-3 (ب).

يمكن تحليل المتجهات الأساسية  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$  و  $\vec{c}$  بدلالة الإحداثيات الكارتيزية الموضحة بالشكل 17-3 (أ). ويمكن الحصول على متجهات الأساس الجديدة التي تصف الخلية الأولية كالاتي،

$$\vec{a}_1 = a\vec{i}, \quad \vec{a}_2 = \frac{\sqrt{3}a}{2}\vec{j} - \frac{a}{2}\vec{i}, \quad \vec{a}_3 = c\vec{k} \quad 13-3$$

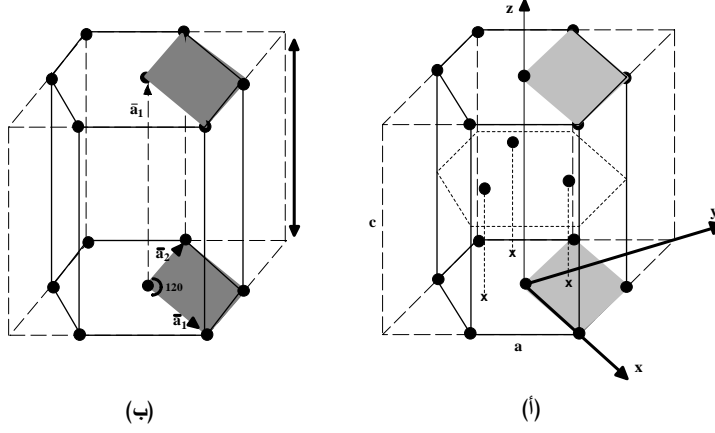
ومن المعادلة 13-3 فإن حجم الخلية الأولية يساوي

$$v = |\vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \wedge \vec{a}_3)| = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c = \sqrt{2} a^3 \quad 14-3$$

أن الأسلوبين الذين أتبعنا في الرص في هذه الدراسة ليس الأسلوبين الوحيدين للتعبة، بل توجد أساليب أخرى ينتج عن احدهم شبكة مكعبة بسيطة ذات كثافة تعبئة

كثافة الرص) تساوى 0.52 أو شبكة مكعبة متمركزة الجسم ذات كثافة تعبئة 0.68 وهذا

يفسر كثافة الرص للمكعب المتمركز الأوجه الكبيرة (0.74).



الشكل 3-16

### مثال 3-14

أحسب كثافة الرص في حالة المكعبى البسيط.

**الحل**

بما أن عدد الذرات لوحدة الخلية في المكعبى البسيط يساوى ذرة واحدة وحجم

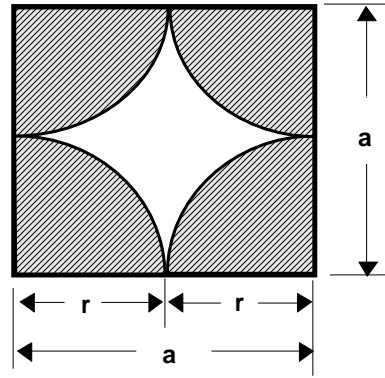
الذرة هو  $\frac{4}{3}\pi r^3$ ، حيث  $r$  هو نصف القطر الذرى ويساوى  $\frac{a}{2}$ ، كما هو مبين بالشكل 3-

18. فإن حجم الذرة يكون،

$$v = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{a}{2}\right)^3 = \frac{\pi a^3}{6}$$

وحيث أن حجم وحدة الخلية المكعبة هو  $V = a^3$  فإن كثافة الرص، PD، تكون

$$PD = \frac{v}{V} = \frac{\pi a^3}{6a^3} = \frac{\pi}{6} = 0.52 = 52\%$$



الشكل 3-18

### 8-3 خصائص التركيب المكعبى المتمركز الأوجه والمتمركز الجسم

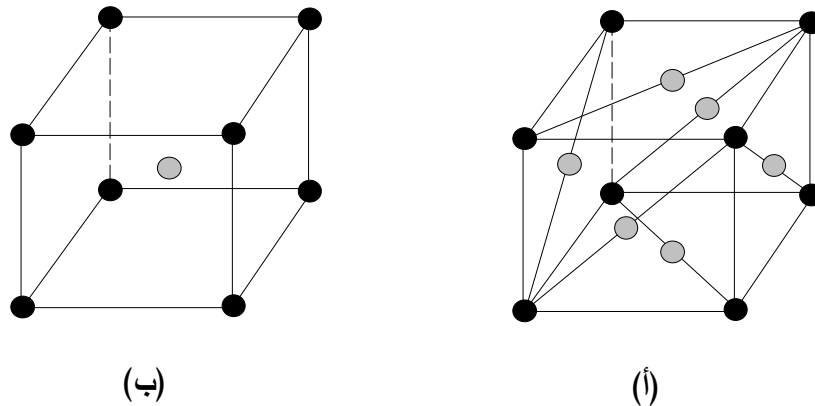
#### CHARACTERISTIC OF FCC AND BCC STRUCTURE

تتبلور معظم العناصر الكيميائية على هيئة شبكات غير معقدة فيوجد حوالي 20

عنصرا على شكل المكعبى المتمركز الأوجه (fcc). تحتوى وحدة الخلية في المكعبى

المتمركز الأوجه على 4 ذرات: ذرة واحدة مشاركة في الرؤوس الستة و 3 ذرات مشاركة

في الأوجه الستة، كما هو مبين بالشكل 3-19 (أ).



الشكل 3-19 شكل البناء :- (أ) FCC، (ب) BCC.

كما يتبلور حوالي 14 عنصر على شكل شبكية مكعبى متمركز الجسم (bcc).

تحتوى وحدة الخلية على ذرتين اثنتين: ذرة تشارك الرؤوس الستة وذرة في مركز

المكعب، كما هو مبين في الشكل 3-19 (ب). الجدول 3-2 يبين طول ضلع الخلية

المكعبة لبعض هذه العناصر.

الجدول 2-3 طول ضلع الخلية المكعبة (بالانجستروم) لبعض العناصر

عناصر تتبلور على شكل BCC				عناصر تتبلور على شكل FCC			
a	العنصر	a	العنصر	a	العنصر	a	العنصر
3.31	Ta	2.88	Cr	5.30	Ag	5.26	Ar
3.02	V	3.15	Mo	3.52	Ni	4.05	Al
3.16	W	2.87	Fe	4.95	Pb	5.58	Ca
5.02	Ba	3.30	Nb	3.92	Pt	3.61	Cu

### 9-3 التركيب البلوري لبعض البلورات البسيطة

#### STRUCTURE OF SOME SIMPLE CRYSTALS

يتبلور حوالي 28 من العناصر على شكل بناء العبوة السداسية المتراسة، hcp.

يبين الجدول 3-3 خصائص بعض هذه العناصر.

الجدول 3-3 أبعاد الخلية (بالانجستروم) ذات البناء hcp لبعض العناصر.

c	a	العنصر	c	a	العنصر
6.07	3.75	La	3.58	2.29	Be
5.21	3.21	Mg	5.62	2.98	Cd
5.27	3.31	Sc	4.07	2.51	a-Co
5.69	3.60	Tb	5.59	3.56	Er
5.73	3.65	Y	5.78	3.64	Gd
4.95	2.66	Zn	5.83	3.57	He
5.15	2.23	Zr	5.62	3.58	Mo

### (أ) تركيب بلورة كلوريد الصوديوم NaCl

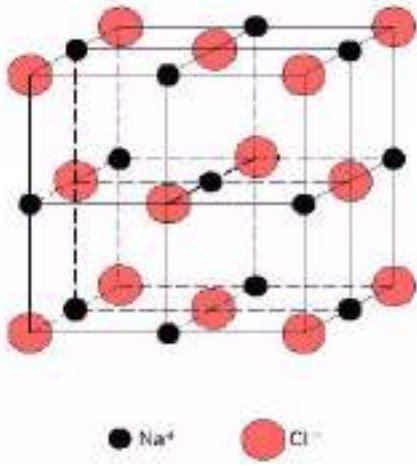
يتبلور كلوريد الصوديوم (ملح الطعام) على شكل شبكة مكعبية وفيها تتبادل

أيونات الصوديوم والكلور الأماكن على امتداد الاتجاهات الأساسية، كما هو مبين بالشكل

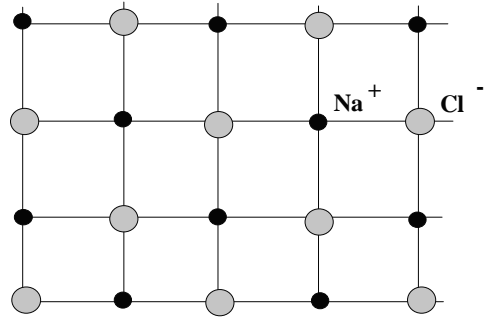
20-3(أ). يبين الشكل 20-3(ب) خلية الوحدة في الأبعاد الثلاثة. نلاحظ أن الخلية تكون

من النوع المتمركز الأوجه وتكون مواضع أيونات الصوديوم الأربعة هي 000 و  $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$

و  $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$  و  $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ ، بينما تتواجد أيونات الكلور الأربعة في المواضع  $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$  و  $00\frac{1}{2}$  و  $\frac{1}{2}00$  و  $0\frac{1}{2}0$  (تشير الأعداد إلى الإحداثيات بدلالة كسور ضلع المكعب).



ب- بلورتين متمركزتين الأوجه متداخلتين



أ- البلورة مرسومة في بعدين

الشكل 3-20 تركيب بلورة كلوريد الصوديوم.

يمكن القول بأن بلورة كلوريد الصوديوم هي شبكة غير برافية تتكون من

شبيكتين جزئيتين متداخلتين من النوع fcc. تتكون الشبكة الأولى من أيونات الصوديوم

وتتكون الشبكة الأخرى من أيونات الكلور وتزاح احد الشبيكات عن الأخرى بمقدار  $\frac{a}{2}$ .

ينطبق نفس التركيب السابق على العديد من البلورات الأيونية. يبين الجدول 3-4 أبعاد

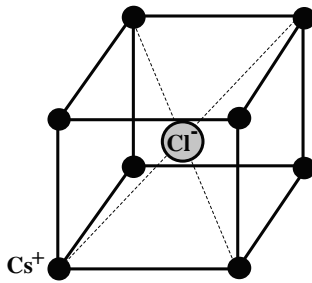
بلورات بعض المركبات التي تتبلور على صورة كلوريد الصوديوم.

الجدول 3-4 أبعاد بلورات بعض المركبات التي تتبلور على صورة كلوريد الصوديوم (بالانجستروم).

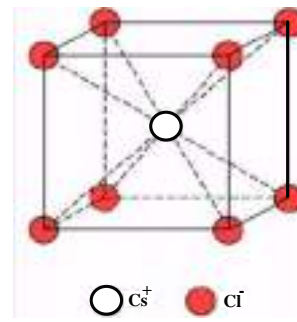
المركب	a	المركب	a
AgCl	5.55	LiF	4.02
MgS	5.20	NaCl	5.64
CaSe	5.91	KF	6.35
BaS	6.39	RbF	5.64
MgO	4.21	NaF	4.62

### (ب) تركيب بلورة كلوريد السيزيوم CsCl

يتبلور كلوريد السيزيوم على شكل مكعبي وفيها تتبادل أيونات الكلور مواضعها على خطوط مستقيمة على امتداد أقطار المكعب الأربعة، كما هو مبين بالشكل 3-21(أ). هكذا تكون وحدة الخلية على هيئة مكعبي متمركز الجسم، كما هو مبين بالشكل 3-21(ب).



ب- خلية الوحدة



أ- بلورة كلوريد السيزيوم

الشكل 3-21 بلورة كلوريد السيزيوم.

توجد في كل وحدة خلية أيون سيزيوم واحدة موضوعة عند النقطة 000 وايون

كلور عند  $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$ . ولهذا فإن بلورة كلوريد السيزيوم هي بلورة غير برفافية تتكون من

بلورتين مكعب بسيط تبعد كل منهما عن الأخرى بمسافة تساوى نصف قطر المكعب.

يبين الجدول 3-5 أبعاد بلورة بعض المركبات التي تتبلور على صورة كلوريد السيزيوم.

الجدول 3-5 أبعاد بلورات بعض المركبات التي تتبلور على صورة كلوريد السيزيوم (بالانجستروم).

a	المركب	a	المركب
3.83	TlCl	4.12	CsCl
3.97	TlBr	4.29	CsBr
4.20	TlI	4.57	CsI

### (ج) تركيب بلورة الماس DIAMOND CRYSTAL STRUCTURE

الماس هو كربون متبلور بسبب الضغط ودرجة الحرارة المرتفعين لفترات زمنية

كبيرة. تكون شبكة الماس على هيئة معكبي وهي شبكة ليست برافية، كما يبين الشكل

3-22(أ). تحتوى الخلية الأولية على 8 ذرات، كما هو مبين في الشكل 3-22 (ب)،

وفيهما يتكون الأساس من ذرتين من الكربون مصاحبتين لكل عقدة (نقطة) عند الإحداثيات

: 000 و  $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ . ويمكن تصور شبكة الماس المكعبة على أنها تتكون من شبكيتين (fcc)

متماثلتين ومتداخلتين. تتكون الشبكة الأولى من الذرات المظلمة في الشكل (ب) وتتكون

الشبكة الثانية من الذرات غير المظلمة. تكون هاتين الشبكيتين مزاحتان عن بعضهما

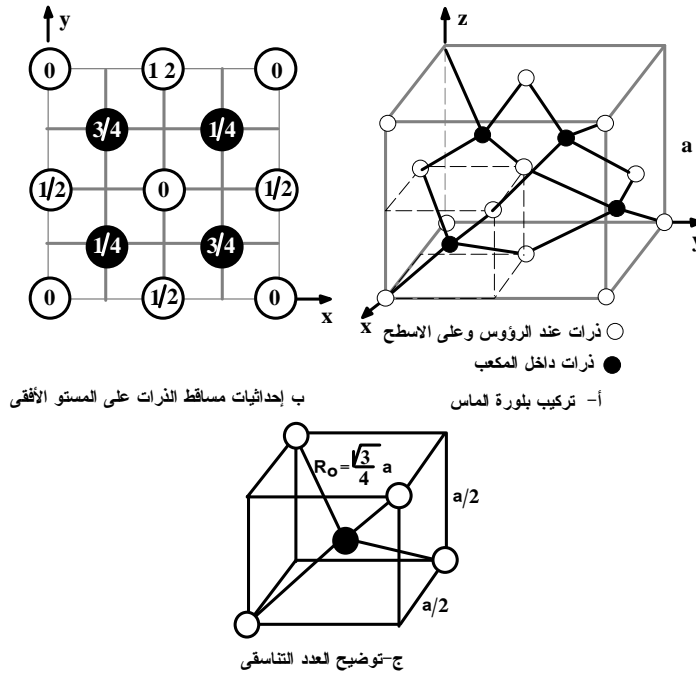
باتجاه ربع القطر الجسمي للشبكة المكعبة بمقدار ربع قطر المكعب. تكون كل ذرة

محاطة بأربع ذرات في الجوار على مسافات متساوية وواقعة على رؤوس شكل رباعي

السطوح منتظم، كما يبين الشكل 3-22(ج). وحيث أن التوزيع الفضائي للذرات التي

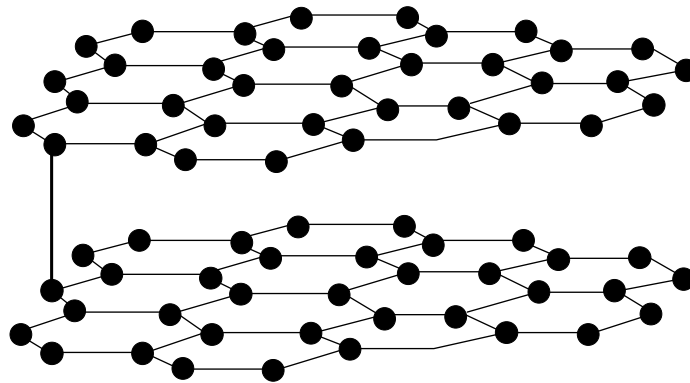
تحيط ذرة معينة يختلف من ذرة إلى أخرى لذلك نقول أن الشبكة ليست برافية، كما ذكرنا





الشكل 3-22 تركيب بلورة الماس.

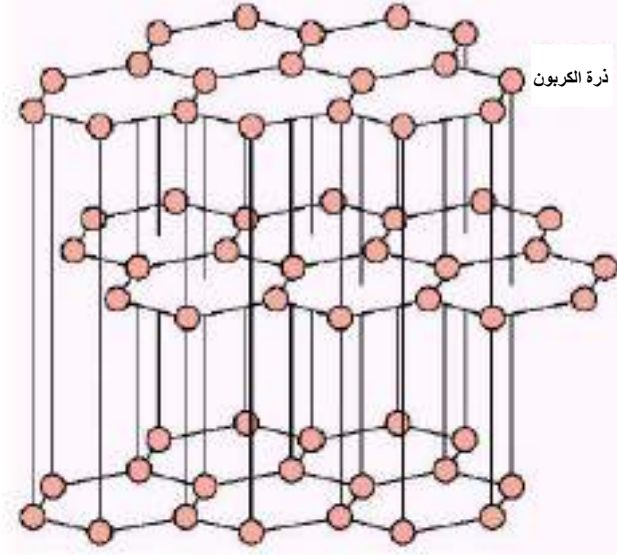
بالرغم أن عدد التناسق لذرة الكربون هو 4، كما يتضح من التركيب البلوري للماس، إلا أن الخلية الأولية للماس لا تنتمي إلى مجموعات التعبئة (الرص) المتراسة لأن كثافة الرص لها تساوى 0.34 فقط وهذه قيمة منخفضة. ورغم ذلك تظهر بلورة الماس خصائص ميكانيكية جيدة حيث تظهر مقاومة عالية للخدش ويرجع ذلك إلى دقة انتظام البلورة من ناحية وإلى قوة الروابط التناسقية بين ذرات الكربون من ناحية أخرى.



الشكل 3-23 تركيب الجرافيت (سداسي بسيط).

يمكن أن تتبلور ذرات الكربون أيضا (كما في حالة الماس) لتعطي بلورة جرافيت

(سداسي بسيط)، كما هو مبين بالشكل 3-23.



الشكل 3-24 شبكة الجرافيت في الأبعاد الثلاثة.

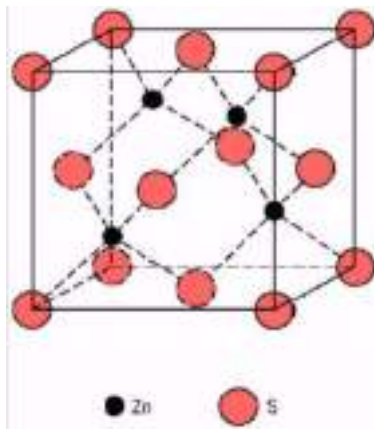
تكون الشبكة البلورية للجرافيت غير برفافية وتتكون من شبكتي سداسي بسيط متداخلتين، كما هو مبين بالشكل 3-24. تختلف الخواص الفيزيائية لكل من الجرافيت والماس اختلافاً كبيراً فالماس صلب جداً وشفاف وكثافته تساوي 3.5 جم/سم<sup>3</sup> ويعتبر عازلاً جيداً للكهرباء. على الجانب الآخر، يكون الجرافيت: لين جداً وأسود وكثافته تساوي 2.1 جم/سم<sup>3</sup> وموصل جيد للكهرباء. وبذلك نلاحظ أن اختلاف التركيب البلوري يعطي خواص فيزيائية متباينة وتسمى هذه خاصية تعدد الأشكال (polymorphism).

#### (د) تركيب بلورة كبريتيد الزنك ZNS

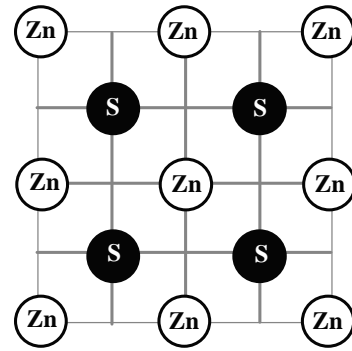
يشبه تركيب بلورة كبريتيد الزنك تركيب بلورة الماس، التي سبق شرحه، مع

فارق وحيد وهو أن الذرتين اللتين تكونان الأساس هما ذرتان مختلفتان. هنا يكون الأساس

مكون من ذرة زنك وذرة كبريت. تحتوي كل خلية وحدة على أربعة جزيئات من كبريتيد الزنك (ZnS) و توجد ذرة الزنك أو الكبريت في مركز شكل رباعي متكون من ذرات النوع المخالف، كما هو مبين بالشكل 3-25. تتبلور كثيرا من المواد شبه الموصلة على صورة بلورة كبريتيد الزنك. يبين الجدول 3-6 أبعاد بلورات بعض المركبات التي تتبلور على صورة ZnS.



ب- التركيب في الأبعاد الثلاثة



أ- التركيب مرسوم في بعدين

الشكل 3-25 تركيب بلورة كبريتيد الزنك.

الجدول 3-6 أبعاد بلورة بعض المركبات التي تتبلور على صورة ZnS (بالانجستروم).

a	المركب	a	المركب
5.41	CuCl	5.82	CdS
6.47	AgI	6.08	HgSe
5.07	BeSe	5.62	AlSb
5.41	ZnS	5.65	GaAs
6.09	ZnTe	4.35	SiC

يتضمن الشكل 3-26 جدول التركيب البلوري للعديد من العناصر الفلزية على

غرار الجدول الدوري للعناصر مما يسهل الكشف عن التركيب البلوري للفلزات.

Li	Be																								
Na	Mg																								Al
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga													
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn												
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi											

□	سداسي ذو عبوة متراسة	□	مكعب متمركز الجسم
□	مكعب ذو عبوة متراسة	□	تركيب أخرى

الشكل 3-26 جدول التركيب البلوري للفلزات.

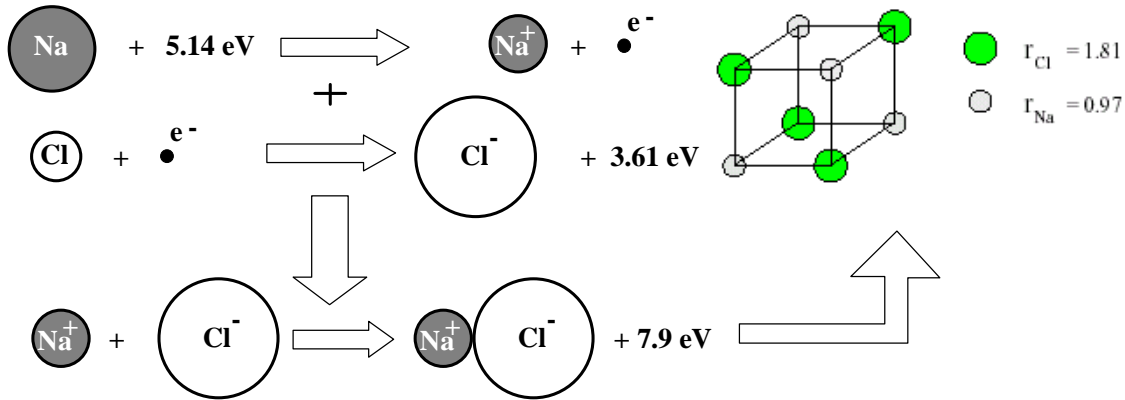
### 3-10 حول طاقة الترابط في البلورة الأيونية

#### ABOUT THE BINDING ENERGY OF THE IONIC CRYSTAL

كما درسنا في الباب الأول، تحدث الرابطة الأيونية عند انتقال إلكترون بين ذرتين مختلفتين. قبل الإرتباط تكون المدارات الخارجية للذرات مفتوحة (أى غير ممتلئة) وبعد الارتباط تغلق هذه المدارات (أى تمتلئ) وتصل الذرات الى تركيب أقرب غاز خامل). تحدث الرابطة بواسطة طاقة الجذب الكولومى بين الأيونات (الموجب والسالب) وتسمى الطاقة اللازمة لعمل مثل هذه الرابطة بطاقة الترابط. عند جمع طاقة الترابط مع طاقات التأين نحصل على الطاقة المنطلقة عندما يتكون الجزيء من الذرات المتعادلة. يمكن تعيين طاقة الترابط بين ذرتين بطريقة تقريبية وذلك بواسطة أنصاف الأقطار أيونات الذرات. ولفهم هذه الطريقة نأخذ كلوريد الصوديوم كمثال. يبين الشكل 3-27 طريقة تكون جزيء كلوريد الصوديوم. تكون طاقة التكون (الترابط) في بلورة كلوريد

الصوديوم طبقاً للمعادلة،  $E_B = \frac{a_o}{r_{Na} + r_{Cl}} \frac{e^2}{a_o}$  هي 5.19 eV. نلاحظ أن هذه القيمة لا تتفق مع

القيمة المقاسة عملياً  $6.4 \text{ eV}$ . يرجع سبب هذا الاختلاف الى عدم الدقة في قيم أنصاف أقطار الأيونات التي استخدمت في الحسابات وكذلك الى التبسيط المفرط في المعالجة الرياضية.



الشكل 3-27 تكون الطاقة لكل جزئ في بلورة كلوريد الصوديوم

أقل من طاقة الذرات المتعادلة المنفصلة. تكون طاقة  $(7.9 - 5.1 + 3.6) \text{ eV} = 6.4 \text{ eV}$

التماسك بالنسبة للأيونات المنفصلة  $7.9 \text{ eV}$  لكل وحدة جزئ. كل القيم المعطاة في

الشكل هي قيم عملية.

على كل حال، تكون هذه الحسابات، في كثير من الأحوال، تكون كافية لتعيين طاقة الترابط. ومن الواضح أن المواد الصلبة الأيونية تكون عازلة كهربياً، حيث أن كمية الطاقة اللازمة لكي يتحرك الإلكترون بحرية تكون كبيرة جداً،  $\sim 10 \text{ eV}$ .

تتعين طاقة الترابط بشكل التركيب البلوري للبلورات الأيونية، أي بواسطة

مسافات الاتزان بين الشحنات. ففي الأنظمة التي تكون فيها أنصاف أقطار الأيونات

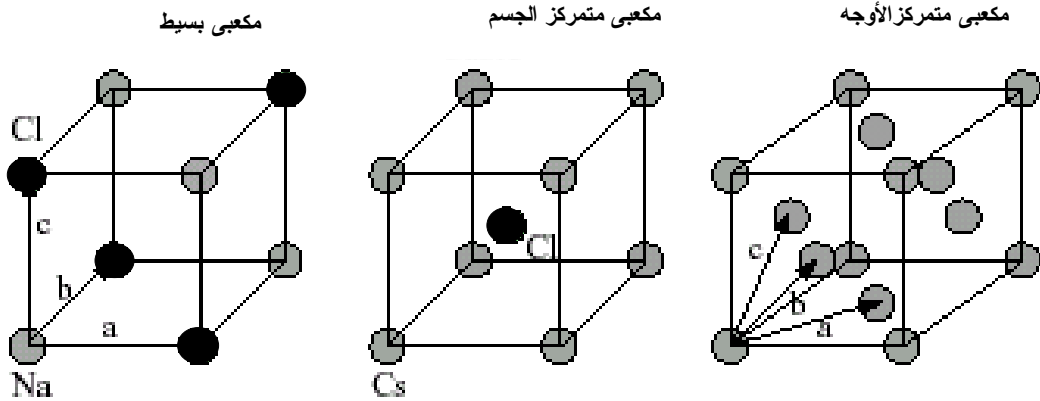
مقاربة ( مثل كلوريد السيزيوم، CsCl،  $r_{\text{Cs}} \approx 1.60 \text{ \AA}$ ،  $r_{\text{Cl}} \approx 1.81 \text{ \AA}$ ) يكون التركيب

المكعبى المتمركز الجسم (bcc) هو المفضل في الرص، أنظر الشكل 3-28. على الجانب

الآخر، في الأنظمة ذات أنصاف الأقطار المختلفة مثل NaCl، يكون التركيب المكعبى

البسيط هو المفضل وذلك بسبب أن ذرات الكلور ذات حجم أكبر وتحتاج إلى متسع من المكان. فإذا اقتربت قلوب الذرات (قلب الذرة هو عبارة عن النواة والالكترونات عدا الموجودة في المدارات الخارجية منها) بعضها من بعض لمسافة أقل من أنصاف الأقطار يحدث تداخل بين المدارات الخارجية وتكون حينئذ رابطة تساهمية تتضمن كل من قوى تجاذب وتنافر.

يبين الشكل 3-28 الاحتمالات الممكنة لشكل بلورة الملح. في حالتي المكعبي البسيط والمكعبي المتمركز الجسم تكون أقرب جيران لذرة ما عبارة عن ذرات من النوع المخالف لها ويكون تكوين هذه الشبكات الأيونية مشجعة للتعبئة. على كل حال، نجد أنه من المستحيل تكوين شبكة مكعبية متمركزة الأوجه باستخدام كميات متساوية من كل عنصر.



الشكل 3-28

عند تعيين طاقة الترابط يجب أخذ جميع القوى بين الشحنات في الاعتبار. تكون طاقة الترابط الكلية للتركيب الأيوني على صورة مجموع ماديلونج (وهو عبارة عن قوى التجاذب الكولومي الناشئة بين الشحنات المختلفة + قوى التنافر الناشئة بين أنوية الذرات المتشابهة وبين الكترونات كل ذرة مع

الالكترونات الذرة الأخرى).

تعتبر عملية حساب طاقة التنافر المشاركة في الطاقة الكلية عملية معقدة للغاية وتحتاج إلى ميكانيكا الكم، بينما، يمكن حساب طاقة التجاذب الكولومى بسهولة. للتسهيل، يمكن وضع صورة طاقة التنافر على صورة أسية. وباعتبار بلورة كلوريد الصوديوم (fcc)، يكون لكل أيون ستة جيران مخالفة و 12 جار من نفس النوع، كما هو مبين بالشكل 3-29. كما يمكن تقريب طاقة الوضع الكلية بين أيونين متجاورين  $i$  و  $j$  باستخدام معادلة مي (Mie). فى هذه الحالة تكتب طاقة الوضع الكلية (طاقة الترابط) على الصورة،

$$\phi_{ij} = \pm \frac{e^2}{r_{ij}} + \frac{B}{r_{ij}^n}, \quad 15-3$$

حيث يصف الحد الأول في هذه المعادلة الفعل الكولومى حيث تدل الإشارة نوع الفعل بين الشحنات المتشابهة والشحنات المختلفة. بينما يصف الحد الثاني في هذه المعادلة، بشكل تقريبي، التنافر الناشئ عن تداخل السحابات الالكترونية ويحتوى على المتغيرين  $n$  و  $B$ . (يمكن تقريب الحد الثاني ووضعه على الصورة الأسية  $Be^{(-r_{ij}/\rho)}$ ، حيث  $\rho$  كثافة الشحنة الحجمية). وبفرض أن المسافة الفاصلة بين أقرب جيران هي  $a$  فإن المسافة بين أي أيونين تكون  $r_{ij} = ap_{ij}$  وبالتالي يمكن كتابة طاقة الوضع الكلية على الصورة،

$$\phi = N\phi_i = N \left[ -\frac{e^2}{a} \sum_{i \neq j} \frac{\pm 1}{p_{ij}} + \frac{B}{a^n} \sum_{i \neq j} \frac{1}{p_{ij}^n} \right], \quad 16-3$$

حيث  $N$  هو عدد أزواج الأيونات في البلورة. يعرف المقدار  $A = \sum_{i \neq j} \frac{\pm 1}{p_{ij}}$  بثابت

ماديلونج (Madelung) وتعتمد قيمته على نوع الشبكة فقط (وليس على حجمها، فعلى

سبيل المثال، يكون  $A_{NaCl} = 1.748$  و  $A_{CsCl} = 1.763$ ). ونظرا للمدى القصير للوضع  $1/p_n$ ،

فإن الحد الثاني في المعادلة السابقة يمكن تقريبه بمجموع أقرب جار.

### مثال 3-15

إذا علمت أن طاقة الوضع بين ذرات جزئ ثنائي تتغير طبقا للعلاقة  $\phi(r) = -\frac{b}{r^6} + \frac{a}{r^{12}}$ ،

حيث  $r$  هي المسافة بين الذرتين و  $a$  ،  $b$  ثوابت، عين قيمة  $r$  عند طاقة الوضع الصفرية،

وقيمة  $r$  عند أقل طاقة وضع والقوة بين الذرتين ومقدار الطاقة اللازمة لتحلل الجزئ.

### الحل

$$\phi(r) = -\frac{b}{r^6} + \frac{a}{r^{12}} = 0 \quad \text{عند طاقة الوضع الصفرية نجد أن}$$

وبالتالي تكون قيمة  $r$  عند طاقة الوضع الصفرية هي

$$r_{\phi=0} = \sqrt[6]{a/b}$$

وتكون طاقة الوضع أقل ما يمكن عندما تساوى المشتقة الصفر وبالتالي نحصل

على،

$$\frac{\partial \phi(r)}{\partial r} = \frac{6b}{r_o^7} - \frac{12a}{r_o^{13}} = 0 \quad \& \quad \therefore r_o = \sqrt[6]{\frac{2a}{b}}$$

$$F = -\frac{\partial \phi(r)}{\partial r} = -\frac{6b}{r^7} + \frac{12a}{r^{13}} \quad \text{تعرف القوة بين الذرتين على النحو التالي}$$



يتضح من هذه المعادلة أن القوة تساوى صفراً عند مسافة تساوى ما لانهاية.

يبين الشكل 29-3 اعتماد كل من دالة طاقة الوضع والقوة بين الذرتين على

المسافة بينهما. من الشكل السابق يتضح أن القوة تكون موجبة عندما تكون المسافة بين

الذرات أقل من  $\sqrt[6]{\frac{2a}{b}}$  وتتنافر الذرتين، والعكس صحيح.

تعرف طاقة تحلل الجزيء بأنها الشغل المبذول لفصل مكونات الجزيء إلى مسافة

مالانهاية. وبالتالي يمكن كتابة طاقة التحلل على صورة الفرق بين طاقة الوضع عند ما

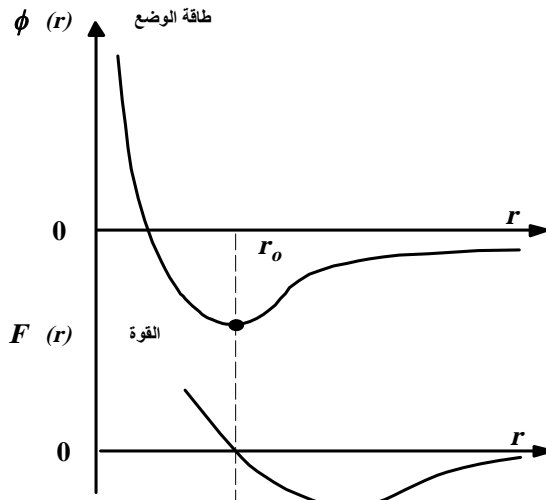
لانهاية وعند النهاية الصغرى (بالتعويض عن  $r = (2a/b)^{1/6}$  في معادلة الطاقة)، أي على

الصورة،

$$E_D = \phi_{\infty} - \phi_{\min} = 0 - \left( \frac{a}{4a^2/b^2} - \frac{b}{2a/b} \right) = \frac{b^2}{4a},$$

حيث يبدأ تحلل الجزيء عندما تصل طاقة حركة الذرات في قاع البئر الجهدى إلى

قيمة أكبر من  $E_D$ .



الشكل 29-3

## ملخص الباب

✗ يمكن تحديد الاتجاه في البلورة بواسطة أدلة ميلر على النحو  $[n_1, n_2, n_3]$  وتكون

أدلة الاتجاه لاتجاه ما في البلورة هي نفسها أدلة ميلر للمستوى العمودي على هذا الاتجاه.

✗ يشار إلى جميع الاتجاهات المتكافئة مع الاتجاه  $[n_1 n_2 n_3]$  بالرمز  $\langle n_1 n_2 n_3 \rangle$ .

✗ تكون المسافة بين المستويات التي لها أدلة ميلر  $\langle hkl \rangle$  في البلورة التي لها

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}}} \text{ فواصل } a \text{ و } b \text{ و } c \text{ هي}$$

✗ تعرف العلاقة بين أدلة ميلر  $(uvw)$  للمستوى وأدلة اتجاه محور النطاق  $[uvw]$  بقانون فايس.

✗ تعين الزاوية  $\theta$  بين الاتجاهين  $[u_1 v_1 w_1]$ ،  $[u_2 v_2 w_2]$  بواسطة العلاقة

$$\cos \theta = \frac{u_1 u_2 + v_1 v_2 + w_1 w_2}{\sqrt{u_1^2 + v_1^2 + w_1^2} \sqrt{u_2^2 + v_2^2 + w_2^2}}$$

✗ لتعيين عدد الذرات في وحدة الخلية يجب معرفة الشكل الهندسي للخلية ونصف القطر الذري.

✗ يعرف نصف القطر الذري على أنه نصف المسافة بين أقرب ذرتين

متجاورتين في بلورة عنصر نقي مع مراعاة أن أقرب ذرتين متجاورتين يجب أن تلامس كل منهما الأخرى.

✘ تعرف الكثافة الذرية للمستوى البلوري بأنها عدد الذرات لوحدة المساحات في مستوى بلوري معين.

✘ يعرف العدد التناسقي بأنه عدد أقرب العقد في الشبكة بالنسبة لعقدة معينة، أي أنه عدد أقرب العقد المجاورة لتلك العقدة.

✘ في المركبات الأيونية يزداد العدد التناسقي مع زيادة نسبة نصف قطر الكاتيون إلى نصف قطر الأنيون  $\left(\frac{r_{cation}}{r_{anion}}\right)$ .

✘ تعرف كثافة الرص بأنها النسبة بين الحجم المشغول بالذرات إلى حجم الخلية.

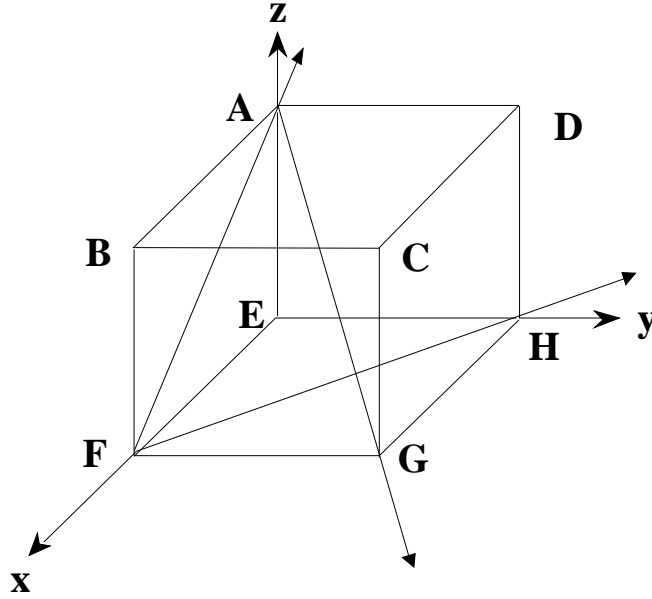
✘ يمكن تصور شبكة الماس المكعبة على أنها تتكون من شبكيتين (fcc) متماثلتين ومتداخلتين.

✘ يشبه تركيب بلورة كبريتيد الزنك تركيب بلورة الماس مع فارق وحيد وهو أن الذرتين اللتين تكونان القاعدة (الأساس) تكونان مختلفتين.

---

## أسئلة وتمارين

1. أي من المتجهات الآتية تقع على المستوى (110) :- [001]، [110]، [112]، [988]، [211].
2. أرسم المستويات والمتجهات التالية في وحدة الخلية المكعبة :- [434]، [122]، (112) و [112].
3. أوجد البعد بين المستويات المتوازية الآتية في بلورة الحديد ذات الخلية المكعبة التي لها  $a = 0.2886 \text{ nm}$  :- (111) و (212) و (423) و (201).
4. إذا كان  $a = b = c = 8 \text{ \AA}$ ، أوجد المسافة الفاصلة  $d$  بين المستويات المتوازية ذات معاملات ميلر (123).
5. أحسب المسافة الفاصلة لنفس المستويات في المسألة السابقة لبلورة لها خلية وحدة ذات  $a = b = 7 \text{ \AA}$  و  $c = 9 \text{ \AA}$ .
6. إذا كان طول خلية الوحدة للألومونيوم هو 4.04 أنجستروم، وكانت الخلية مكعبة الشكل فما قيمة كل من :-  $d_{220}$ ،  $d_{111}$  و  $d_{200}$ . (1.43، 2.33 و 2.02 أنجستروم، على وجه الترتيب).
7. عين أدلة ميلر للمتجهات المبينة بالشكل 3-30.
8. إذا علمت أن كلوريد الصوديوم يتبلور على صورة مكعبي متمركز الوجه، وأن وزنه الجزيء هو 58.2 وكثافته 2180 كيلوجرام/المتر المكعب. أوجد المسافة بين أقرب ذرتين



الشكل 3-30

9. تتكون الشبكة المتمركزة الأوجه من ذرات كرية نصف قطرها R. أحسب الكثافة

الذرية للمستويات : (أ) (110) و (ب) (100) و (ج) (111).

10. عين أدلة ميلر للذرات المتمركزة في أوجه المكعب.

11. برهن على أن الاتجاه  $[hkl]$  في البلورة المكعبة يكون دائما عموديا على المستوى

(hkl) الذي يملك نفس أدلة ميلر.

12. أثبت أن كثافة الرص النسبية في حالة المكعب المتمركز الجسم تساوي  $\frac{\sqrt{3} \pi}{8}$ .

13. أثبت أن كثافة الرص النسبية في حالة المكعب المتمركز الأوجه تساوي  $\frac{\sqrt{2} \pi}{6}$ .

ثم قارن بين كثافة الرص في المكعب المتمركز الأوجه والمكعب المتمركز

الجسم.

14. تعرف كثافة الرص بأنها النسبة بين الحجم الذي تحتله الذرات في الخلية إلى

الحجم الكلي للخلية. أثبت أن أعلى قيم لكثافة الرص هي على النحو التالي : 0.52

للمكعب البسيط ، 0.68 للمكعب المتمركز الجسم و 0.74 للمكعب المتمركز الأوجه.

أفترض أن الذرات عبارة عن كرات متماثلة ومتمركزة حول نقاط المكعب.

15. إذا علمت أن للنحاس تركيب بلوري مكعبي متمركز الأوجه وأن نصف القطر

الذري هو 1.278 أنجستروم، أوجد كثافة النحاس إذا علمت أن الوزن الذري للنحاس

يساوي 63.54. (الجواب 8.98 جم/سم<sup>3</sup>).

16. إذا كان التركيب البلوري للفضة هو شبكة مكعبي متمركز الأوجه وأن طول

المكعب هو 4.07 أنجستروم وأن الكتلة الذرية للفضة هي 107.88 و.ك.ذ. أحسب

كثافة الفضة.

17. أحسب الكثافة الذرية للمستويات: - أ-(100)، ب- (110) و ج-(111) في بلورة

النحاس إذا علمت أن البلورة مكعب متمركز الأوجه ونصف القطر الذري هو 1.27

أنجستروم.

18. ما المقصود بالمصطلحات الآتية:

(ب) رقم التناسق

(أ) خلية الوحدة

(د) الكثافة الذرية للمستوى البلوري

(ج) كثافة الرص

(هـ) الشبكة البرافية

(و) التماثل

(ز) نصف القطر الذرى.

19. أحسب الكثافة الذرية للمستوى (222) أو (111) في بلورة الحديد المكعبة المتمركزة

الأوجه ثم أحسب المسافة الفاصلة بين المستويين السابقين. (الجواب  $2.10 \times 10^{13}$

ذرة/م<sup>2</sup>،  $d_{111} = 2.05 \text{ \AA}$ ).

20. يكون التركيب البلوري لكلوريد الصوديوم مكعبي وفيه تتبادل أيونات الكلور

المواضع مع أيونات الصوديوم. فإذا علمت أن كثافة كلوريد الصوديوم هي 2.156

جم/سم<sup>3</sup> وأن عدد أفوجادرو  $= 6.025 \times 10^{23}$  ذرة/مول، أوجد المسافة الفاصلة بين

أقرب أيونين متجاورين. (الجواب  $2 \times 10^{-10}$  متر).

21. إذا كان تركيب الماس يمكن النظر إليه كشبيكتين مكعبية متمركزة الأوجه

متداخلتين وأن طول ضلع المكعب هو 3.56 أنجستروم. بين أن الكثافة الذرية

للماس هي  $1.77 \times 10^{23}$  سم<sup>-3</sup>، ومن هذه النتيجة أحسب كثافة الماس وقارنها مع

كثافة الماس المعروفة (3.5 جم/سم<sup>3</sup>) علماً بأن الكتلة الذرية للماس تساوى 12.2

و.ك.ذ. (الجواب 3.54 جم/سم<sup>3</sup>).

## Crystal Defects

## العيوب البلورية

في البلورات المثالية تترتب الذرات بشكل دوري منتظم من دون أي خلل أو عيب إلا أنه في الحقيقة لا توجد بلورة مثالية خالية من العيوب البلورية .  
البلورة المثالية ليست موجودة حتى في أفضل البلورات فالعيوب هي خروج عن الترتيب الدوري والنظامي لعقد الشبكة البلورية المكونة للمادة .  
إن المقصود بمصطلح العيب في فيزياء الحالة الصلبة هو أي انحراف أو اختلال في استمرارية الترتيب المنتظم للذرات في الشبكة البلورية .  
تلعب العيوب البلورية دورا مهما في فيزياء الحالة الصلبة فتألق البلورات الضوئي مرتبط بوجود العيوب البلورية وكثيرا من الخواص الميكانيكية والكهربائية والمغناطيسية لا يمكن فهمها وشرحها إلا بفهم دور العيوب في كل منها وخصوصا في أشباه الموصلات فالعيب يؤثر في توزيع الروابط الكيميائية ويغير الكثافة الالكترونية .

### تصنيف العيوب البلورية :

هناك ثلاثة أنواع من العيوب البلورية تقسم حسب حجمها وهي:-

Point Defects	١ العيوب النقطية
Line Defects	٢ العيوب الخطية
Surface Defects	٣- العيوب السطحية

### أولا :- العيوب النقطية

يعرف العيب النقطي بأنه انحراف أو اختلال في موقع ذرة أو مواقع عدد قليل من الذرات المتجاورة داخل المادة الصلبة ، أما سبب تسمية هذا الخلل بالعيوب النقطي لأنه يحدث في منطقة صغيرة جدا بالمقارنة مع حجم البلورة. يمكن تصنيف العيوب النقطية إلى ثلاثة تصنيفات :-

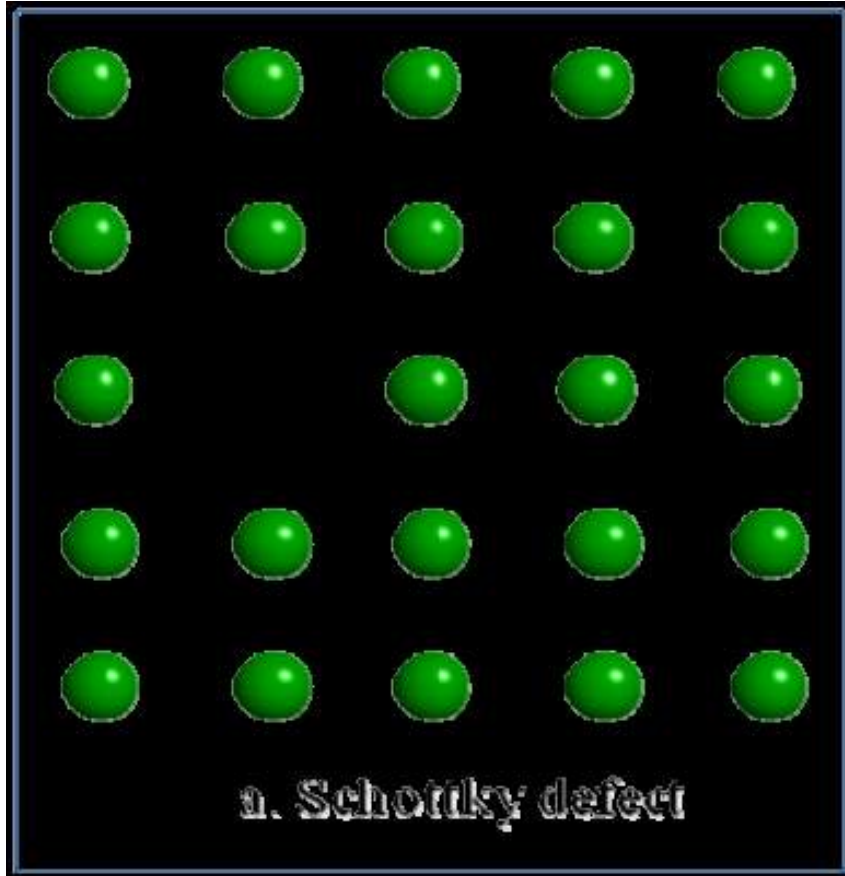


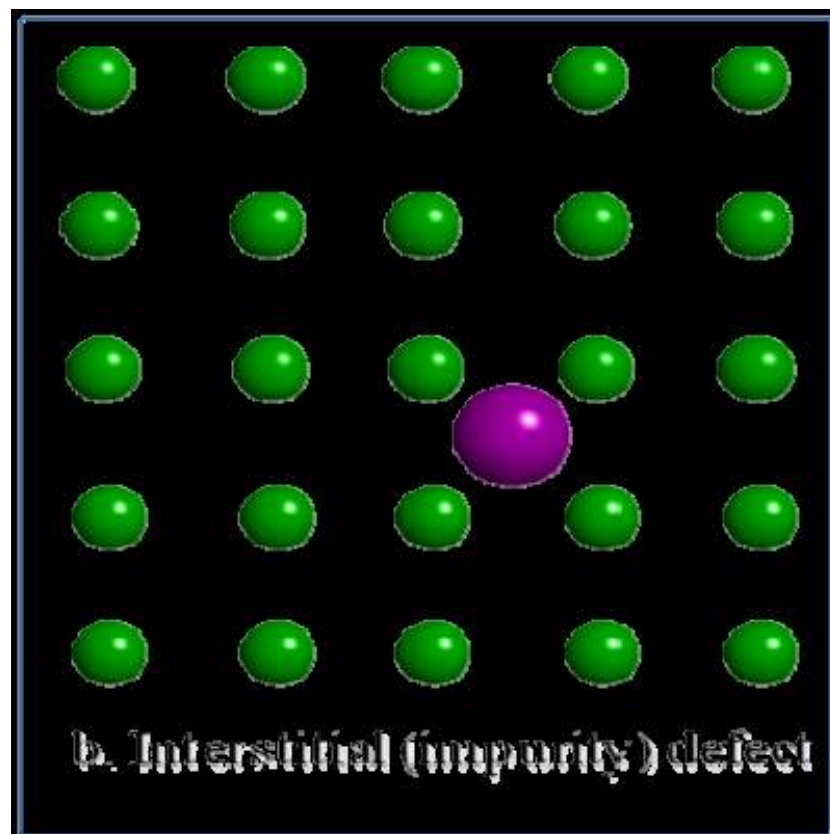
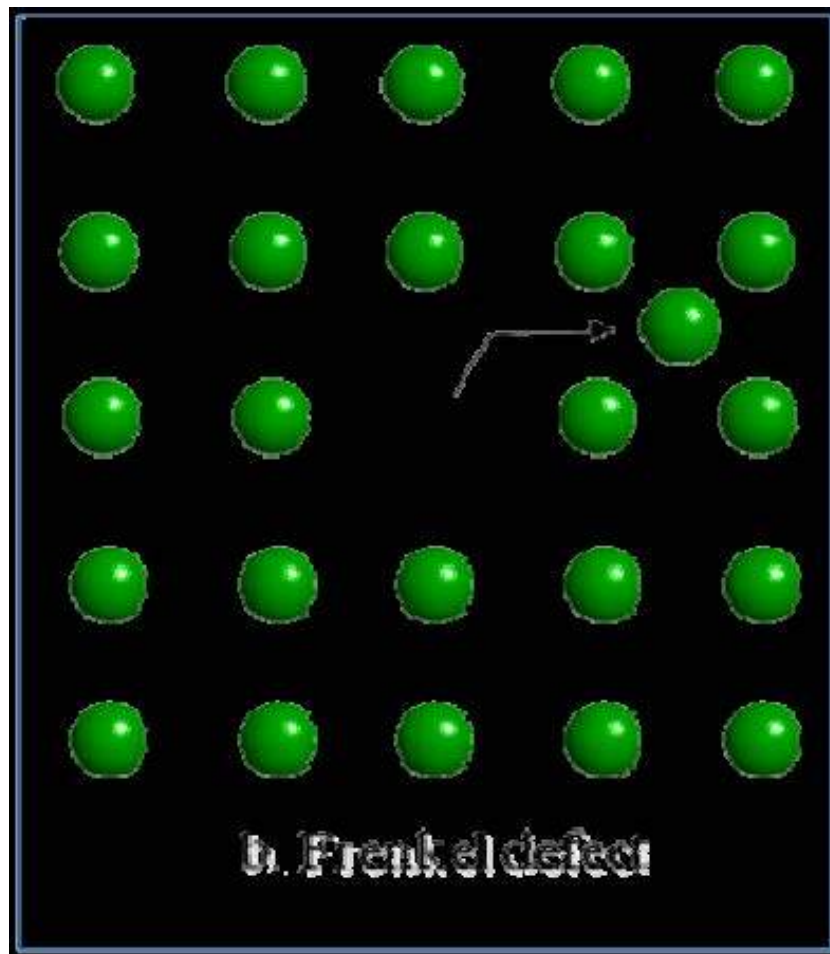
**الصنف الأول /** العيوب البنيوية وتمثل الانزياح عن الترتيب البلوري المثالي وتظهر بشكل **فجوات ( vacancies )** فالفجوة عبارة عن موقع شبكي نظامي خال من الذرات حيث يتم هجرة جسيم من موقعه الشبكي إلى سطح البلورة ويسمى هذا النوع من العيوب بعيوب شوتكي ( schottky defect ) والذي يعرف على انه فقدان إحدى الذرات من موقعها الأصلي تاركة وراءها حيزا من الفراغ ويحدث عيب شوتكي عادة في البلورات الأيونية مثل كلوريد الصوديوم .

أو بشكل حشوات ( ذرات بينية ) فالحشوة عبارة عن جسيم من جسيمات البلورة غادر موقعه النظامي الأصلي خلفا وراءه فجوة و متخذا في مكان بيني أو حشوي بين الذرات القريبة ويسمى هذا النوع من العيوب بعيب فرنكل ( frenkel defect ) .

ويحدث عادة في البلورات الفلزية وبلورات أشباه الموصلات .

وأحيانا يحصل لا ترتيب في البلورة وهو أن تتبادل ذرتين مختلفتين متجاورتين أو أكثر المواقع فيما بينها وهذه الحالة تدخل ضمن العيوب النقطية إذا لم تتجاوز عدة أبعاد ذرية .

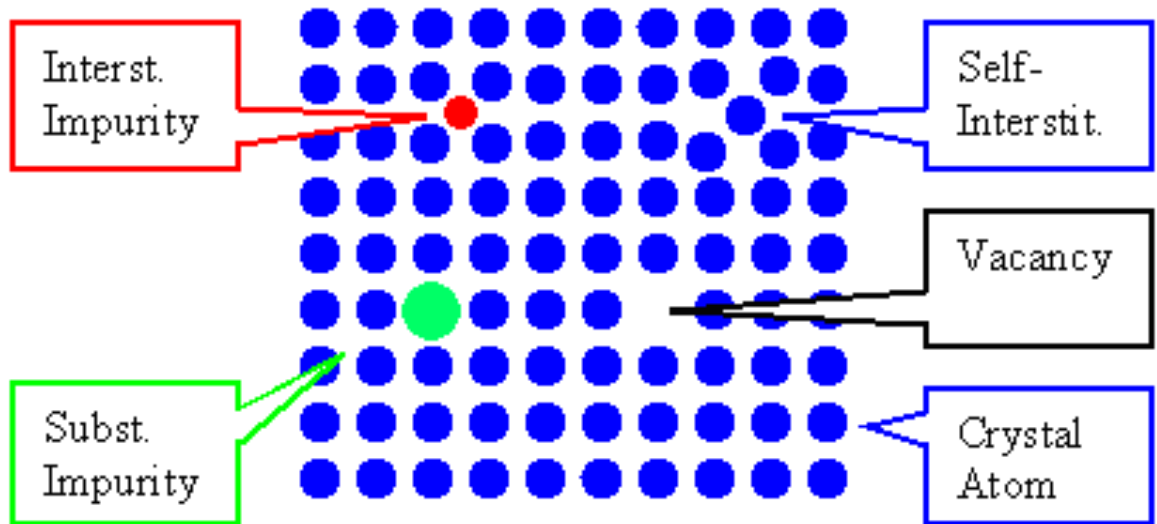




## الصنف الثاني :-

العيوب الكيميائية وتنتشا عن وجود شوائب ذات طبيعة كيميائية مختلفة عن طبيعة البلورة أو حتى وجود نظائر العناصر المكونة للبلورة مما يؤدي إلى اضطراب دورية الشبكة البلورية تظهر هذه العيوب بشكل شوائب استبدالية أو تعويضية (Substitutional impurities)

وهي عبارة عن ذرة أو ايون دخيل يحتل موقع الذرة الأصلي في الشبكة البلورية وهناك الشائبة الحشوية ( البينية ) Interstitial impurities وهي عبارة عن ذرة دخيلة أو ايون دخيل يحتل موضعا حشويا ( بينيا ) بين الذرات ، فمن المعروف إن المركبات الكيميائية الأيونية مثل كلوريد الصوديوم تكون متوازنة أيونيا إي أن عدد الايونات الموجبة يساوي عدد الايونات السالبة وأي تغير يحدث عن هذه النظامية يعطي تركيبا كيميائيا لا نظاميا نتيجة زيادة أو نقص في عدد احد نوعي الايونات ( الموجبة أو السالبة ) ، فإذا كان هناك زيادة في الايونات تتشكل عيوباً حشوية وإذا كان هناك نقص في الايونات تتشكل عيوباً فجوية.

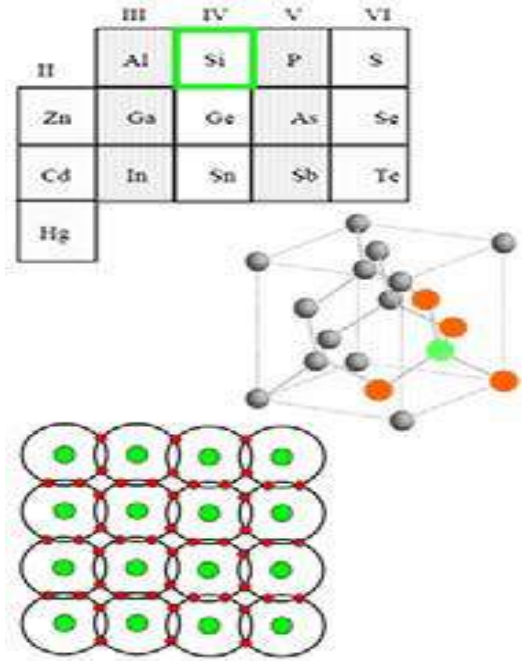


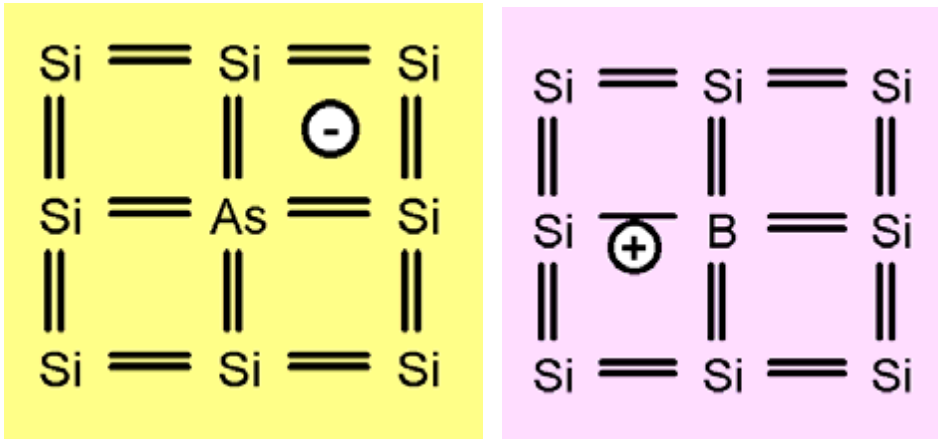
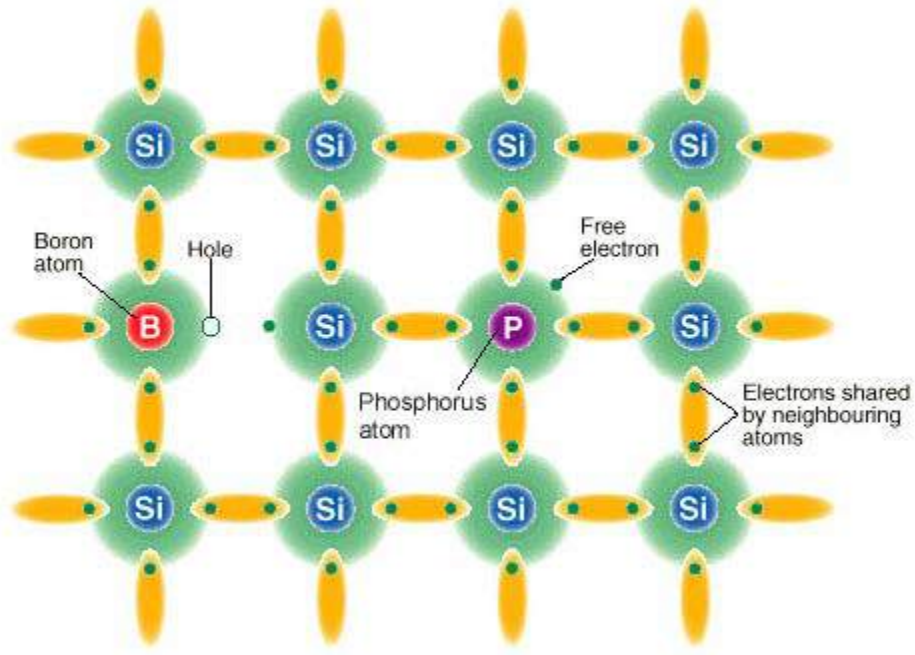
الصف الثالث :-

العيوب المانحة والأخذة:-

وتنشأ عن قدرة بعض الشوائب على إعطاء الالكترونات وتسمى بالشوائب المانحة وأخرى تستطيع استقبال الالكترونات فتسمى بالشوائب الأخذة ،  
تحصل هذه العيوب في أشباه الموصلات فعند إدخال شائبة من العمود الخامس في الجدول الدوري مثل الفسفور للعناصر مع البنية البلورية لعنصر من العمود الرابع في الجدول الدوري مثل الكربون أو السيلكون سيزيد إلكترون أثناء عملية تشكيل الرابطة التكافئية وهذا ما يزيد في عملية التوصيل الكهربائي للمادة المركبة وتسمى العيوب هنا بالعيوب المانحة وعلى العكس فان إدخال شائبة من العمود الثالث يجعل الرابط التكافئي مختل ويشكل ما يسمى بالثقوب أو العيوب الأخذة حيث يمكن لهذا الثقب من الانتقال من مكان لآخر مشكلا توصيلا كهربائيا من نوع آخر .

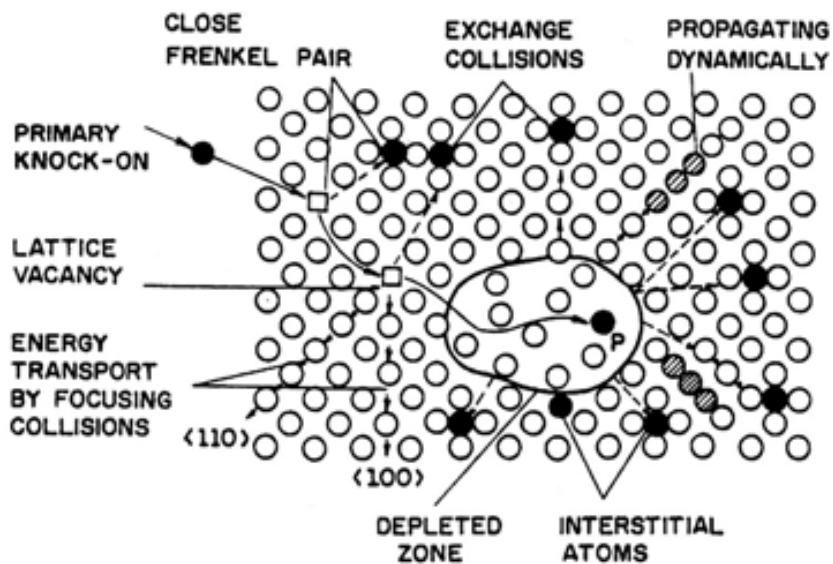
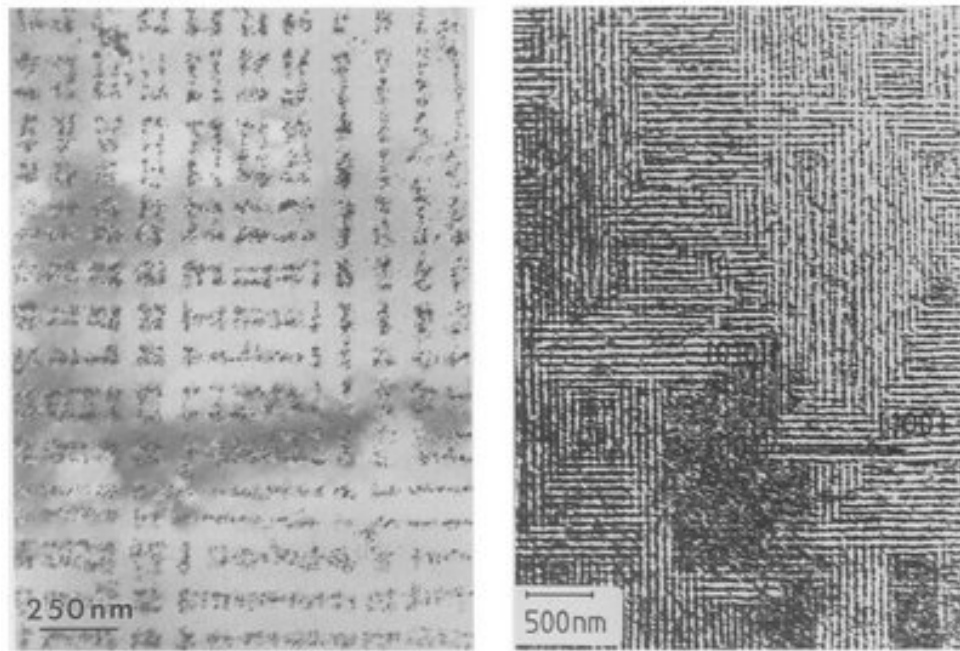
تعتبر هذه العيوب من أهم العيوب قاطبة في فيزياء الحالة الصلبة فمنها تصنع أشباه الموصلات التي تعطينا الثنائيات والترانزستورات والمضخات وتدخل في صناعة كل الأجهزة الالكترونية الحديثة دون استثناء.





الشكل / العيوب المانحة والآخذة .

ونحصل وإضافة لما سبق هناك العيوب الاصطناعية التي يتم التحكم بها اصطناعيا على المركب الذي نريده بدقة عالية وذلك بزيادة العيوب أو إنقاصها عن طريق التبريد والتسخين أو بالطرق الحديثة المسماة بالتشعيع حيث تقذف العينة بالجسيمات المفاعلات النووية حيث يتم اقتلاع بعض الذرات من مواقعها في الشبكة وهو ما يسمى بالتخريب الإشعاعي وأخيرا العيوب النقطية قد تظهر كلها في آن واحد في عينة ما فليس هناك قيود على وجودها معا.



**Figure 4.9** Seeger model of damage produced by irradiation. *P* indicates the position where the first “knock-on” terminates. (Reprinted with permission from A. Seeger, in *Proc. Symp. Radiat. Damage Solids React.*, Vol. 1, IAEA, Vienna, 1962, pp. 101, 105)

شكل / عملية التشعيع .



# جامعة البصرة – كلية الهندسة قسم الهندسة الميكانيكية



(ME136) هندسة المعادن  
المرحلة الاولى  
اعداد: د. حيدر مهدي الجابري

## مفردات المنهج :-

- الفصل الاول : المواد الهندسية Engineering materials
- الفصل الثاني : الخواص الميكانيكية والتشوهات اللدنة Mechanical properties and plastic deformation
- الفصل الثالث : تشكيل السبائك ومخططات الاتزان الحراري The formation of alloys and thermal Equilibrium diagram
- الفصل الرابع : الصلب الكربوني الاعتيادي plain carbon steel
- الفصل الخامس : المعاملات الحرارية للصلب الكربوني heat treatments
- الفصل السادس : الصلب السبائكي Alloy steel
- الفصل السابع : حديد الزهر وسبائكه cast Irons and Alloy Cast Irons
- الفصل الثامن : المعاملات الحرارية لحديد الزهر Heat Treatment of Cast Iron
- الفصل التاسع : المعادن والسبائك الغير حديدية ( خواصها – استعمالاتها )
- الفصل العاشر : التآكل Corrosion
- الفصل الحادي عشر : البوليمرات Polymers

## المصادر :-

1. د. حسين باقر رحمة الله – مبادئ هندسة المعادن والمواد – جامعة البصرة 1985
2. د. جعفر طاهر الحيدري والسيد عدنان نعمة – المعادن بنيتها وخواصها ومعاملاتها الحرارية – الجامعة التكنولوجية -1989
3. Fundamental of Materials science and engineering ,William D. Callister &David G., Third edition,2008

## Chapter One Engineering Materials

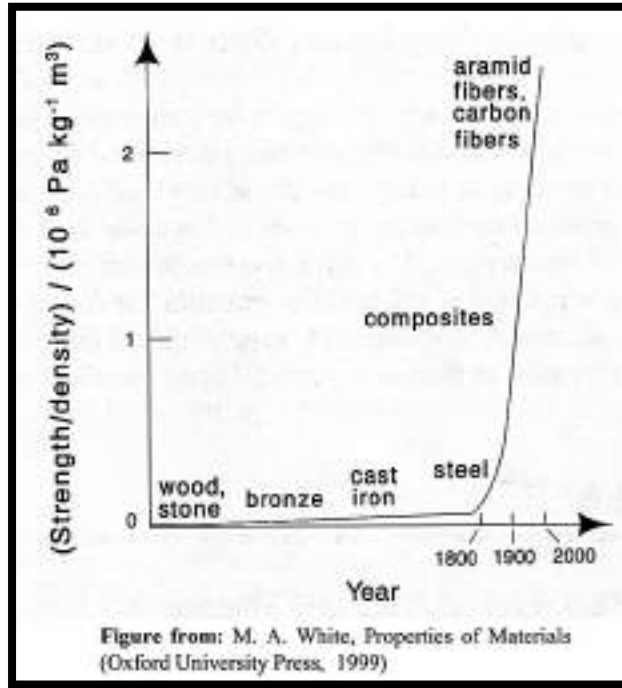
## الفصل الاول المواد الهندسية

### مراجعة تاريخية لأستخدام المواد الهندسية :-

ابتدا البشر بصنع بعض الادوات باستخدام الحجارة اي قبل مليونين سنة وكانت المواد المستخدمة هي الحجارة والخشب والطين وغيرها من المواد وبهذا ابتدا العصر الحجري .

انتهى العصر الحجري قبل 5000 سنة مع بداية العصر البرنزوي واكتشافه في الشرق والبرونز هو سبيكة نحاس تحتوي على النحاس والزنك والقصدير وبعض العناصر الاخرى ويمكن تشكيله باشكال مختلفة حيث كانت معظم الادوات اليومية مصنوعة من البرونز.

العصر الحديدي ابتدا قبل 3000 سنة والتي برز فيها استعمال الانسان للحديد في صناعة الادوات والاسلحة ومن ثم ابتدا عصر المواد المتقدمة وانواع كثيرة من المواد الجديدة اكتشفت مثل السيراميك واشباه الموصلات والبوليمرات والمواد المركبة ان معرفة العلاقة ما بين التركيب الداخلي ومواصفات وخصائص المعادن يمكن الحصول على مواد جديدة ذات مواصفات افضل وكما في الشكل ادناه والذي يوضح العلاقة ما بين نسبة المقاومة الى كثافة المعادن المختلفة .



### Length-scales

Angstrom=  $1\text{ \AA} = 1/10,000,000,000$  meter =  $10^{-10}$ m

Nanometer=  $10\text{ nm} = 1/1,000,000,000$  meter =  $10^{-9}$ m

Micrometer=  $1\text{ }\mu\text{m} = 1/1,000,000$  meter =  $10^{-6}$  m

Millimeter=  $1\text{ mm} = 1/1,000$  meter =  $10^{-3}$  m

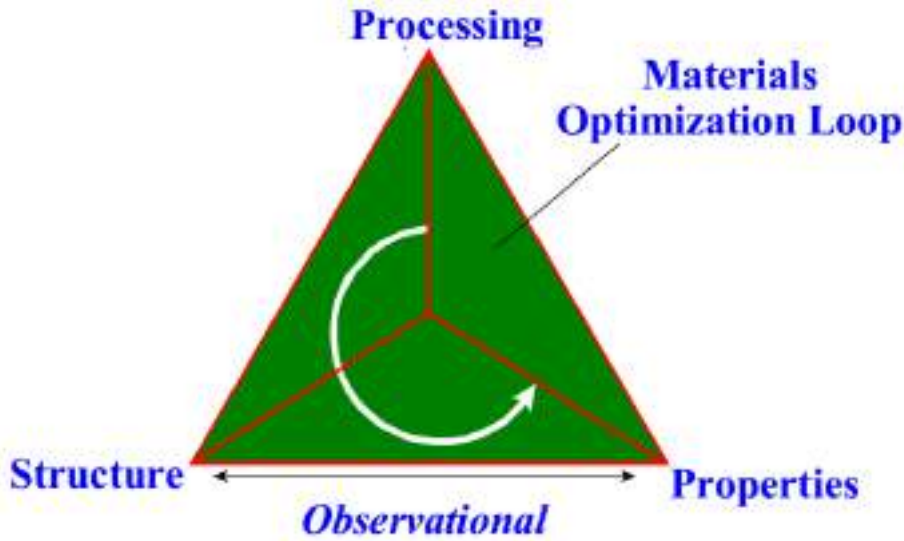


## تصنيف المواد الهندسية :-

1. المعادن Metals : المعادن تكون عادة ذات مقاومة عالية وذات موصلية جيدة للكهرباء والحرارة وهي غالبا ما تكون لماعة.
2. اشباه الموصلات Semiconductors :- هو مادة تتكون عادة من عنصر كيميائي صلب أو مركب كيميائي صلب . وتكون لهذه المادة خاصية توصيل التيار الكهربائي تحت ظروف معينة ، وعدم توصيل التيار في ظروف أخرى . وهذه الخاصية هي التي جعلت من أشباه الموصلات بيئة مناسبة لضبط التيار الكهربائي الزرنيخ والبورون والجرمانيوم والسليينيوم والسيليكون . بين الموصلات والعوازل تقع مجموعة من المواد المعروفة باسم أشباه الموصلات . يمكن أن تكون هذه الموصلات جيدة أو سيئة تفاعلي درجات الحرارة بها . وهي تستخدم على نطاق واسع في صناعة الالكترونيات في صناعة أجهزة الحالة الصلبة مثل الثنائيات، الثرمستورات، والترانزستورات والدوائر المتكاملة.
3. المواد السيراميكية Ceramic Materials :- تضمن مجموعه واسعه من المواد التي يصعب تعريفها بشكل دقيق، و لكن التعريف الأقرب أنها مواد غير عضوية و غير معدنية حضرت بواسطة الحرارة أو التبريد. المواد السيراميكية ممكن أن تحتوي علي تكوين بلوري أو شبه بلوري، و تحتوي هذه المجموعة على عده خصائص منها الصلادة، مقاومة التشكيل المرن، تحمل درجات الحرارة، مقاومة التآكل، توصيل منخفض للحرارة، و توصيل منخفض للكهرباء.
4. البوليمرات Polymers :- تتكون كلمة polymers من مقطعين الأول poly ويعني عديد ، والثاني mers ويعني جزيئات أو وحدات ثنائية. تتم صناعة المبلمرات عن طريقة عملية تسمى البلمرة . فقد عرف الانسان البوليمرات في الطبيعة كالنشا ، الكولاجين ، الألياف والمطاط والصبغ العربي . وفي القرن العشرين عندما زادت الحاجة الى المطاط إستطاع العلماء الألمان إنتاج المطاط الصناعي وهو نفس التركيب الكيميائي للمبلمرات التي تمتاز بطول السلسلة .

## علم المعادن Metallurgy

وهو العلم الذي يهتم بدراسة التركيب الداخلي للمعادن والسبائك وعلاقتها بالخواص الميكانيكية والفيزيائية وينقسم الى ثلاثة اقسام رئيسية :-

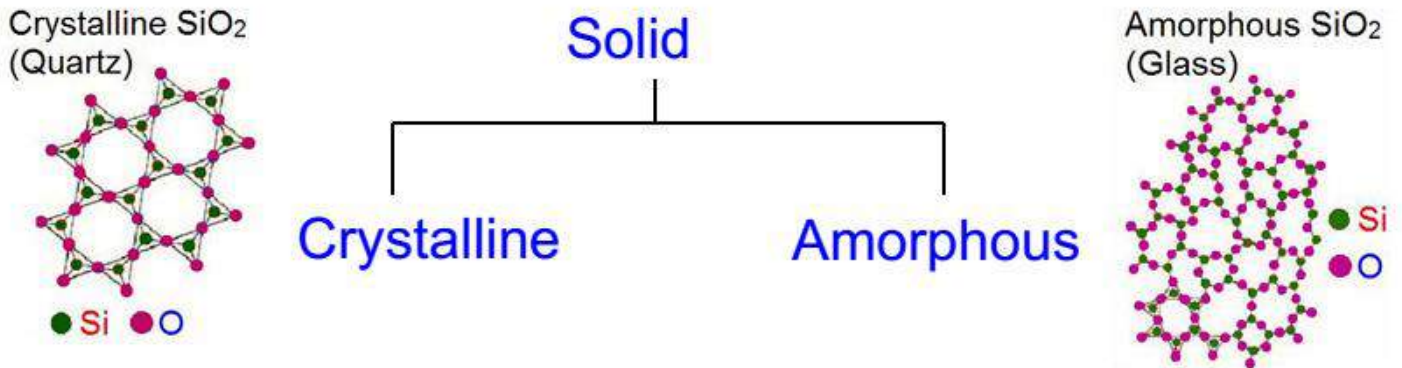


وبالتالي فان علم المعادن يبحث في العلاقة ما بين عمليات الاستخراج والمعالجة وتأثيراتها على التركيب الداخلي وعلاقتها بالخواص الميكانيكية والفيزيائية

## Crystalline Structure of Metals

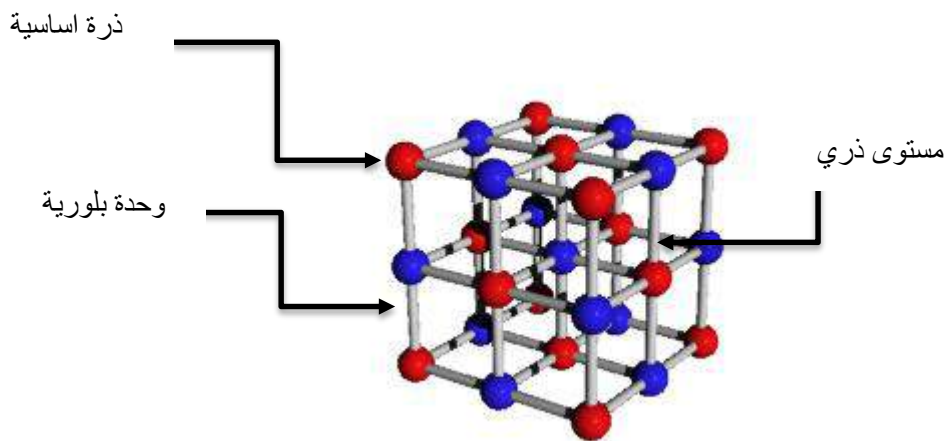
## البنية البلورية للمعادن

تقسم المواد الصلبة من حيث تركيبها البلوري الى قسمين



1. مواد صلبة بلورية Crystalline  
مرتبة هندسيا وتكون خواصها الميكانيكية افضل مثل الحديد والنحاس وبقية العناصر الفلزية
2. مواد صلبة غير بلورية Non-crystalline or Amorphous  
غير مرتبة هندسيا مثل الزجاج والبلاستيك

- اذا كانت الذرات مرتبة ترتيب هندسي منتظم اي تحتاج الى قوى ثابتة للتغلب على قوه الارتباط بين الذرات وبالتالي تكون درجات انصهارها او انجمادها ثابتة , ويجب ملاحظة اذا كانت الطاقة المعطاه طاقة حرارية فيحدث انصهار للمعدن اما اذا كانت القوه المسلطة قوى حقيقية فيحدث انهيار اي انكسار للمعدن.
- اما المواد الصلبة غير البلورية ليس لها درجات انصهار ثابتة وذلك بسبب عدم وجود مسافات ثابتة بين الذرات اي ترتيب هندسي غير منتظم .



- المستوى الذري : مجموعة من الذرات تقع في مستوى واحد
- الوحدة البلورية : تتخذ شكل هندسي معين وبذلك تتحدد الخواص الميكانيكية من شكل الوحدة البلورية وعدد الذرات في الوحدة البلورية
- الشبكة البلورية : مجموعة من الوحدات البلورية مرتبة ترتيب هندسي منتظم .
- ان الذرات التي تقع في رؤوس الوحدة البلورية تسمى ذرات اساسية او فعالة .
- المسافات التي تبعد بها الذرات فيما بينها تبقى ثابتة وتسمى الثوابت البلورية .
- الذرات الموجودة على الاطراف تكون طاقتها الحركية عالية اي الحواف الخارجية للشبكات البلورية وبالتالي سوف تحتاج الى طاقة اقل وعلية سوف تبدأ اولاً بالانصهار اذا ما كانت الطاقة حرارية .

❖ تتبلور معظم المعادن والفلزات على اساس ثلاثة اشكال هندسية مختلفة هي :-

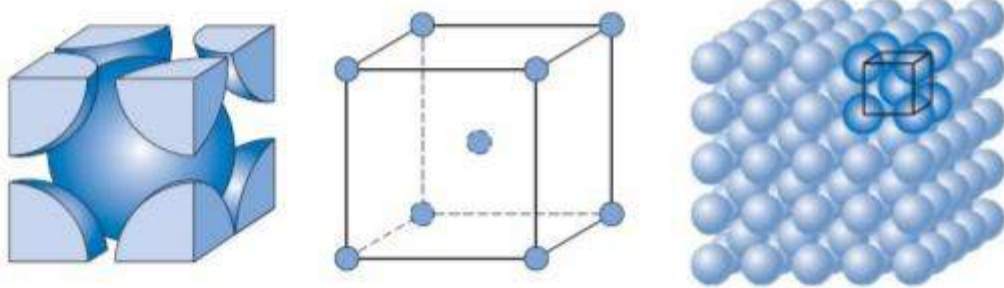
(1) مكعب متمركز الجسم (B.C.C.) Body centered cubic :- ترتتب الذرات على شكل مكعب مع وجود ذرة اضافية تتمركز وسط المكعب بحيث تلامس جميع الذرات الموجودة في الرؤوس ومن امثلة المعادن التي تتبلور على شكل مكعب متمركز الجسم حديد الفا والكروم Cr والتنتكستون W ويمتاز هذا النوع من التبلور

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ , a = b = c$$

عدد الذرات الفعلي

$$= \frac{1}{8} * 8 + 1 = 2$$

## Body-Centered Cubic (BCC)

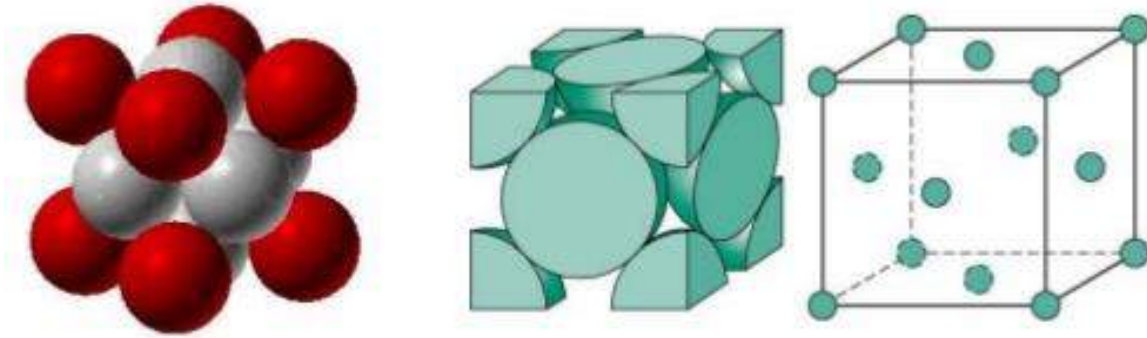


(2) مكعب متمركز الوجة (F.C.C.) Face centered Cubic :- تترتب الذرات على شكل مكعب مع

وجود ذرات متمركزة واحدة في كل سطح من اسطح المكعب الستة ويتبلور كل من النحاس Cu والالمنيوم Al والذهب Au والرصاص Pb ويمتاز هذا النوع

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ , a = b = c$$

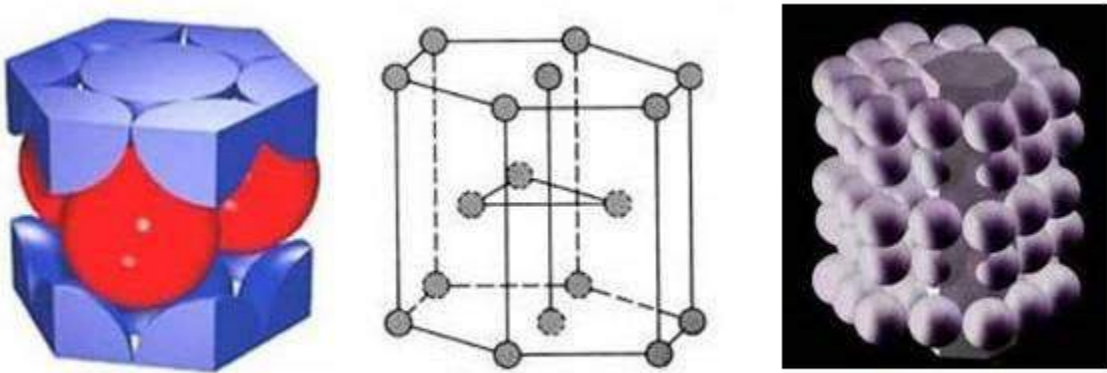
$$\frac{1}{8} * 8 + 6 * \frac{1}{2} = 4 \text{ عدد الذرات الفعلي}$$



(3) التركيب السداسي المحكم الرص ( السداسي المكثف ) Hexagonal (C.P.H) :- تترتب الذرات على شكل منشور سداسي مع وجود ذرتين كل واحدة تتمركز في احدى القاعدتين بالاطافة الى وجود ثلاث ذرات على شكل مثلث متمركزة بين القاعدتين ويتبلور كل من ابخارصين والمغنيسيوم والكوبل والكاديوم بهذا النوع . ويمتاز هذا النوع

$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ, a = b \neq c$$

$$\frac{1}{6} * 12 + 2 * \frac{1}{2} + 3 = 6 \text{ عدد الذرات الفعلي}$$



**Closed Packed Hexagonal Lattice Structure**

❖ معامل الاكتظاظ [A.P.F] The atomic packing factor :- هو النسبة بين حجوم الذرات في الوحدة البلورية الى حجم الوحدة البلورية نفسها .

معامل الاكتظاظ = حجم الذرات / حجم الوحدة البلورية = ( عدد الذرات \* حجم الذرة ) / حجم الوحدة البلورية

اولاً: B.C.C. Body-centered-cubic-

$$(2D)^2 = a^2 + 2a^2$$

$$\Rightarrow D = \frac{\sqrt{3}}{2}a \quad \& \quad r = \frac{D}{2}$$

$$\Rightarrow r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$$

The volume of the atom can be calculated as follows :

$$V = \frac{4}{3} \Pi r^3 = \frac{4}{3} \Pi \left( \frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3$$

The volume of the basic atoms in the unit cell can be calculated as follows :

$$V_b = 2 \left[ \frac{4}{3} \Pi \left( \frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3 \right]$$

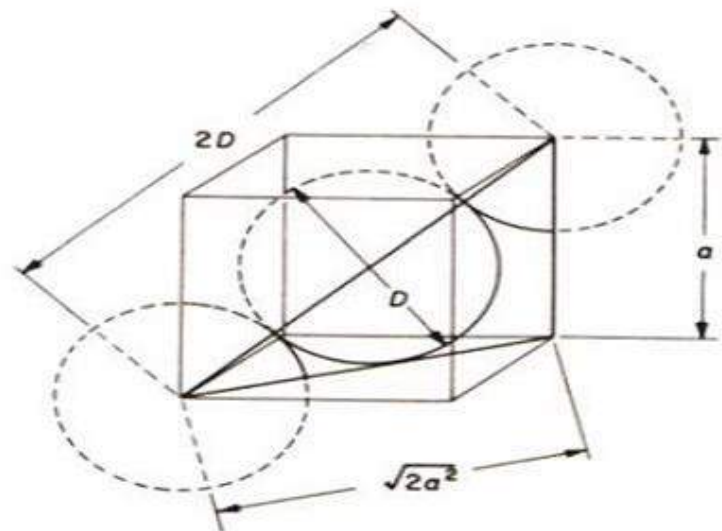
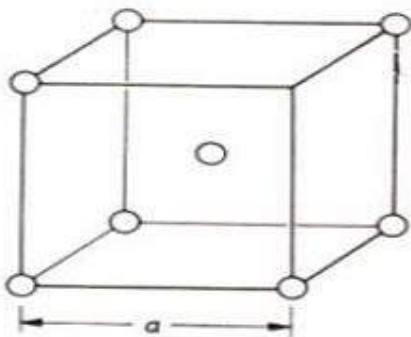
The volume of the unit cell is  $V_u = a^3$

$$A.P.F. = \frac{V_b}{V_u} = \frac{2 \left[ \frac{4}{3} \Pi \left( \frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3 \right]}{a^3} = 0.68$$

where D : is the atomic diameter

a : is the lattice constant

r : is the atomic radius



ثانياً:- Face-centered-cubic (FCC)

$$(2D)^2 = a^2 + a^2$$

$$\Rightarrow D = \frac{1}{\sqrt{2}}a \quad \& \quad r = \frac{D}{2}$$

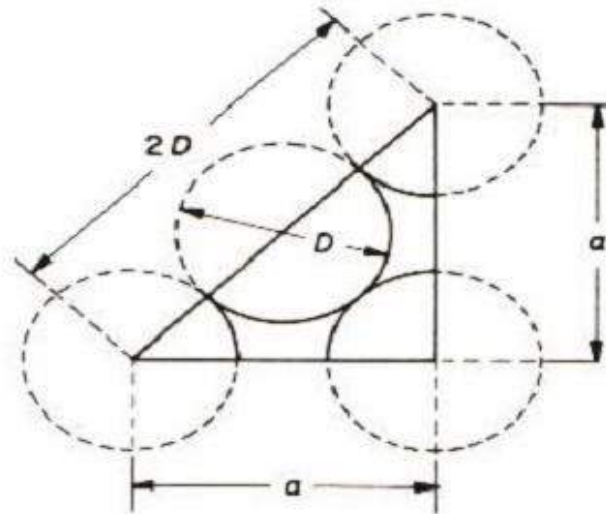
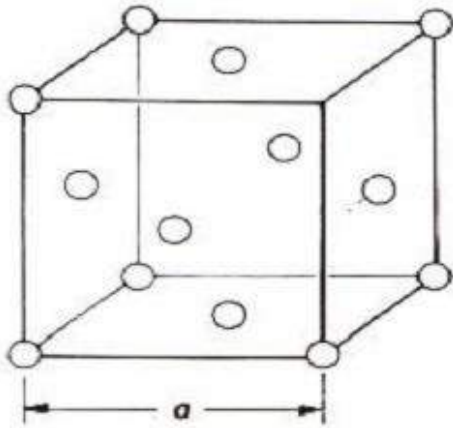
$$\Rightarrow r = \frac{1}{2\sqrt{2}}a$$

The volume of the basic atoms in the unit cell can be calculated as follows :

$$V_b = 4 \left[ \frac{4}{3} \Pi \left( \frac{1}{2\sqrt{2}}a \right)^3 \right]$$

The volume of the unit cell is :  $V_u = a^3$

$$A.P.F. = \frac{4 \left[ \frac{4}{3} \Pi \left( \frac{1}{2\sqrt{2}}a \right)^3 \right]}{a^3} = 0.74$$

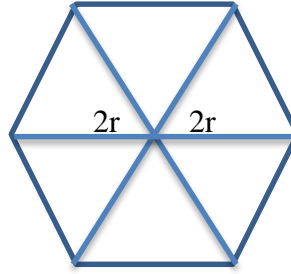
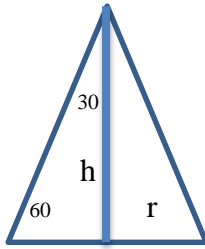
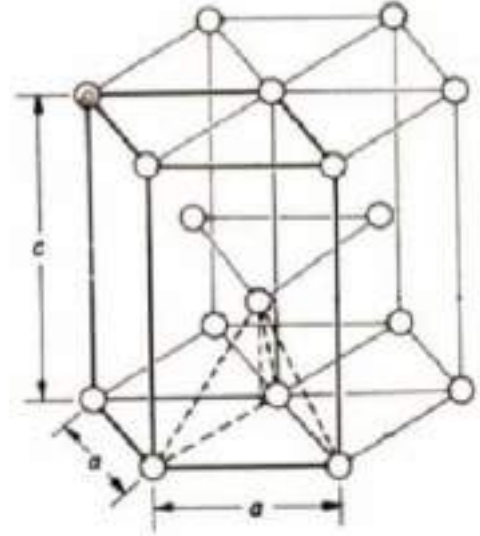


### ثالثاً:- Hexagonal-closed-packed (HCP)

$$\begin{aligned} c/a &= 1.64, a = 2r \\ c &= 2r * 1.64 \\ \tan 60 &= h/r \\ h &= r \tan 60 \\ \text{area of triangle} &= \frac{1}{2} * 2r * h \\ &= rh \\ &= r^2 \tan 60 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total area} &= 6 * \text{area of triangle} * \text{high} \\ &= 6 * r^2 \tan 60 * c \\ &= 6 * r^2 \tan 60 * 2r * 1.64 \end{aligned}$$

$$A.P.F. = \frac{6 * \frac{4}{3} * \pi * r^3}{6 * r^3 * \tan 60 * 2 * 1.64}$$



### ملاحظات :-

1. مستوى الانزلاق هو المستوى الذي يحتوي على اكبر عدد من الذرات في الوحدة البلورية والذي يحصل عنده الانزلاق او التشوية .
2. ان كل ما ازداد معامل الاكتظاظ الذري سوف تقترب الذرات من بعضها وبالتالي سهولة انزلاق الذرات اي سهولة تشويها .
3. في عملية التشوية تكون الطاقة المسلطة على المعدن اقل من القوى الرابطة اما اذا كانت الطاقة اكبر من القوى الرابطة فيحصل انهيار .
4. المعادن التي تتبلور على شكل F.C.C. تكون لها قابلية تشوية بصورة افضل من المعادن التي تتبلور على شكل B.C.C. وذلك لان لديها معامل اكتظاظ عالي .
5. التشوية او الانزلاق يعتمد اعتماداً كلياً على المستويات التي يحدث فيها انزلاق وهي المستويات التي تحتوي على اكبر عدد من الذرات .

❖ المستويات البلورية ومعاملات ميلر :- تتكون البلورات من مستويات ذرية Atomic Planes وان لكل مستوى من المستويات موقع واتجاه داخل البلورة الواحدة .

## Miller indices

## معاملات ميلر

• هي طريقة رياضية وصفية للمستوى البلوري او مجموعة من المستويات البلورية ضمن الشبكة البلورية والتي ابتكرها العالم ميلر William Hallows Miller وهذه الطريقة غير معتمدة على الزوايا الصلبة للبلورة بل تعتمد على ارقام ثلاثة ويرمز لها (L, K, h) والتي تسمى بمعاملات ميلر . وهذه المعلومات مفيدة لفهم العديد من الخواص في علم المواد وخصوصا البلورات المنفردة وشكل البنية الدقيقة للمواد من خلال استخدام حيود الاشعة السينية والعيوب البلورية وحركتها والتي تحدد الخواص الميكانيكية للمواد .

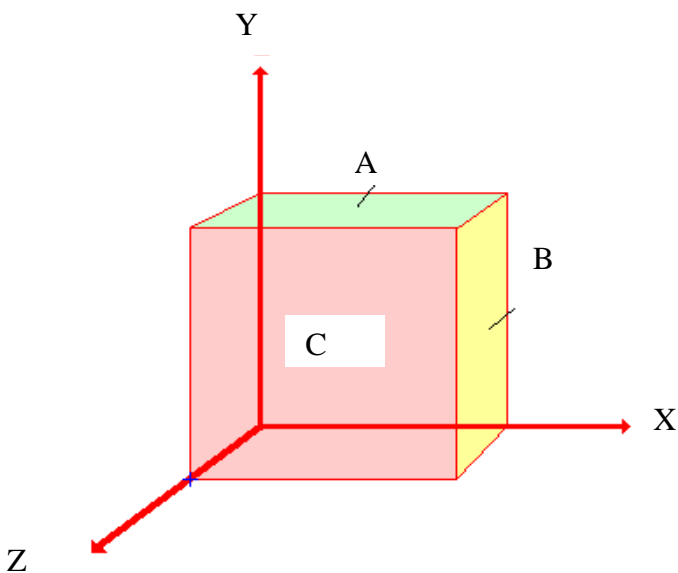
تتلخص طريقة تمثيل معاملات ميلر بما يأتي :-

1. نحدد قيم المحاور الثلاثة (X, Y, Z)
2. نجد مقلوب قيم تلك المحاور
3. في حالة وجود كسور يجب ان تحول الى ارقام صحيحة .
4. نجد القيم الجديدة ونضعها بين قوسين من دون وضع اشارة الفارزة بين قيم هذه المعاملات وكالاتي ( ) ليمثل المستوي .
5. اذا كانت قيم احد المحاور سالبة يجب ان نضع علامة ( - ) اعلى الرقم للاشارة الى اتجاه القيمة السالبة .

مثال :- اكتب معاملات ميلر للشكال الموضحة ادناه؟

A. نحسب قيمة نقاط التقاطع مع المحاور

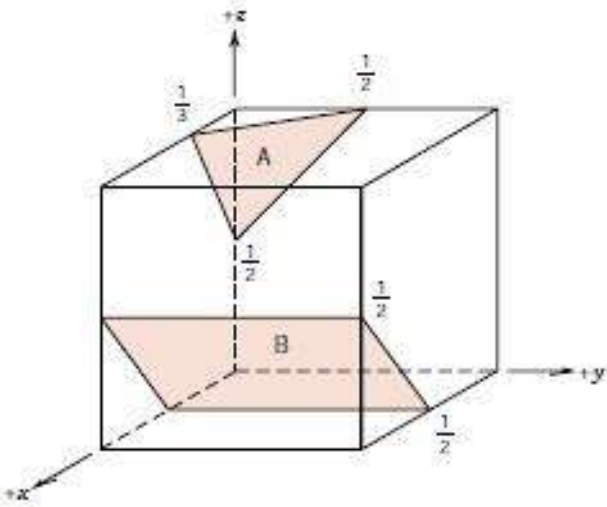
ونقاط التقاطع مع المحاور  
 $X = \infty, Y=1, Z=\infty$   
 نجد مقلوب نقاط التقاطع  
 $X=0, Y=1, Z=0$   
 نضع الارقام بين قوسين وبدون فواصل وهي تمثل معاملات ميلر (010)



B.  $X=1, Y=\infty, Z=\infty$   
 مقلوب النقاط  
 $X=1, Y=0, Z=0$   
 معاملات ميلر (100)

C.  $X=\infty, Y=\infty, Z=1$   
 مقلوب النقاط  
 $X=0, Y=0, Z=1$   
 معاملات ميلر (001)

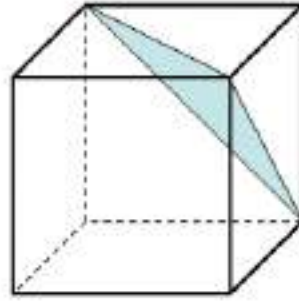
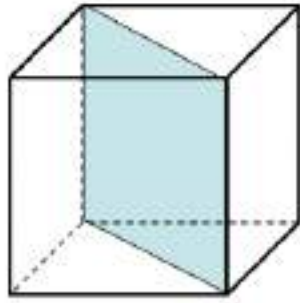
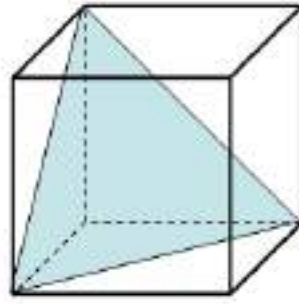
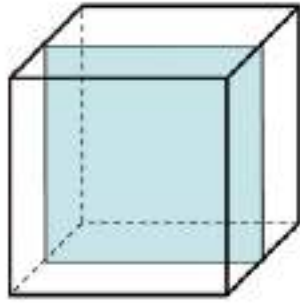
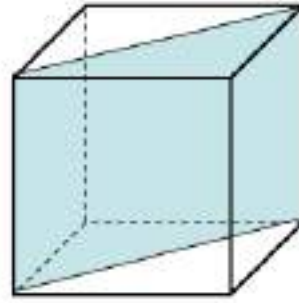
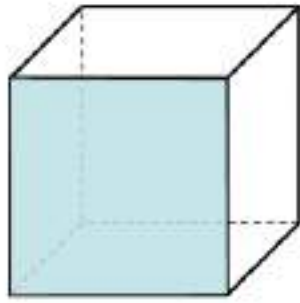




A.  $X=1/3, Y=1/2, Z=1/2$   
 المقلوب:  $X=3, Y=2, Z=2$   
 معاملات ميلر: (322)

B.  $X=1/2, Y=\infty, Z=1/2$   
 المقلوب:  $X=2, Y=0, Z=2$   
 معاملات ميلر: (202)  
 ومن الممكن كتابتها بالشكل (101)

H.W. :- احسب معاملات ميلر للمستويات البلورية التالية؟

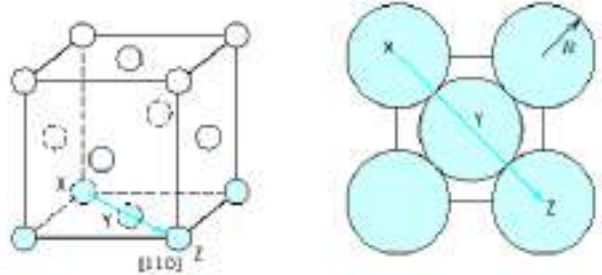


❖ الكثافة الخطية والكثافة السطحية للمستويات البلورية :-

## Linear and Planar Densities

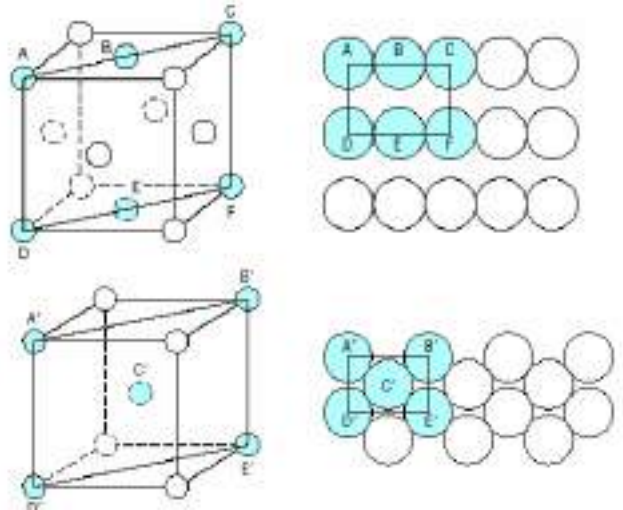
### • Linear Density

$$LD = \frac{\text{number of atoms centered on direction vector}}{\text{length of direction vector}}$$



### • Planar Density

$$PD = \frac{\text{number of atoms centered on a plane}}{\text{area of plane}}$$



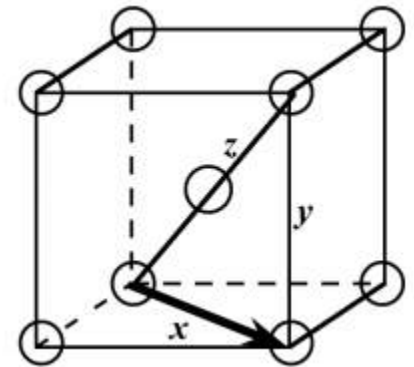
مثال :- اشتق الكثافة الخطية للمتجهين (101) و(111) اذا علمت ان البلورة متبلورة على شكل مكعب متمركز الجسم ونصف قطر الذرى R ؟

$$x = \sqrt{z^2 - y^2}$$

$$x = \sqrt{(4R)^2 - \left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\frac{32R^2}{3}} = 4R\sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$LD_{110} = \frac{\text{number of atoms centered on [110] direction vector}}{\text{length of [110] direction vector}}$$

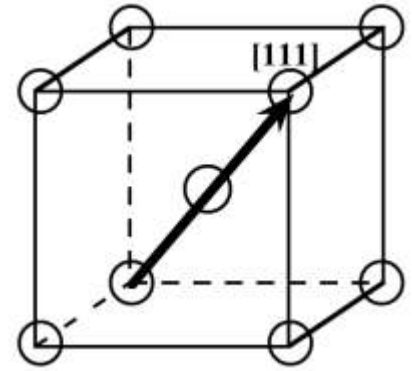
$$= \frac{1 \text{ atom}}{4R\sqrt{\frac{2}{3}}} = \frac{\sqrt{3}}{4R\sqrt{2}}$$



الحل :-

$$LD_{111} = \frac{\text{number of atoms centered on } [111] \text{ direction vector}}{\text{length of } [111] \text{ direction vector}}$$

$$= \frac{2 \text{ atoms}}{4R} = \frac{1}{2R}$$

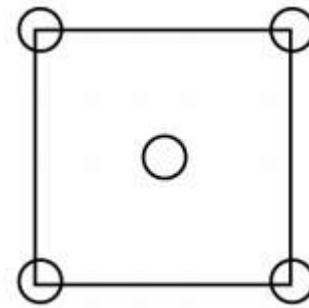


مثال : اشتق الكثافة السطحية لبلورة مكعب متمركز الوجة والمستويات (100) و(111) اذا علمت ان نصف قطر الذرة R ؟

الحل :- اولاً: للمستوي (100)

$$PD_{100} = \frac{\text{number of atoms centered on } (100) \text{ plane}}{\text{area of } (100) \text{ plane}}$$

$$= \frac{2 \text{ atoms}}{8R^2} = \frac{1}{4R^2}$$



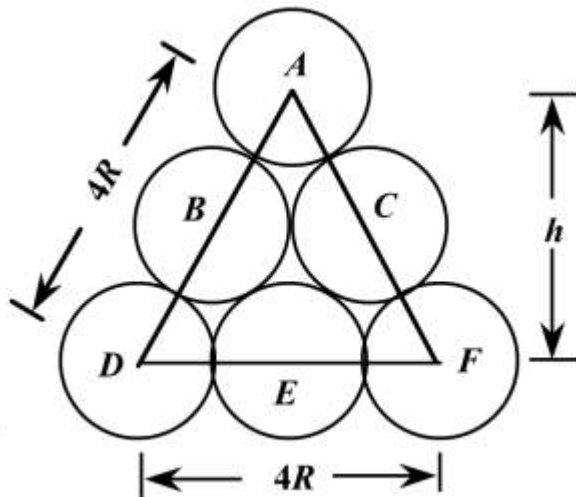
ثانياً :- للمستوي (111)

$$(2R)^2 + h^2 = (4R)^2$$

$$\text{Area} = \frac{4R(h)}{2} = \frac{(4R)(2R\sqrt{3})}{2} = 4R^2\sqrt{3}$$

$$PD_{111} = \frac{\text{number of atoms centered on } (111) \text{ plane}}{\text{area of } (111) \text{ plane}}$$

$$= \frac{2 \text{ atoms}}{4R^2\sqrt{3}} = \frac{1}{2R^2\sqrt{3}}$$



**Chemical Bonding****الأواصر الكيميائية**

تعتمد الكثير من الخواص الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية للمواد الصلبة على نوع وشدة الأواصر الكيميائية التي تربط ذرات المادة بعضها مع بعض.

أنواع الأواصر الكيميائية :-

الأواصر الرئيسية وتشمل :-

١ الأصرة الأيونية Ionic Bond

٢ الأصرة التساهمية Covalent Bond

٣ الأصرة الفلزية Metallic Bond

الأواصر الثانوية وتشمل :-

١ قوى تجاذب فاندرفالس Vanderwalles Bond

٢ الأصرة الهيدروجينية Hydrogen Bond

١ الأصرة الأيونية Ionic Bond

يطلق على القوة التي تربط بين الايون الموجب والايون السالب بالأصرة الأيونية ويعد كلوريد الصوديوم (NaCl) أفضل الأمثلة لهذا النوع من التاصر ( العدد الذري للصوديوم 11 والعدد الذري للكلور 17 ) ، فعندما تتحد ذرة الصوديوم (Na) بذرة الكلور (Cl) نجد من السهولة أن ينتقل إلكترون واحد من الغلاف الخارجي للصوديوم إلى الغلاف الخارجي لذرة الكلوريد ، ويطلق على ذرة الصوديوم التي تفقد إلكترونها بالايون الموجب للصوديوم (Anion) بينما يطلق على ذرة الكلور التي اكتسبت إلكترونها بالايون السالب للكلور (Cation)

تعتبر الأصرة الأيونية بأنها اقوي أنواع الأواصر الكيميائية ، وتتميز المواد الصلبة الناتجة من الترابط الأيوني بانها :-

1- ذات صلابة متوسطة ووزن نوعي متوسط .

٢ -درجة انصهار عالية.

٣ -رديئة التوصيل الكهربائي والحراري .

## ٢ -الأصرة التساهمية Covalent Bond

إذا اشتركت ذرتان متجاورتان في الكتروناتهما لإشباع غلافيهما الخارجيين ليصبح تركيبهما مستقرا بشرط ان لا يحدث انتقال للالكترونات فيطلق على هذه القوى بالأصرة التساهمية .

تعد جزيئه الكلور ( $Cl_2$ ) أفضل الأمثلة لهذا النوع من التاصر حيث تحتوي كل ذرة كلور على سبعة الكترونات في غلافها الخارجي .

تتمتع هذه الرابطة بأهمية خاصة في الكيمياء وعلم البلورات وتنشأ من التشارك بالالكترونات بين الذرات المتجاورة حيث أن كل ذرة تساهم بالكترون أو أكثر في الهيدروجين عملية الربط بحيث تكون الالكترونات مشتركة بين الذرتين ويشكل والكربون والسيلكون والجرمانيوم أمثلة عن هذا النوع من الأصرة .  
وتتميز المواد الصلبة التي ترتبط ذراتها بمثل هذه الأصرة بأنها :-

١ -غير قابلة للذوبان بصفة عامة .

٢ -مستقرة كيميائيا .

٣ -ذات درجة انصهار وغليان عالية جدا .

٤ -رديئة التوصيل الكهربائي .

### ٣ -الآصرة الفلزية Metallic Bond

عندما تقترب الذرات الفلزية المعدنية بعضها من بعض تتداخل الأغلفة الخارجية للذرات المكونة لها ، وان تتداخل الأغلفة الخارجية بهذا الشكل يمكن آيا من الالكترونات من الانتقال إلى أي ذرة قريبة غير مستقرة وتبدو المادة وقتها كأنها مجموعة من الايونات الموجبة الثابتة في مواقعها تدور حولها الكترونات حرة طليقة في جميع الاتجاهات وتتحرك هذه الالكترونات ضمن حدود المادة وكأنها جزيئات غاز محصور في إناء . ولهذا السبب أطلق على تسمية هذه الالكترونات الحرة بـغاز الإلكترتون (Electron Gas) .

وتتميز المواد الصلبة الناتجة عن الترابط الفلزي بأنها :-

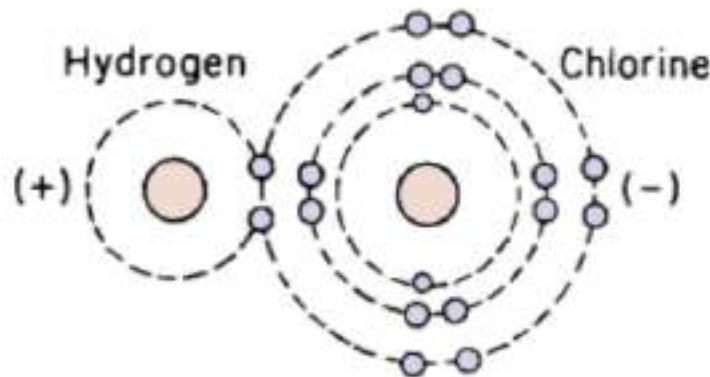
- ١ - لها القابلية العالية للتوصيل الكهربائي والحراري .
- ٢ - لها القابلية على الطرق والسحب وسهولة التشكيل .
- ٣ -انخفاض الصلابة .
- ٤ -انخفاض درجتي الانصهار والغليان .

## ١ قوى تجاذب فاندرفالز Vander walls Bond

وهي أصرة أوجدها العالم الهولندي فاندرفالز والتي سميت بأسمه ، وهي أصرة موجودة في كل المواد الصلبة وغير الصلبة وهي اضعف بكثير من الأواصر الأيونية والتساهمية والفلزية لذلك لا يظهر تأثير قوى تجاذب فاندرفالز إلا في الغازات النبيلة (Noble Gasses) التي يكون غلافها الخارجي مشبعا بالالكترونات حيث تكون هذه القوى ( فاندرفالز ) فاعلة بشكل كبير وتعمل على ربط ذرات الغازات النبيلة بعضها ببعض . أن المواد الناتجة من هذا الترابط الضعيف تكون ذات درجات انصهار وغلان واطنة وكذلك تكون صلابة هذه المواد واطنة .

## ٢ الأصرة الهيدروجينية Hydrogen Bond

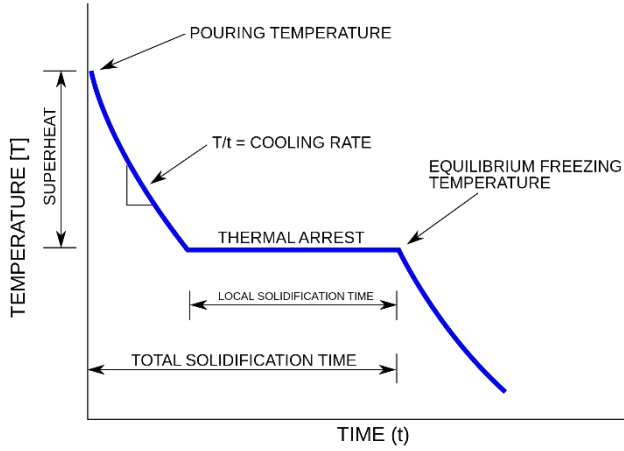
تعرف الأصرة الهيدروجينية بأنها قوة تجاذب ضعيفة متبادلة بين ذرة أو أكثر من ذرات الهيدروجين لإشباع غلافها الخارجي ، مثال ذلك ذرتي ( HF ) و ( H<sub>2</sub>O ) تتكون ذرة الهيدروجين من إلكترون واحد وبروتون واحد ويمكن إن ترتبط مع ذرة عنصر آخر يحتاج ذرة الهيدروجين لإشباع غلافها الخارجي مثل ذرة الفلور ( عدده الذري 9 ) حيث تستطيع هذه الذرة كسب إلكترون ذرة الهيدروجين ليصبح الفلور ايونا سالبا بينما يصبح الهيدروجين ايونا موجبا يطلق عليه بالبروتون الموجب ، وان الربط بين الايون السالب والبروتون الموجب يطلق عليه بالأصرة الهيدروجينية .



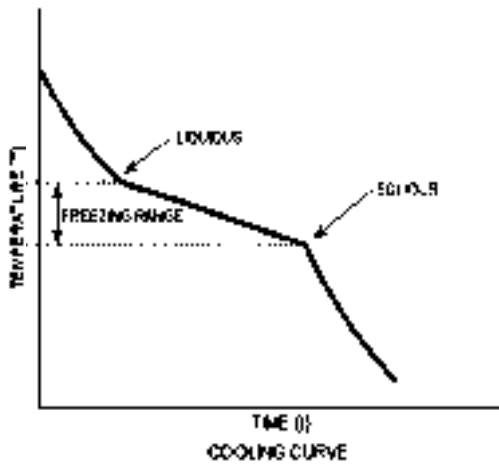
## Crystallization of Metals

## ❖ تبلور او تجمد المعادن

تمتاز المعادن النقية بصفات خاصة ثابتة تنفرد بها دون غيرها من العناصر المعدنية ومن هذه المميزات القابلية على السحب والطرق والتوصيل الجيد للحرارة والكهرباء .  
 عند خلط معدنيين او اكثر وتسخين الخليط الى درجة انصهاره و ثم اعاده تبريده يمكن الحصول على مادة جديدة ولها صفات معدنية تختلف عن تلك التي تكونت منها ويطلق على هذه المواد الجديدة بالسبائك *Alloys* .  
 وفي حالة تجمد المواد النقية وبما ان الذرات من نفس المعدن وتمتلك طاقة حركية متساوية على جميع الذرات فعليه فان تترتب ترتيب هندسي منتظم .



اما في حالة وجود اكثر من معدن ( سبيكة ) توجد في السبائك فرق في درجات الحرارة وذلك لان كل نوع من ذرات المعدن لها طاقة حركية تختلف عن الاخرى وكما موضح بالشكل



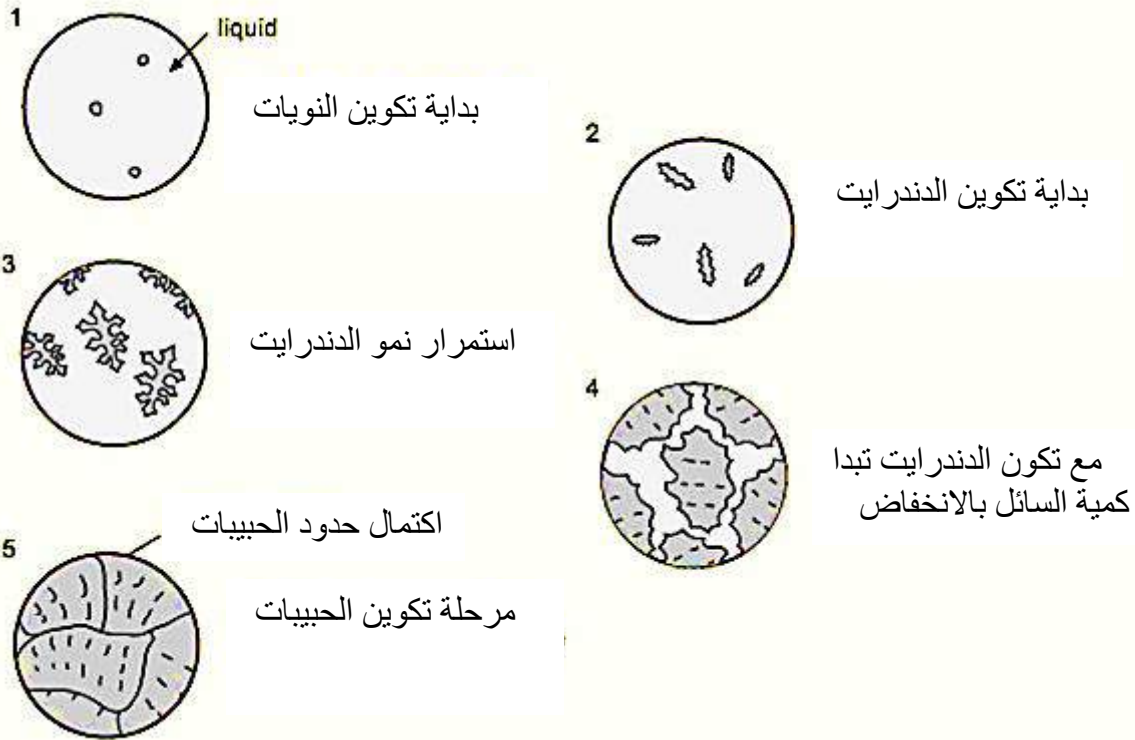
## ❖ مراحل تجمد ( تبلور ) المعادن النقية :-

يبدأ المعدن بالتبلور عندما تكون الطاقة الحركية للذرات مساوية للطاقة الكامنة , فتبدأ الذرات التي تكون طاقتها بالتمركز والاستقرار وتسمى النويات ومن ثم تبدأ مرحلة نمو الذرات بالاتجاهات الثلاثة وتكوين الوحدات البلورية ومن ثم تبدأ بالتشابك وتكوين الدندرايت وبعد تكون الدندرايت تتشابك وتكون الحبيبات والتي تمتاز بوجود فواصل بينها .  
 اما الذرات التي تمتلك طاقة حركية عالية فانها تبتعد عن الحبيبات ولكن عندما تصل الى نهاية التجمد فانها تتجمد على نهاية حدود الحبيبات اي الحدود الفاصلة بين الحبيبات .



### ملأحظات :-

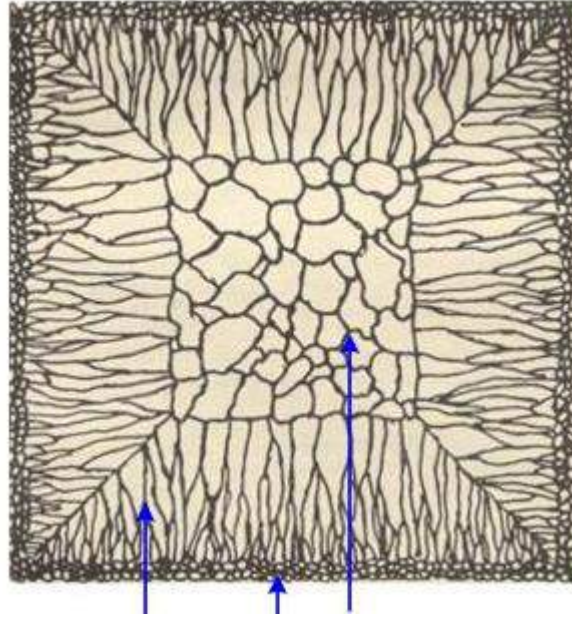
1. عدد النويات التي تتكون تعتمد اعتماداً كبيراً على سرعة التبريد وسرعة التبريد اي مقدار الطاقة وكلما تكون سرعة التبريد عالية فتتكون نويات كثيرة ( عددها كبير ) وبالتالي لا يوجد الوقت الكافي لاذرع الدندريات ان تنمو بالاتجاهات الثلاثة وبالتالي تتشابهك بسرعة وتتكون الحبيبات وعالية تكون النتيجة عدد الحبيبات كبير ولكن حجم الحبيبة الواحدة صغير .
2. اذا كانت سرعة التبريد بطيئة جداً يكون عدد النويات قليل وبالتالي وجود الوقت الكافي لاذرع الدندريات ان تتكون والنتيجة عدد الحبيبات قليل ولكن حجم الحبيبة الواحدة كبير .
3. عند اضافة الشوائب فانها تعمل كمراكز لتجمع النويات وعالية يكون عدد النويات كبير اي يؤدي الى الحصول على حبيبات صغيرة الحجم وكثيرة العدد اي ان اضافة الشوائب لة تأثير مشابه الى تأثير التبريد بالسرعات العالية .
4. ان الذرات في حدود الحبيبات تمتلك طاقة حركية عالية وذلك لانها غير مرتبة ترتيب هندسي منتظم وتكون مرتبطة من جهة واحدة ( حدود الشبكة البلورية ) ونتيجة الى الاختلاف في ترتيب الذرات في حدود الذرات عن مما هو عليه في الحبيبة مما يؤدي الى تباين في الخواص الميكانيكية .
5. حدود الحبيبات تكون اقوى من الحبيبات عند درجات الحرارة الواطئة على العكس مما هو عليه في درجات الحرارة المرتفعة مع ملاحظة ان الانصهار دائماً يبدأ عند حدود الحبيبات بدلاً من الحبيبة .
6. كلما تكون الحبيبات صغيرة الحجم تعطي صلادة اعلى في درجة حرارة الغرفة.
7. من هذا نستنتج ان خواص المعادن تعتمد الى حد كبير على كمية حدود الحبيبات وحجم الحبيبات وبهذا من الضروري السيطرة على حجم الحبيبات عند اجراء عمليات التشكيل والمعاملات الحرارية للمعادن والسبائك.



مراحل تجمد (تبلور) المعادن النقية وتكوين الدندرايت

## ❖ البنية البلورية للصبات :-

- (a) نلاحظ ان الذرات القريبة من سطح القالب سرعة تبريدها عالية اي انها ذرات صغيرة وكثيرة العدد.
- (b) كلما نتجة الى مركز الصبة يقل معدل التبريد اي ان  $\Delta T$  تختلف من منطقة الى اخرى وبالتالي يؤدي الى تكوين حبيبات طولية متجهة نحو المركز وذلك لاختلاف سرعة التبريد والذي يؤدي الى تكوين قوى جذب ( سحب ) الحبيبات باتجاه المركز.
- (c) درجة حرارة المركز ثابتة اي تكون مرتفعة وبالتالي تكون الحبيبات كبيرة ومتساوية .
- (d) نتيجة لوجود التباين بين الحبيبات من حيث الشكل والحجم مما يؤدي الى تباين في الخواص الميكانيكية من منطقة الى اخرى ولهذا السبب معظم الصبات تمتاز برداء في الخواص الميكانيكية .اي ان كل المعادن المصبوبة تمتاز بضعف في الخواص الميكانيكية .
- (e) يعتمد حجم الحبيبات وشكلها على حجم القالب.



حبيبات مركزية متساوية وكبيرة حبيبات ناعمة حبيبات طولية

### شكل يوضح البنية البلورية للصبات

- هنالك عوامل تؤثر في تحديد الحجم الحبيبي للمعادن المسبوكة والتي هي :-
- ❖ درجة الحرارة :- كلما ترتفع درجة الحرارة للمعدن المصبوب تكون المسبوكة الناتجة ضعيفة وتمتاز بضعف في الخواص الميكانيكية اما اذا كانت درجة حرارة الصب صحيحة فان السائل في مركز الصبة يتصلب مكونا حبيبات متساوية المحاور قبل ان تلتقي .
  - ❖ سمك المقطع :- ان سمك المقطع القليل يؤدي الى تكوين حجم حبيبي صغير وبالتالي يمكن الحصول على نوع واحد من الحبيبات .
  - ❖ نقاوہ المعدن المسبوك :- كلما كان المعدن اكثر نقاوہ كانت الحبيبات المتكونة كبيرة الحجم وقليلة العدد والسبب يعود الى ان النويات المتكونة قليلة وبالتالي وجود الوقت الكافي لكي تنمو النويات وتكون الدندرايت وعلية فالمسافة التي ينمو بها الدندرايت تكون كبيرة وحجم الحبيبة كبيرة.
  - ❖ اما اذا كانت المعادن غير نقية فان هذه الشوائب تعمل كمراكز لتجمع النويات وبالتالي يكون الحجم الحبيبي صغير .
  - ❖ سرعة الصب :- كلما تزداد سرعة الصب مما يؤدي الى انخفاض في معدلات التبريد فان ذلك يؤدي الى تكوين حبيبات كبيرة متمركزة في وسط الصبة .

## ❖ تشوية (تشكيل) المعادن :-

التشوية Deformation :- يعرف التشوية بانه التغيير الذي يحدث في ابعاد او حالة المادة تحت تأثير القوى المسلطة عليها وقد يكون مصدر هذه القوى خارجياً على هيئة قوى ميكانيكية او نتيجة لبعض العمليات الفيزيائية .

وتكون عملية التشوية على ثلاث مراحل :-

1. تشوية مرن Elastic Deformation
2. تشوية لدن plastic Deformation
3. الكسر Fracture

1. تشوية مرن Elastic Deformation :- وهو التشوية الذي يختفي حالما يزول تأثير القوى المسلطة ولأ سبب هذا التشوية اي تغيير في بنية المعدن اي لا يحصل اي تغيير في ابعاد الثوابت البلورية .

- معامل المرونة (معامل يونك) young's modulus :- هو النسبة بين الاجهاد على الانفعال ضمن حدود المرونة

$$\text{المرونة معامل} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

- كلما تزداد قوى التجاذب بين الذرات زادت قيمة معامل المرونة اي تزداد مرونة المعدن.
- كلما ترتفع درجة الحرارة يقل معامل المرونة.

2. تشوية لدن Plastic Deformation :- يحدث التشوية اللدن عادة في المعادن عندما يكون مقدار الاجهادات المسلطة اعلى من حد المرونة ويكون التشوية اللدن عادة مصحوب بازاحة ذرية في داخل البلورة تسبب تغييرا دائما في شكل العينة ويكون على نوعين :-

- الانزلاق Slip
- التوائم Twining

تحدث الانزلاقات حول مستويات بلورية معينة وفي اتجاهات معينة لذا فان الانزلاق ومقاومة الانزلاق يكونان ذات خواص اتجاهية وان المستويات المقفلة والتي يحدث فيها الانزلاق هي تلك المستويات التي تكون اكثر رسماً بالذرات اما الاتجاه فهي تلك المستويات الموازية للخطوط ذات الذرات الاكثر تقارباً.

- الممطولية Ductility :- كمية التشوية اللدن التي تحصل في المعدن .
- الصلادة Hardness :- هي مقاومة المعدن للتشوية اللدن .

## Slip Theory by Dislocation

## نظرية الانزلاق بالانخلاعات

في التفسير السابق لحدوث التشوهات اللدنة وهو عبارة عن انزلاق مستوى على اخر ولكن التفسير الحديث والذي تعتمد النظرية هو انزلاق مجموعة من الذرات فوق مجموعة اخرى وهو ما يسمى بالانخلاعة ( Dislocation ) وهو عبارة عن مجموعة من الذرات مزاحة بالنسبة الى بعضها البعض ويبدأ الانزلاق في نقطة معينة حيث توجد الانخلاعة وتتحرك الانخلاعة في مستوى ذري معين تحت تأثير الاجهاد القصي .

- كلما يزداد عدد الذرات المخلوعة تزداد مستويات الانزلاق وبالتالي تزداد الممتولية .
- كلما تزداد عدد الانخلاعات كلما تكون عملية التشوية اللدن اسهل .
- المعدن الخالي من الانخلاعات عملية تشوية صعبة وتكون له صلادة عالية .

### • انواع الانخلاعات

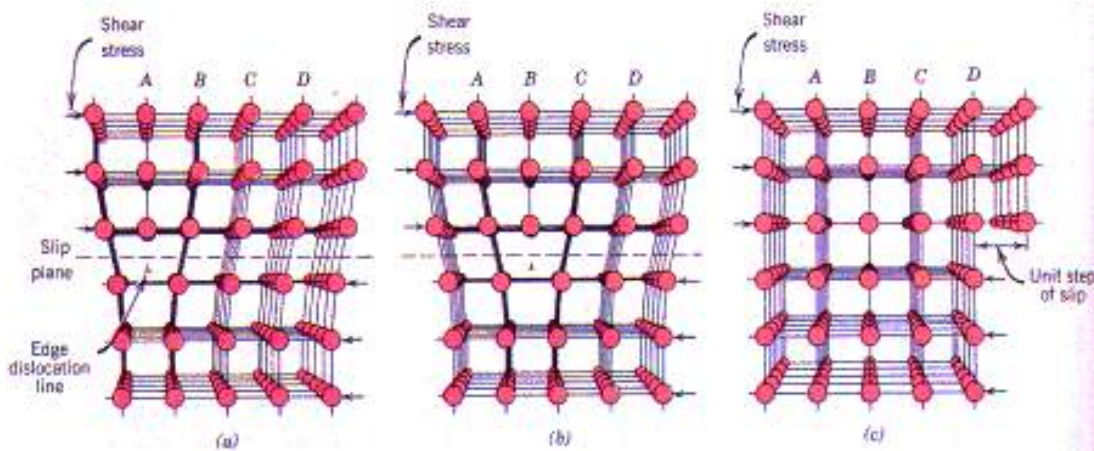
#### A. انخلاعة طرفية Edge Dislocation

ان هذا النوع من الانخلاعات تكون فيه الانخلاعة متعامدة مع اتجاه الانزلاق ولكن حركتها تكون موازية مع اتجاه الانزلاق ولكل انخلاعة مجال اجهادي خاص بها واعتماداً على شكل المجال تكون الانخلاعات موجبة او سالبة .

1. انخلاعة طرفية موجبة :- ويرمز لها بالرمز (  $+$  ) وفيها تكون الذرات الواقعة فوق مستوى الانزلاق متزاحمة وذلك لوجود عمود اضافي من الذرات في تلك المنطقة فتكون في حالة ضغط اما الذرات التي تكون تحت مستوى الانزلاق تكون في حالة شد وفي هذا النوع تتحرك من اليسار الى اليمين تحت تأثير الاجهاد القصي وتكون مستوى الذرات الزائد في هذا الجزء العلوي من البلورة.

2. انخلاعة طرفية سالبة :- ويرمز لها بالرمز ( T ) وفي هذا النوع من الانخلاعات تتحرك من اليمين الى اليسار ويوجد المستوى الزائد في الجزء السفلي من البلورة .

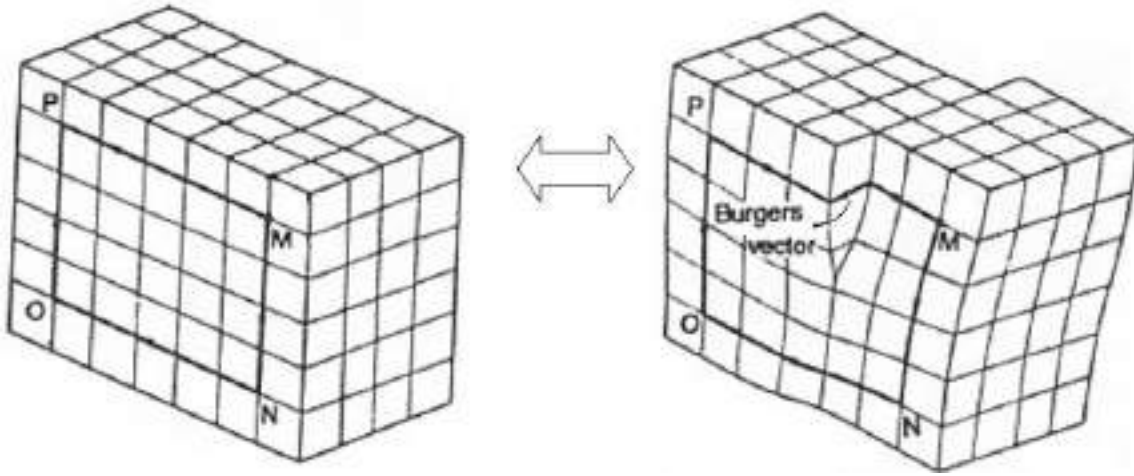
- ان الانخلاعات الطرفية ذات الاشارات المختلفة والتي تقع مراكزها في مستوى انزلاق واحد وتتحرك باتجاهات متعاكسة مقتربة من بعضها البعض فيتم ازالة الاجهاد ومجال الاجهاد وتصبح البلورة اكثر تناسقا من جراء هذا التلاقي ولهذا السبب تزداد مقاومة المعادن بعد التحام هذه الانخلاعات .
- تعتبر حدود الحبيبات حواجز لتجمع الانخلاعات وكذلك الشوائب ولهذا السبب عند تشوية المعادن تزداد المقاومة بسبب حركة الانخلاعات وتجمعها في منطقة العوائق ( حدود الحبيبات والشوائب ) .
- كلما تكون الحبيبات صغيرة تنصدم الانخلاعات بسرعة فتكون المقاومة للتشوية اكبر .



انخلاعة طرفية موجبة

**B. الانخلاعات اللولبية Screw Dislocation**

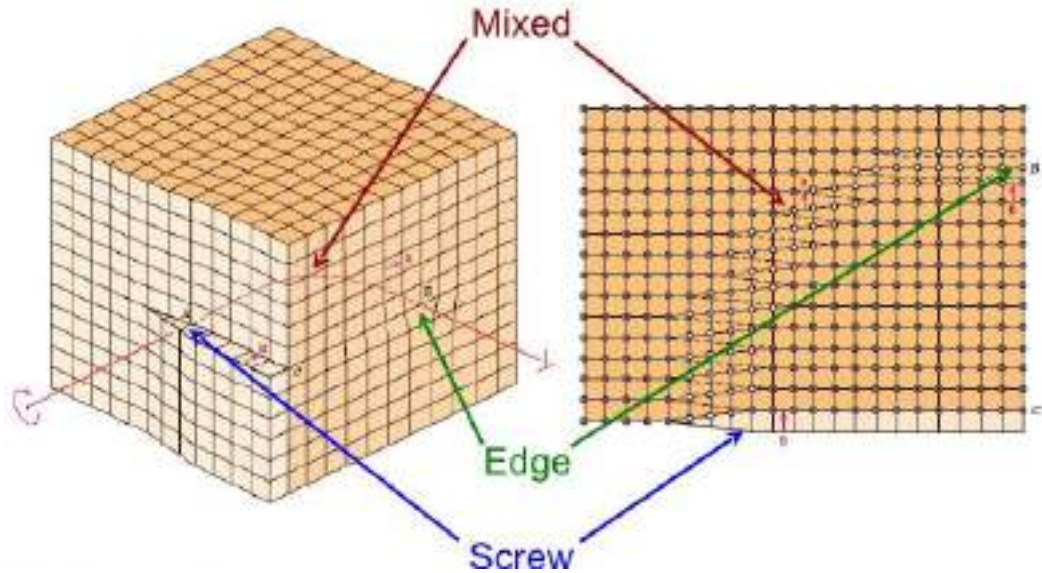
تسمى بالانخلاعات الحلزونية وفي هذا النوع من الانخلاعات يغطي مستوى الانزلاق جزء فقط وليس مقطع البلورة بالكامل. ان حركة الانخلاعات في هذا النوع تكون عمودية على اتجاه الانزلاق وكذلك فان سعة الانزلاق تزداد بحركة الانخلاعات.



**C. الانخلاعات المزدوجة Mixed Dislocation**

وهي الانخلاعات الطرفية واللولبية معا وكما موضح بالشكل

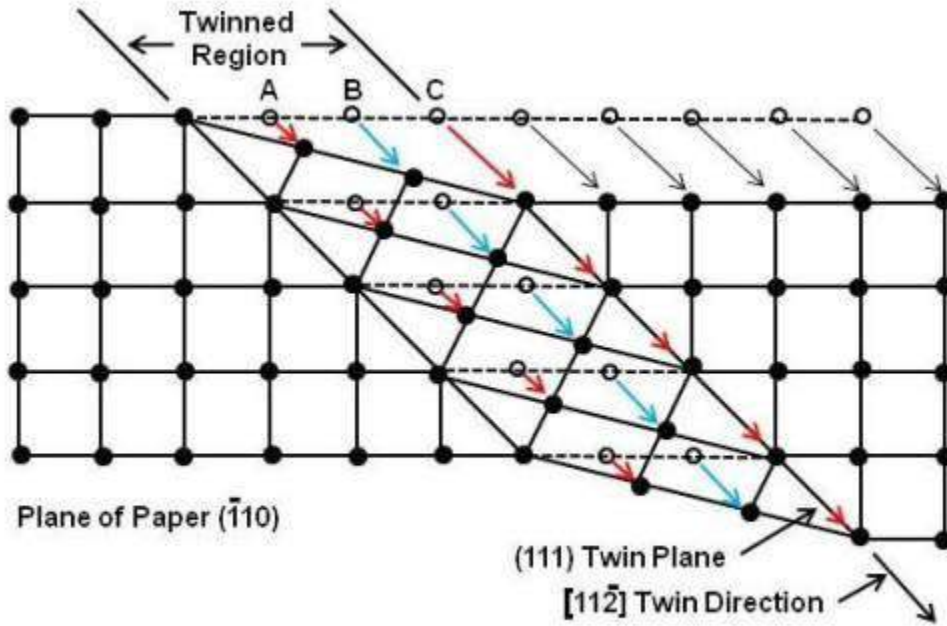
**Edge, Screw, and Mixed Dislocations**



## Deformation by twinning

## التشوية بواسطة التوائم

هنالك طريقة اخرى تتم بواسطتها ظاهرة التشوية اللدن في المعادن وهي حدوث التشوية بواسطة التوائم وكما موضح بالشكل ادناه والذي يبين كيفية حصول شريط التوائم عند تاثير القوة. ان اتجاة المستويات في شريط التوائم تختلف عن اتجاة المستويات في بقية اجزاء المعدن ويمكن الاستدلال على ذلك باستخدام عملية الاظهار ( etching ). تظهر التوائم عادة في بلورات المعدن من نوع F.C.C. بعد التشكيل على البارد وكذلك في B.C.C. و H.C.P. بصورة رئيسية .



Schematic Diagram of Twinning in an f.c.c. Lattice

## Cold Working

## عمليات التشكيل على البارد

يجري التشكيل على البارد في درجة حرارة الغرفة أو في درجة حرارة قريبة منها. وبصورة عامة فانه بالإمكان تشكيل المعادن على البارد في درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الغرفة ، حيث إن الحد الفاصل بين التشكيل على البارد والتشكيل على الساخن هو في درجة حرارة إعادة التبلور التي تكون ولمعظم المعادن أعلى من درجة حرارة الغرفة ، يتميز التشكيل على البارد بعدد من الميزات التي تؤهله للتنافس مع بقية عمليات التشكيل ، وهذه الميزات هي:-

- 1- يسبب التشكيل على البارد ارتفاعا في الخواص الميكانيكية مثل الصلادة ومقاومة الشد وانخفاضا في خواص أخرى مثل المطيلية .
- 2- تتميز المنتجات المشكلة على البارد بإنهاء سطحي ومظهر خارجي جيدين.
- 3- يمكن التحكم بصورة دقيقة في أبعاد ومقاسات المنتجات المشكلة على البارد ، لذلك فان التشكيل على البارد يستخدم كمرحلة نهائية لتشكيل المنتجات المشكلة على الساخن .

وبرغم ذلك يمتلك التشكيل على البارد عدد من المحددات التي يجب الانتباه لها في حالة استخدامه في التشكيل وهذه المحددات هي:-

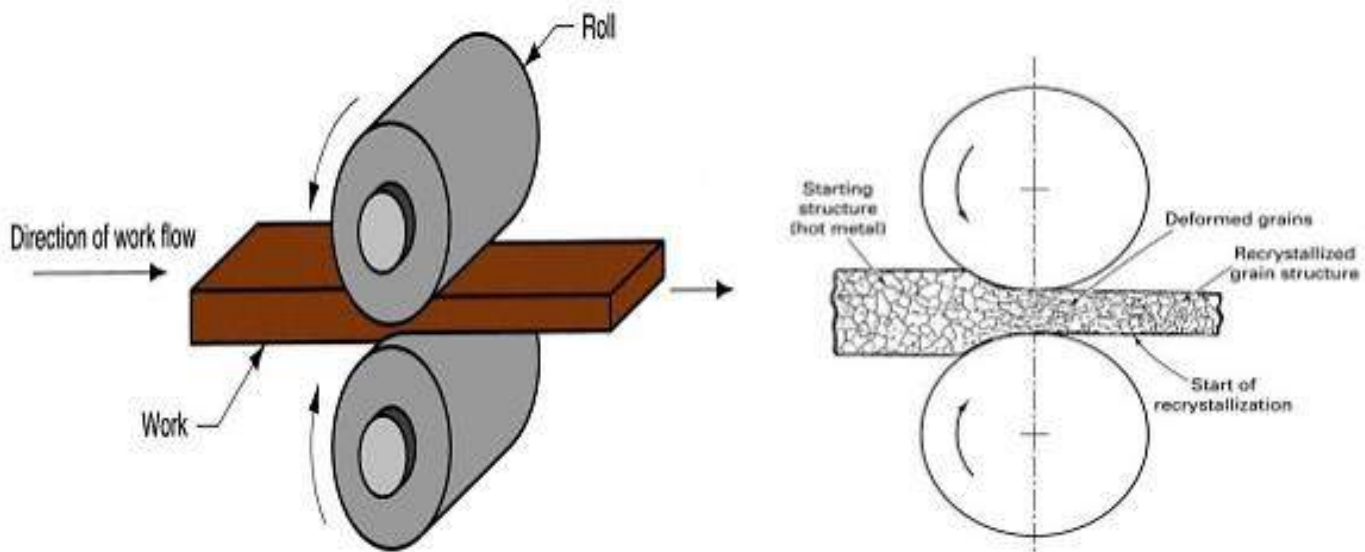
- 1- تعتبر متطلبات الطاقة العالية من أهم عيوب التشكيل على البارد ، بما يستوجب ذلك من استخدام المعدات والأجهزة المصنوعة من مواد معدنية عالية الكفاءة والمقاومة.
  - 2- مقدار التشكيل الذي يمكن انجازه تحت قوة أو جهد ثابت في التشكيل على البارد يكون اقل منه في التشكيل على الساخن تحت نفس الجهد.
  - 3- مطيلية المنتجات بعد تشكيلها على البارد.
- إن العمليات التي تتطلب شد أو سحب المعدن خلال القالب تكون دائماً عمليات تشكيل على البارد . وأنواع التشكيل على البارد كثيرة ولكن الأساسية والتي تستعمل في الصناعات المعدنية ومن أهمها

## Cold rolling

## الدرفلة على البارد

الدرفلة هي عملية تشكيل المعدن بين درافيل دوارة عن طريق ضغطه بينها من اجل الحصول على الشكل والحجم المطلوبين ، تتضمن عملية التشكيل هذه نقصان في سمك المعدن المشكل مع زيادة في طوله وعرضه. تستخدم الدرفلة للحصول على الألواح ، القضبان ، البكرات ، الأنابيب ، والأشرطة المعدنية وغيرها من المنتجات والأشكال. ومن المعادن التي من الممكن درفلتها على البارد هي النحاس أما الفولاذ فيتم درفلته على الساخن. إن عنف التشكيل البارد وارتفاع القوة المستعملة للتشكيل يستوجبان استعمال درافيل إسناد وتؤدي الدرفلة على البارد المهام التالية :-

- 1- ضبط الأبعاد والمقاسات إلى حد بعيد
- 2- تحسين المظهر الخارجي وإزالة الطبقات المتأكسدة
- 3- تحسين بعض الخواص الميكانيكية مثل الصلادة ومقاومة الشد



## التخمير وإعادة التبلور Annealing and Recrystallization

تحتوي المعادن المشكلة على البارد على كمية كبيرة من الأجهادات الداخلية ، حيث أن حوالي ( 9% ) من الطاقة الميكانيكية المستهلكة أثناء عملية التشكيل تستهلك في تكوين الأنخلاعات والتي بدورها تحتاج الى طاقة تُستهلك في تشوية البنية الداخلية للمعدن ، بالإضافة الى دفع الكثير من الذرات الى إتخاذ أوضاع غير مستقرة ( ذات طاقة عالية ) وعموماً فإن زيادة الطاقة الداخلية للمعدن المشكل على البارد تجعله نشطاً كيميائياً وبالتالي أقل مقاومة للتآكل ، إذ تعمل الأجهادات المايكروسكوبية ( *Micro Cracks* ) الموجودة على حدود الحبيبات على زيادة التآكل .

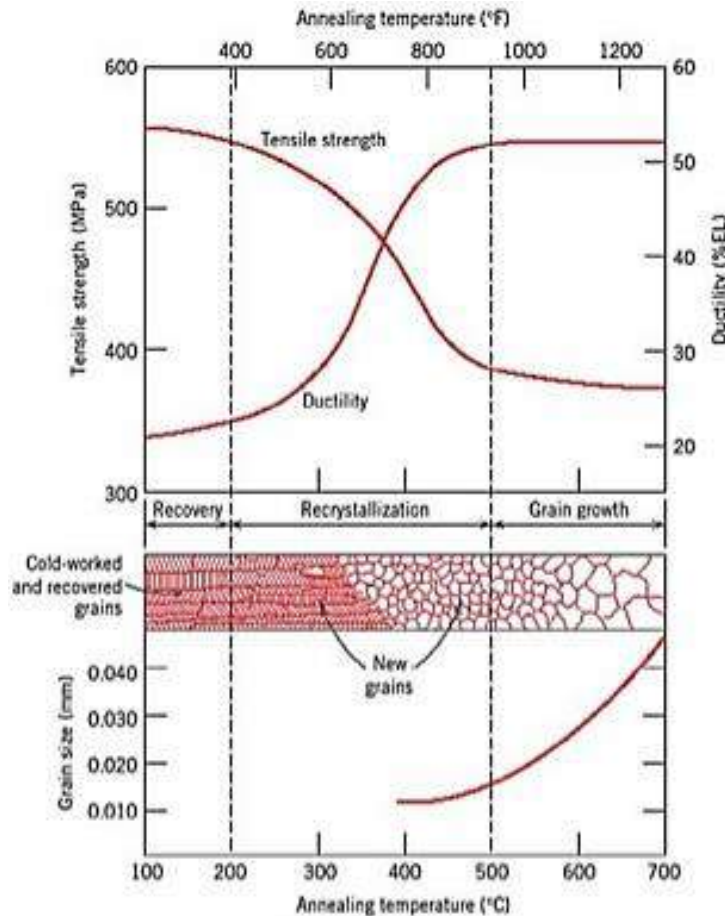
ولغرض التخلص من الأجهادات الداخلية المتكونة نتيجة لعمليات التشكيل على البارد للمعدن ، بالإضافة الى تحسين بعض الخواص الميكانيكية ، فإنه يجب إجراء عمليات تسخين ( تسخين ) للمعدن المشكل على البارد ، ويتم ذلك بواسطة عملية التخمير والتي تُعرف بأنها : إحدى العمليات الميكانيكية التي تستخدم في حالة الرغبة بالحصول على المعدن في حالة طرية وممتنة ، أو الرغبة في إجراء عمليات التشكيل على البارد مرة أخرى ، إذ أن تسخين المعدن الى درجة حرارة كافية يؤدي الى إزالة الأجهادات الداخلية المتكونة بسبب التشكيل على البارد ، وفي نفس الوقت تنخفض الصلادة وقوة الشد الى قيمتهما الأصلية التي كانت عليها قبل عملية التشكيل على البارد ، بالإضافة الى عودة قابلية المعدن للتشكيل على البارد .

### ملاحظة :

إن الباقي من الطاقة الميكانيكية المستهلكة فإنه يستهلك كما يلي ( 90% تتحول الى طاقة حرارية ، 1% لأيجاد توازن للأجهادات الداخلية المرنة المتبقية ) .

وتتم عملية التخمير على ثلاث مراحل هي :-

- 1 . المرحلة الأولى / مرحلة إزالة الأجهادات الداخلية
- 2 . المرحلة الثانية / مرحلة إعادة التبلور
- 3 . المرحلة الثالثة / مرحلة نمو الحبيبات





## 1. مرحلة إزالة الأجهادات الداخلية Stress Relief

تتم هذه العملية عند درجات حرارة منخفضة نسبياً تعتمد على نوع المعدن أو السبيكة ، حيث تتحرك أغلب الذرات التي تحتوي على طاقة عالية الى مواقع أكثر إستقرار داخل الشبكة البلورية للمعدن ، وتؤدي هذه التحركات الى إزالة الأجهادات الداخلية وبدون أي تأثير على شكل الحبيبات المشوه نتيجة التشكيل على البارد ، كما أن الصلادة وقوة الشد تبقى عند معدلها المرتفع بعد عمليات التشكيل على البارد وكما موضح بالرسم السابق ، وتعد هذه العملية ضرورية لتجنب تشققات التآكل الأجهادي ( *Stress Corrosion Cracking* ) خلال الأستخدام .

## 2. مرحلة إعادة التبلور Recrystallization

أثناء عملية التخمير وعند بلوغ درجة حرارة إعادة التبلور ( $T_{R}$ ) سوف تبدأ عملية تكوين (نشوء) نويات الحبيبات الجديدة على حدود الحبيبات المشوه بسبب التشكيل على البارد ، ومن ثم نموها داخل المعدن الذي سبق وأن شكل تشكياً على البارد ، وتكون هذه الحبيبات (الجديدة) ذات شبكة بلورية منقظمة (غير مشوهه) ، وبالتالي وعند الأنتهاء من هذه المرحلة نحصل على بنية ذات حبيبات متماثلة الأبعاد تختلف أبعادها إختلافاً جوهرياً عن الحبيبات القديمة ( المشوهه ) ، ولذلك سوف يحدث إنخفاض في الصلادة ومقاومة الشد القصوى وزيادة في المطيلية وكما موضح بالرسم السابق .

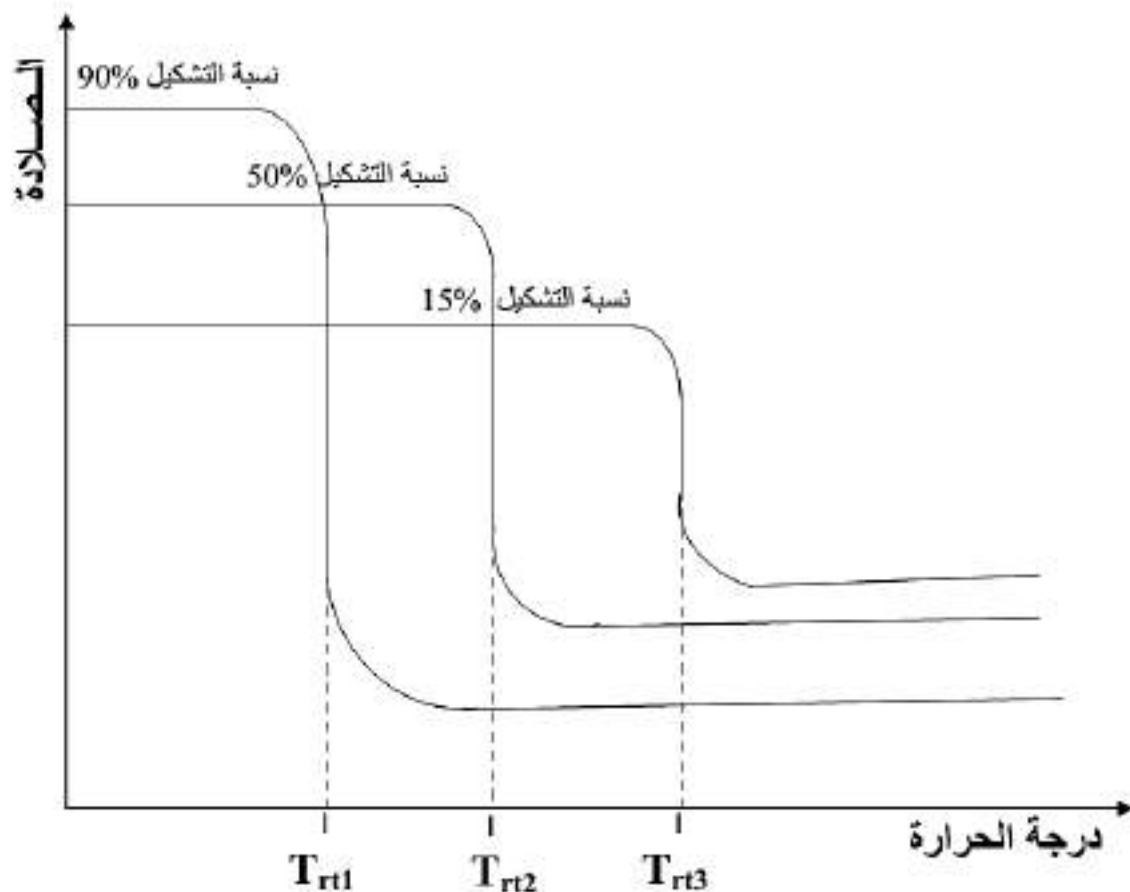
### ملاحظات :-

1. ان عملية إعادة التبلور تبدأ ببطء ثم تزداد الى ان يصل معدل التفاعل الى الحد الأقصى ثم تبطيء وتنتهي .
2. أن إنخفاض صلادة المعدن المشكلة على البارد بعد عملية إعادة التبلور يعود الى التناقص الحاد في كثافة الأنخلاعات ، حيث وجد أن كثافة الأنخلاعات في المشغولات المعدنية تنخفض بعد إعادة تبلورها من ( $10^{10} - 10^{12} / cm^2$ ) الى ( $10^6 - 10^8 / cm^2$ ) .

### العوامل التي تعتمد عليها درجة حرارة إعادة التبلور :-

#### أ. درجة التشكيل على البارد ( نسبة التشكيل على البارد ) Degree of Cold Working

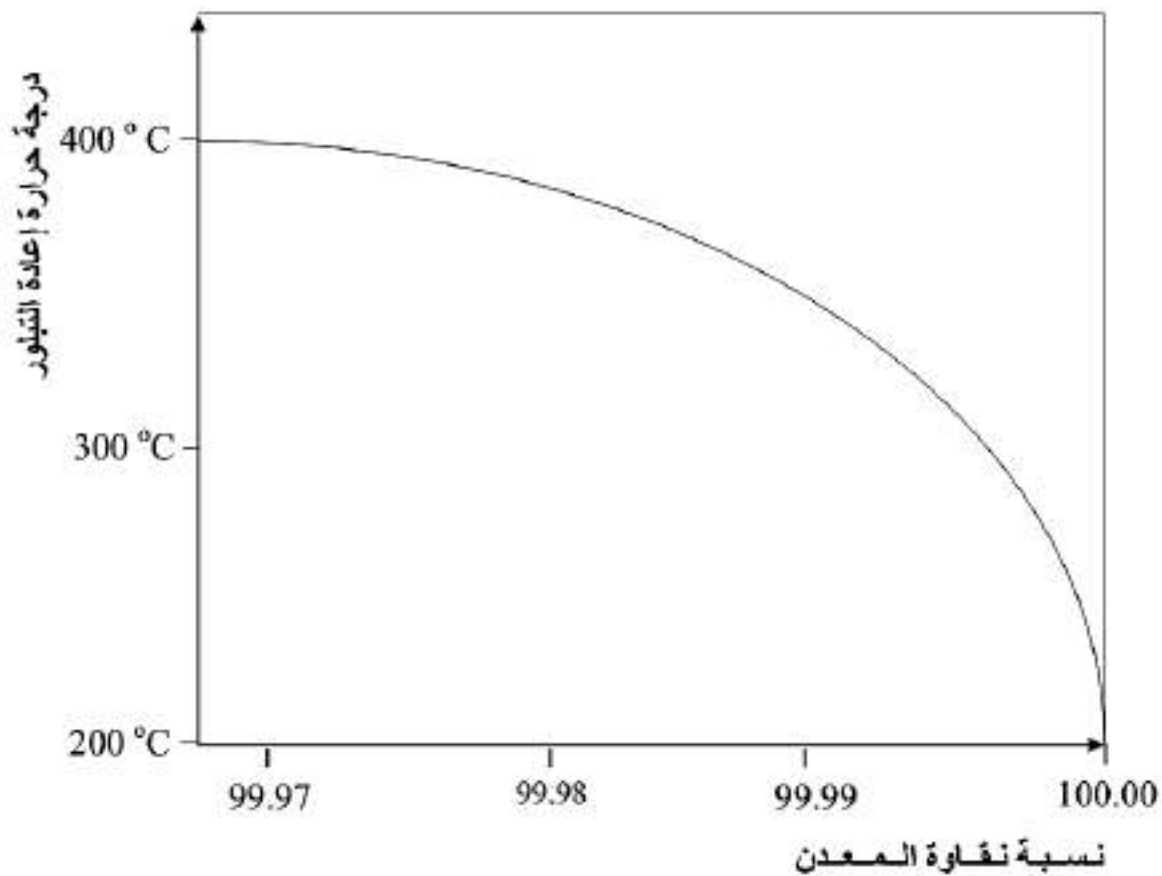
يلاحظ من الشكل أدناه ، أنه كلما إزدادت درجة ( نسبة ) التشكيل على البارد كلما إنخفضت درجة حرارة إعادة التبلور للمعدن ، الأمر الذي يعني عند تلدين عدد من العينات المشكلة بدرجات ( نسب ) تشكيل مختلفة عند نفس الدرجة الحرارية فسوف تعيد العينات المشكلة بنسبة تشكيل أكبر تبلورها أسرع ( قبل ) من تلك المشكلة بنسب تشكيل أقل ، وذلك بسبب أن طاقة التنشيط اللازمة لإعادة التبلور تقل مع زيادة درجة ( نسبة ) التشكيل على البارد ، وبالتالي نجد أن درجة حرارة إعادة التبلور تنخفض بزيادة درجة التشكيل على البارد وكذلك سوف يعيد المعدن تبلوره أسرع .



شكل يوضح تأثير نسبة ( درجة ) التشكيل على البارد على درجة حرارة إعادة التبلور

### ب. نقاوة المعدن ( أو إضافة عناصر أخرى ) ( Purity of Metal ( Addition of Other Elements )

بصورة عامة ، ترفع إضافة العناصر من درجة حرارة إعادة التبلور للمعادن المشكلة على البارد ، الأمر الذي يعني أن المعادن النقية تمتلك معدلات إعادة تبلور سريعة ( أي تعيد تبلورها أسرع ) ، فمثلاً يعيد النحاس النقي تبلوره عند درجة حرارة (  $200^{\circ}C$  ) بينما عند إضافة (  $25\% Sn$  ) سوف ترتفع درجة حرارة إعادة التبلور للسبيكة الى حوالي (  $375^{\circ}C$  ) ، ولهذا نجد أن السبائك تعيد تبلورها في درجات حرارة أعلى ( وكذلك بسرعة أبطىء ) من المعادن المكونة لها . أما السبب في هذا فيعود الى أن الذرات المذابة ( ذرات العنصر المذاب ) تترسب على حدود الحبيبات وبذلك سوف تقلل من عملية إنتقال الذرات عبر تلك الحدود الأمر الذي يؤدي الى إعاقة عملية تكوين نويات الحبيبات الجديدة ونموها وبالتالي إنخفاض معدل إعادة التبلور ( أي رفع درجة حرارة إعادة التبلور ) وكما موضح بالرسم أدناه .



شكل يوضح تأثير نقاوة المعدن على درجة حرارة إعادة التبلور للألمنيوم

### ج. زمن التخمير Annealing Time

أن زيادة زمن التخمير سوف يقلل من درجة حرارة إعادة التبلور .

### د. حجم الحبيبات الأولى ( حجم البلورات الأولى ) Initial Grain Size

أن عملية إعادة تبلور المعدن المشكل على البارد ذات الحبيبات الدقيقة الحجم تحدث أسرع مما عليه لنفس المعدن ذات الحبيبات الغليظة الحجم ، وذلك لأن المساحة السطحية لحدود الحبيبات في المعادن ذات البنية الدقيقة الحجم تكون أكبر من تلك التي تمتلكها المعادن ذات البنية الغليظة الحجم ، وهذا يعني أن زيادة عدد مواقع نشوء وتكوين الحبيبات الجديدة المنمثلة الأبعاد ، وكذلك لأن الطاقة الداخلية المخزونة داخل المعدن ذات البنية الدقيقة الحجم تكون أكبر من مثيلتها الموجودة في المعدن ذات الحبيبات الغليظة الحجم ، الأمر الذي يسرع من عملية إعادة التبلور .

### 3. مرحلة نمو الحبيبات Grain Growth

أن السبب الرئيسي لعملية نمو الحبيبات هو مقدار الطاقة السطحية التي تمتلكها حدود الحبيبات ، حيث أن عملية نمو الحبيبات يقلل من عدد حدود الحبيبات وبالتالي من الطاقة السطحية لتلك الحدود والتي تمثل حالة أكثر استقراراً بالنسبة للمعدن ، أي أن السبب الرئيسي لنمو حبيبات المعادن عند استمرار عملية التسخين إلى ما بعد عملية إعادة التبلور أثناء عملية التلدين هو ميل المعدن إلى تقليل الطاقة السطحية لحدود الحبيبات لأنها تمثل حالة أكثر استقراراً ، ويتم ذلك من خلال تقليل المساحة السطحية لحدود الحبيبات من خلال تقليل عددها .

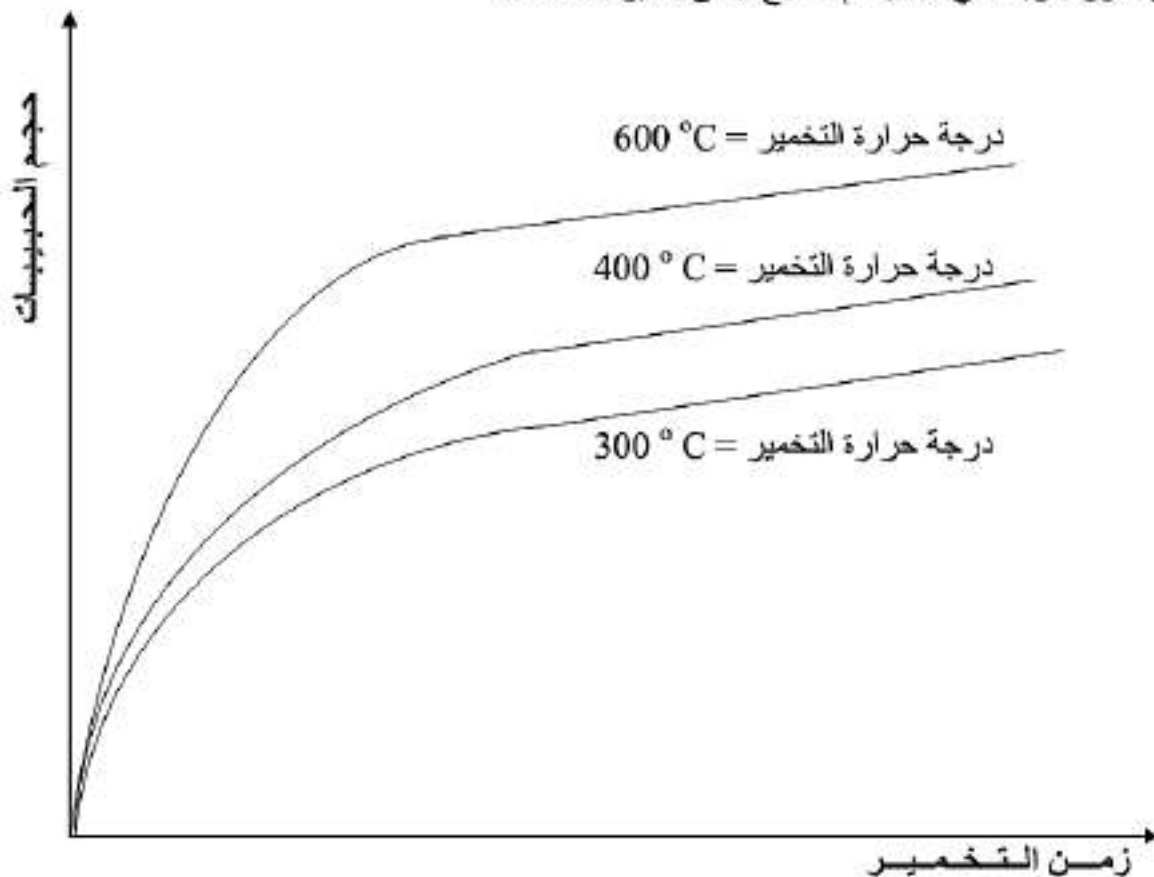
ملاحظة :-

تتم عملية نمو الحبيبات من خلال إنتقال الذرات من حبيبة إلى أخرى ، حيث أن الذرات القريبة من حدود الحبيبات في الجهة المقعرة تكون مترابطة بعضها مع البعض الآخر بشكل أقوى من الذرات الموجودة أو القريبة من نفس الحدود في الجهة المحدبة ، وذلك لأن الذرات في الجهة المقعرة تكون متقاربة أكثر مما عليه في الجهة المحدبة ، ولهذا نجد أن الذرات سوف تنتقل من الجهة المحدبة إلى الجهة المقعرة ( أي أن حدود الحبيبات تميل إلى التحرك باتجاه مركز إحداثها بهدف تقليل ( تقصير ) طولها ) .

العوامل التي تؤثر على عملية نمو الحبيبات :-

#### 1. درجة الحرارة وزمن التخمير Annealing Temperature and Time

أن ارتفاع درجة حرارة وزمن التخمير يؤدي إلى زيادة حجم الحبيبات وكما موضح بالرسم أدناه ، كما يلاحظ أن عملية النمو الحبيبي تكون سريعة في البداية ثم تصبح أبطى بكثير بعد ذلك .



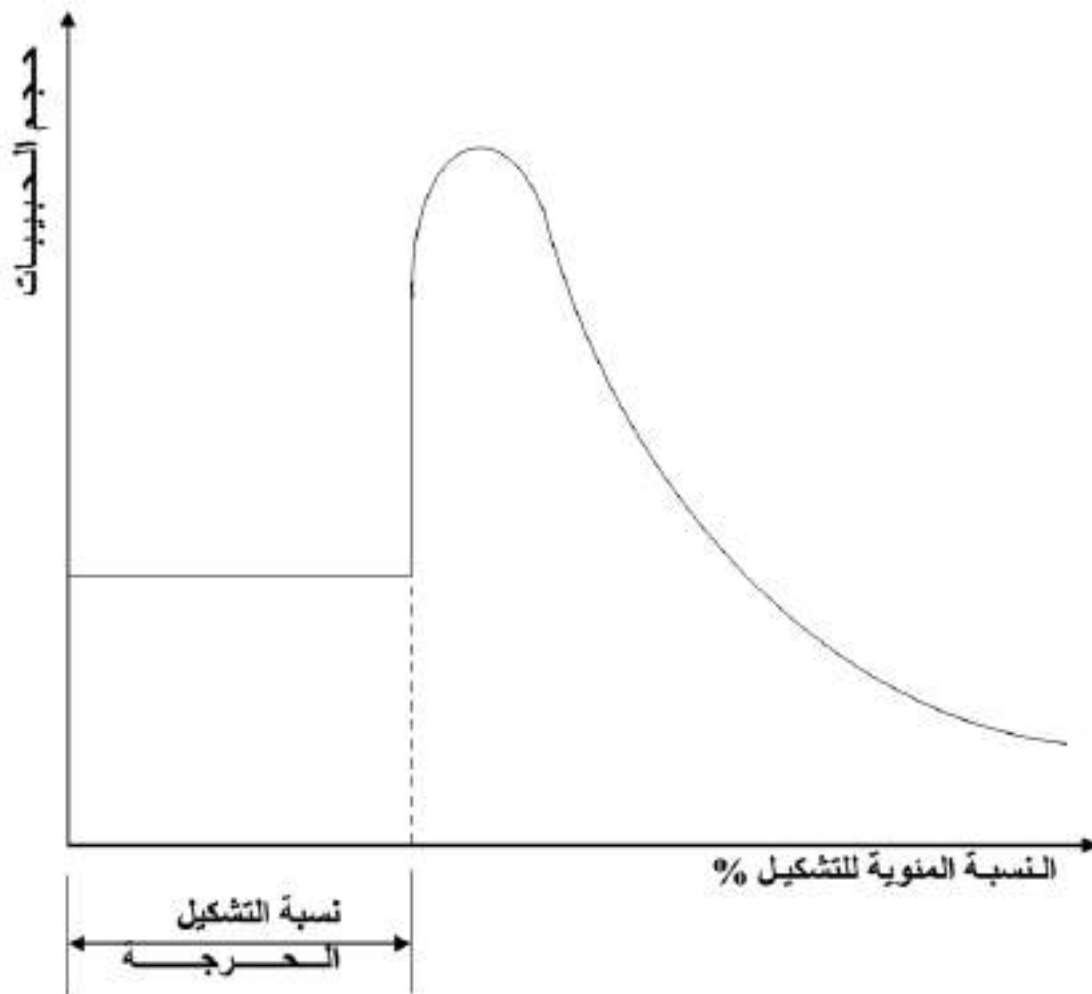
شكل يوضح تأثير درجة حرارة وزمن التخمير على حجم الحبيبات

## 2. وجود الشوائب الغير قابلة للذوبان Presence of Insoluble Impurities

أن وجود الشوائب الغير قابلة للذوبان في المعادن بصورة عامة يعيق من عملية نمو الحبيبات ، وذلك لأن تلك الشوائب تترسب على حدود الحبيبات وبالتالي سوف تعيق عملية أنتشار وانتقال الذرات عبر تلك الحدود والتي تعد مهمة لعملية نمو الحبيبات .

## 3. درجة ( نسبة ) التشكيل على البارد Degree of Cold Working

بصورة عامة ، كلما ازدادت درجة ( نسبة ) التشكيل على البارد كلما صغر ( قل ) حجم الحبيبات بعد اكمال عملية إعادة التبلور ، ويطلق على أقل نسبة تشكيل يمكن أن تؤدي الى عملية إعادة التبلور وبالتالي الحصول على حجم حبيبي أكبر بـ ( نسبة التشكيل الحرجة *Critical cold Working* ) وكما موضح بالرسم أدناه .



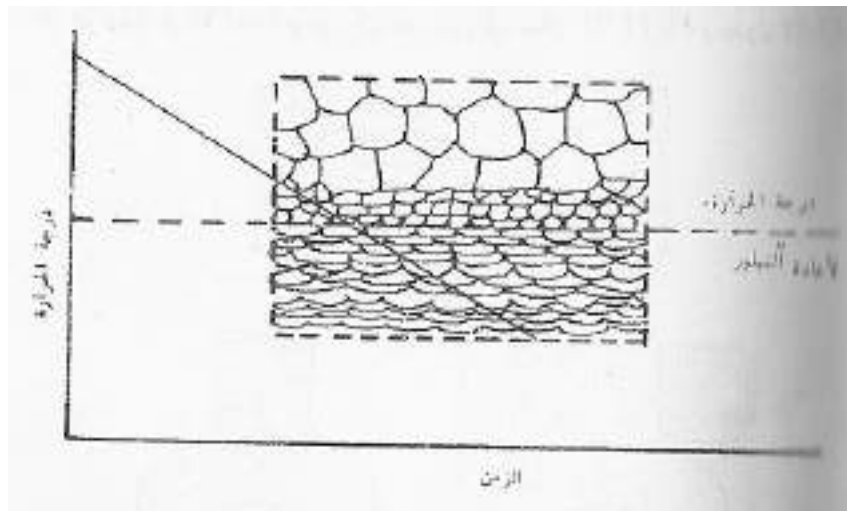
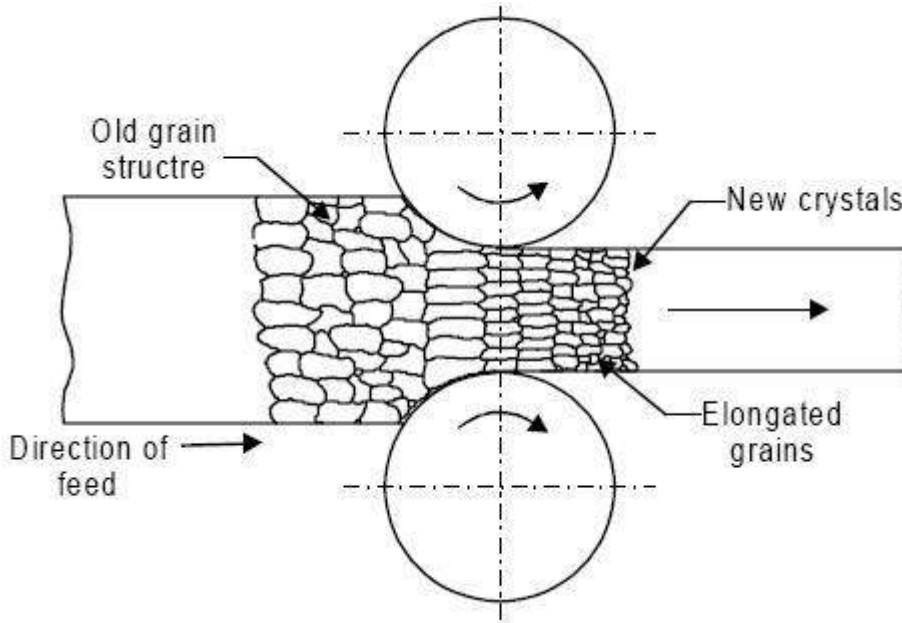
شكل يوضح تأثير نسبة ( درجة ) التشكيل على البارد على حجم الحبيبات

## التشكيل على الساخن Hot Working

عبارة عن عمليات تشكيل المعادن التي تجري في درجات حرارة أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور بقليل ، حيث يؤدي ذلك الى إعادة تبلور الحبيبات المشكلة سابقاً ، وينتج عنه زيادة في صلادة المعدن لكن أثر هذه الزيادة سوف يزول تماماً أو جزئياً أثناء عملية تبريد المعدن بعد إتمام عملية التشكيل على الساخن .

### ملاحظة مهمة

أن عمليات التشكيل على الساخن يجب أن تتم ( تنجز ) في درجة حرارة أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور مباشرة بحيث يمكن الحصول على حجم حبيبي صغير ، وكما موضح بالرسم أدناه ، ويطلق على هذه الدرجة الحرارية التي يجب أن يتم عندها إنجاز عملية التشكيل على الساخن بـ ( درجة حرارة الأنجاز *Finishing Temperature* ) ، فإذا كانت هذه الدرجة الحرارية أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور بكثير ، فإن نمواً في الحبيبات قد يحدث وبالتالي سوف نحصل على بنية غليظة الحجم ، أما إذا كانت درجة حرارة الأنجاز أقل من درجة حرارة إعادة التبلور ، فإن المعدن سوف يتصلد بالتشكيل (*Work Hardening*) أي سوف تحدث عملية تشكيل على البارد .



## 2- عمليات التشكيل على البارد Cold forming

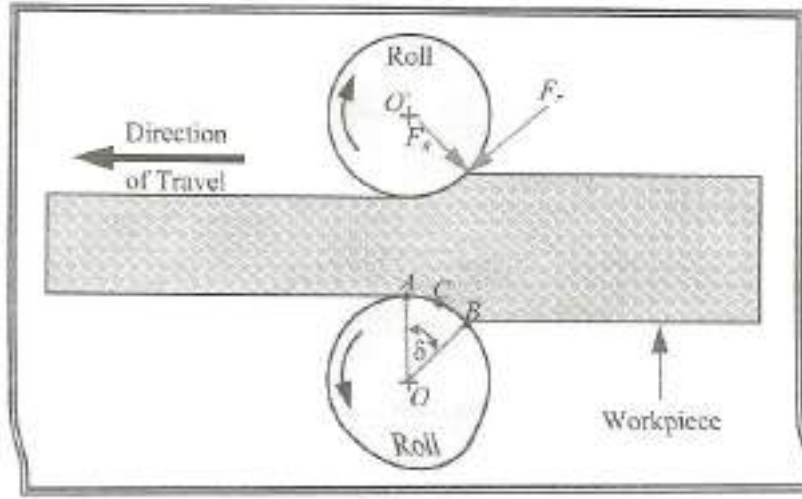
يجري التشكيل على البارد في درجة حرارة الغرفة أو في درجة حرارة قريبة منها. وبصورة عامة فإنه بالإمكان تشكيل المعادن على البارد في درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الغرفة ، حيث إن الحد الفاصل بين التشكيل على البارد والتشكيل على الساخن هو في درجة حرارة إعادة التبلور التي تكون ولمعظم المعادن أعلى من درجة حرارة الغرفة ، يتميز التشكيل على البارد بعدد من الميزات التي تؤهله للتنافس مع بقية عمليات التشكيل ، وهذه الميزات هي:-

- 1- يسبب التشكيل على البارد ارتفاعا في الخواص الميكانيكية مثل الصلادة ومقاومة الشد وانخفاضا في خواص أخرى مثل المطيلية .
  - 2- تتميز المنتجات المشكلة على البارد بإنهاء سطحي ومظهر خارجي جيدين.
  - 3- يمكن التحكم بصورة دقيقة في أبعاد ومقاسات المنتجات المشكلة على البارد ، لذلك فإن التشكيل على البارد يستخدم كمرحلة نهائية لتشكيل المنتجات المشكلة على الساخن .
- وبرغم ذلك يمتلك التشكيل على البارد عدد من المحددات التي يجب الانتباه لها في حالة استخدامه في التشكيل وهذه المحددات هي:-
- 1- تعتبر متطلبات الطاقة العالية من أهم عيوب التشكيل على البارد ، بما يستوجب ذلك من استخدام المعدات والأجهزة المصنوعة من مواد معدنية عالية الكفاءة والمقاومة.
  - 2- مقدار التشكيل الذي يمكن انجازه تحت قوة أو جهد ثابت في التشكيل على البارد يكون اقل منه في التشكيل على الساخن تحت نفس الجهد.
  - 3- مطيلية المنتجات بعد تشكيلها على البارد.
- إن العمليات التي تتطلب شد أو سحب المعدن خلال القالب تكون دائما عمليات تشكيل على البارد . وأنواع التشكيل على البارد كثيرة ولكن الأساسية والتي تستعمل في الصناعات المعدنية هي مايلي :-

### 1- الدرفلة على البارد Cold rolling

الدرفلة هي عملية تشكيل المعدن بين درافيل دوارة عن طريق ضغطه بينها من اجل الحصول على الشكل والحجم المطلوبين ، تتضمن عملية التشكيل هذه نقصان في سمك المعدن المشكل مع زيادة في طوله وعرضه. تستخدم الدرفلة للحصول على الألواح ، القضبان ، البكرات ، الأنابيب ، والأشرطة المعدنية وغيرها من المنتجات والأشكال. ومن المعادن التي من الممكن درفلتها على البارد هي النحاس أما الفولاذ فيتم درفلته على الساخن. إن عنف التشكيل البارد وارتفاع القوة المستعملة للتشكيل يستوجبان استعمال درافيل إسناد وتؤدي الدرفلة على البارد المهام التالية :-

- 1- ضبط الأبعاد والمقاسات إلى حد بعيد
  - 2- تحسين المظهر الخارجي وإزالة الطبقات المتأكسدة
  - 3- تحسين بعض الخواص الميكانيكية مثل الصلادة ومقاومة الشد
- وتعتبر س المعدنية الرقيقة جدا سمك (0.002mm) من أهم منتجات هذه الطريقة.



شكل (1) عملية الدرفلة.

هنالك خواص مهمة يجب توفرها في المعادن التي يتم درفلتها واهم هذه الخواص هي قابلية المعدن للانسياب نتيجة الضغط المسلط عليه وبدون أن ينكسر كذلك يجب أن تكون له قوة تحمل كبيرة حتى لايفشل تحت الضغط. ويمكن حساب مقدار زاوية الاتصال ( $\delta$ ) بين الدرفيل والمعدن المشكل من المعادلة التالية:

$$\sin \delta = 1 - \frac{h_o - h_f}{D}$$

حيث إن :

- $h_o$  = سمك الشغلة قبل الدرفلة (mm).
- $h_f$  = سمك الشغلة بعد الدرفلة (mm).
- $D$  = قطر الدرفيل (mm).

إن مقدار الدرفلة (الانضغاط في المعدن) يزداد بزيادة قطر الدرفيل ونتيجة لهذه العملية يزداد عرض وطول الشغلة ويقل سمكها. تسمى نسبة طول الشغلة بعد الدرفلة إلى طول الشغلة قبل الدرفلة بمعامل الاستطالة ( $K$ ) والذي يمكن حسابه من المعادلة التالية:-

$$K = \frac{I}{L} = \frac{F}{f}$$

حيث إن :

- $I$  = طول الشغلة بعد الدرفلة (mm).
- $L$  = طول الشغلة قبل الدرفلة (mm).
- $F$  = مساحة مقطع الشغلة قبل الدرفلة ( $mm^2$ ).
- $f$  = مساحة مقطع الشغلة بعد الدرفلة ( $mm^2$ ).



## 2- عمليات السحب على البارد Cold drawing

تتم هذه العمليات على البارد وتتضمن تشكيل القضبان المعدنية كبيرة القطر نسبياً إلى الأسلاك وكذلك تشكيل الصفائح المعدنية إلى أوعية بواسطة السحب العميق. وتعتبر المطيلية العالية نسبياً من أهم خواص المواد المعدنية التي تؤهلها لعمليات التشكيل بالسحب على البارد. يسمى السحب على البارد في بعض الأحيان بضبط الأبعاد نظراً لدقته العالية بالأبعاد وجودة السطح المنتج بعد السحب.

هنالك عدد من الميزات التي تتفرد بها عملية السحب على البارد وهي:-

- 1- إمكانية الحصول على منتجات ذات دقة عالية في أبعاد المقطع العرضي وسطح ذو جودة عالية.
- 2- يمكن استخدام السحب لتشكيل الأعمدة المجوفة وغير المجوفة والتي لا يمكن تشكيلها بالطرق الأخرى.
- 3- يحقق المزج بين عملية التشكيل على البارد والمعاملة الحرارية لإكساب المعدن خواص ميكانيكية عالية.
- 4- عدم فقدان جزء من المعدن على هيئة رايش مثلما يحدث في عمليات القطع وبعض عمليات التشكيل.
- 5- يعتبر السحب على البارد عملية إنتاجية وأقل صعوبة في التنفيذ من باقي الطرق.

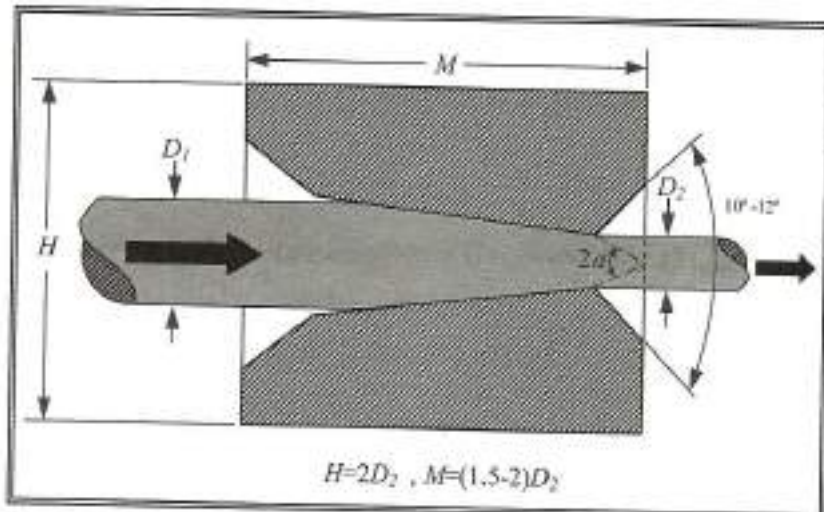
تصنف عمليات السحب على البارد إلى نوعين أساسيين هما:

### 1- سحب الأسلاك Wire Drawing

تصنع الأسلاك بالسحب على البارد من قضبان مصنوعة بواسطة الدرفلة على الساخن ، وذلك بإمرار هذه القضبان من فتحات قوالب خاصة تعمل على تخفيض قطرها وزيادة طولها على عدة مراحل إلى أن تتحول إلى أسلاك بالأقطار المطلوبة. وقبل عملية السحب من الضروري تنظيف القضبان من طبقات الاوكسيد السطحية بمعاملتها ببعض الحوامض وتستعمل عادة بعض مواد التزييت لتسهيل عملية السحب نظراً لزيادة الصلادة نتيجة السحب على البارد. فان مقاومة المعدن للتشكيل سوف تزداد وعند تعذر الاستمرار في التشكيل تجري العملية على مرحلتين :-

1- السحب إلى أدنى قطر ممكن 2- التسخين أو التخمير لغرض تليين القطعة ومن ثم الاستمرار في

السحب وقد يتكرر تسخين المعدن عدة مرات إلى أن يتم الحصول على القطر المطلوب. القوالب المستعملة تصنع عادة من مواد معدنية تمتاز بصلادتها ومقاومتها العالية وأكثرها استعمالاً هو كار بيد التنتكستن وقد تستعمل أيضاً قوالب من الماس لبعض الأغراض الخاصة. وتستعمل هذه العملية بشكل واسع لسحب الأسلاك من النحاس والألمنيوم والصلب.



شكل (2) عملية سحب الأسلاك

ويمكن حساب إجهاد السحب من المعادلة التالية:

$$\sigma = Y \left[ 1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right] \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^{\mu \cot \alpha} \right]$$

حيث:

- $\sigma$  = إجهاد السحب (N/mm<sup>2</sup>).
- $Y$  = إجهاد الخضوع (N/mm<sup>2</sup>).
- $\alpha$  = زاوية نصف القالب.
- $\mu$  = معامل الاحتكاك.
- $A_2$  = المساحة بعد السحب (mm<sup>2</sup>).
- $A_1$  = المساحة قبل السحب (mm<sup>2</sup>).

ويتم حساب زاوية نصف القالب من المعادلة التالية:

$$\sin \alpha = \frac{D_1 - D_2}{2(0.9)D_2}$$

حيث:

- $D_1$  = القطر قبل السحب (mm).
- $D_2$  = القطر بعد السحب (mm).

كذلك يمكن حساب قوة السحب من المعادلة التالية:

$$F = A_2 \times \sigma$$

## ب- السحب العميق Deep Drawing

وهي عبارة عن تشكيل لوح معدني بسمك معين بواسطة مكبس دائري المقطع غالبا يضغط على اللوح ويكبسه داخل قالب دائري المقطع أيضا والشكل الناتج يكون عبارة عن وعاء بسمك يساوي الفرق بين قطر المكبس والقطر الداخلي للقالب .

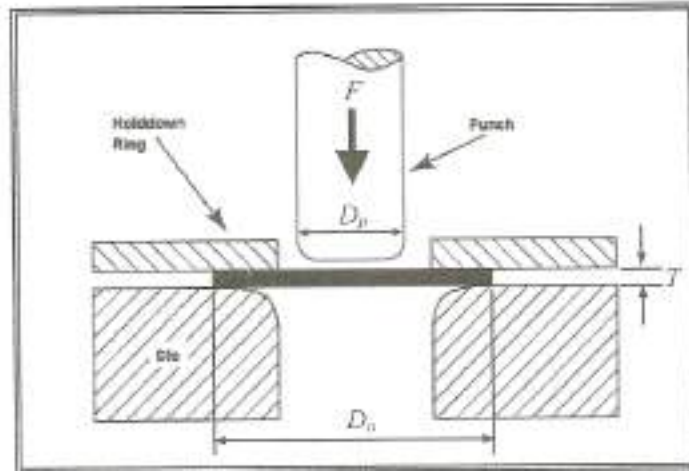
- وللقيام بعملية السحب العميق بنجاح وإنتاج منتجات خالية من العيوب لابد من توفر العوامل التالية :-
- 1- مطيلية ومقاومة شد المعادن المراد سحبها يجب أن تكون عالية .
- 2- المكبس والقالب المستعمل يجب أن يمتازا بسطوح ذات نعومة عالية وانجاز سطحي جيد .
- 3- استعمال مواد لتزييت القالب والمكبس يسهل عملية التشكيل ويقلل من القوى الضرورية للتشكيل .

ويمكن حساب القوة اللازمة للمكبس في السحب العميق من المعادلة التالية:

$$F_{max} = \pi \times D_p \times T \left[ \left( \frac{D_o}{D_p} \right) - 0.7 \right]$$

حيث إن:  
 $D_p$  = قطر المكبس (mm).  
 $T$  = سمك الشغلة (mm).  
 $D_o$  = قطر الشغلة (mm).

وبالإمكان إنتاج أوعية ذات أعماق كبيرة وذلك بإجراء العملية على عدة مراحل كما في عملية سحب الأسلاك فيصاغ أولاً إلى التشكيل إلى عمق معين على البارد ثم يسخن الوعاء الناتج فتزداد ليونته ويتقبل مقدار إضافياً من التشكيل فيجري سحبه مرة أخرى وقد تتكرر عملية السحب والتسخين عدة مرات إلى حين تحقيق العمق المطلوب وتستعمل عملية السحب العميق بشكل واسع لإنتاج أغلفة أو ظروف القدائف وهياكل السيارات وهياكل الثلجات واسطوانات الغاز السائل وأحواض الغسل والاستحمام المنزلية .



شكل (3) عملية السحب العميق

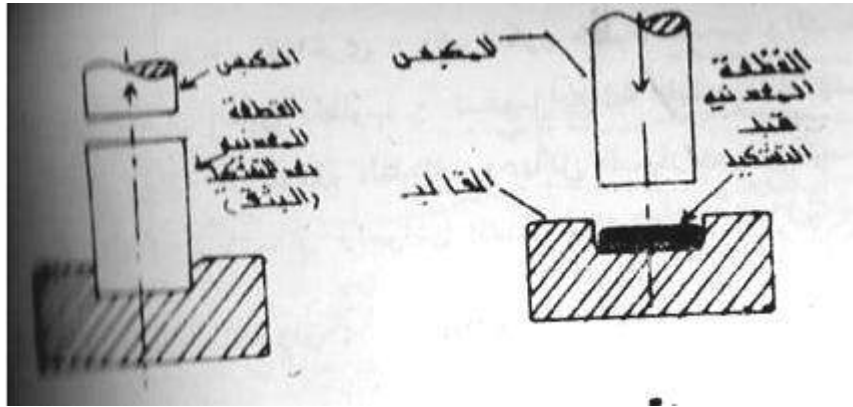
### 3- التشكيل البارد بالدوران Cold spinning

هذه العملية تشبه التشكيل الساخن بالدوران وتستعمل كذلك أجهزة مشابهة وتختلف الطريقتان في إن التشكيل البارد بالدوران يستعمل لإنتاج المنتجات الأصغر حجماً بكثير كما إن المعادن المستعملة تمتاز بارتفاع لدونتها في درجة حرارة الغرفة وتمتاز منتجات هذه الطريقة بارتفاع صلابتها نسبياً وإمكانية الحصول على أبعاد ومقاسات دقيقة إلى حد بعيد نتيجة كون التشكيل يجري على البارد بالدوران هي الألمنيوم والنحاس وسبائكها وتستعمل الطريقة أحياناً لتشكيل الصلب الكربوني واطى الكربون وتستخدم هذه الطريقة بنجاح لتشكيل أدوات وأواني الطبخ والمزهريات والأجهزة العاكسة للضوء .

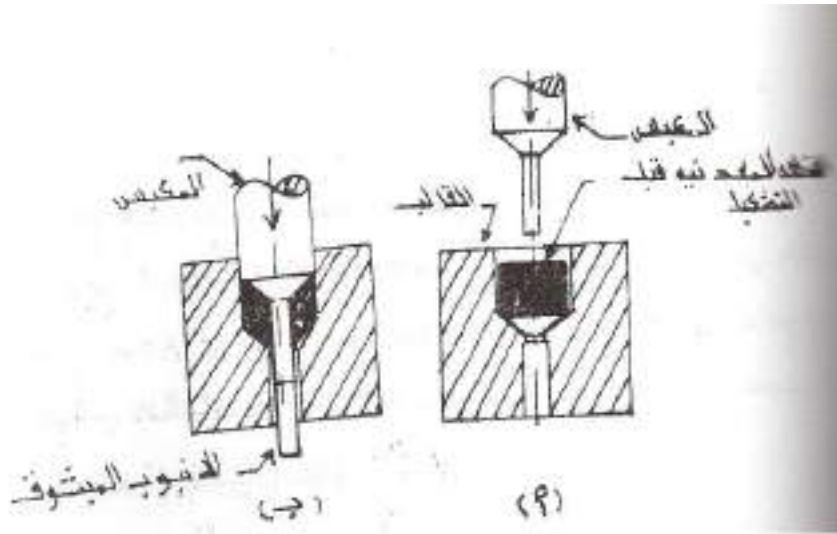
#### 4-البثق على البارد (البثق الصدمي) Cold Impact Extrusion

تتلخص عملية البثق الصدمي لتشكيل كتلة معدنية على شكل قرص موضوع داخل قالب ضحل العمق بواسطة مكبس يتم إسقاطه على القرص بقوة كبيرة نسبيا . ينساب معدن القرص محيطا بالمكبس وبتخذ شكله ويتم التشكيل بصدمة واحدة .

وتستعمل هذه الطريقة لتشكيل المعادن اللينة مثل الرصاص والألمنيوم والقصدير والنحاس وتستخدم هذه الطريقة لتشكيل بعض المعادن على الساخن كما هي الحال مع الخارصين الذي يتم بثقه صدميا بعد التسخين إلى حوالي (140-180°C) وتستعمل هذه الطريقة بشكل واسع لإنتاج الأنابيب أو العلب الرقيقة الجدران نسبيا وبأطوال تصل إلى حوالي 300mm وأفطار تتراوح بين (10-120)mm ومن منتجات البثق الصدمي علب معاجين الأسنان وأغلفة القذائف والاطلاقات النارية الصغيرة وعلب العقاقير الطبية وتمتاز عملية البثق الصدمي بالإنتاجية العالية والكفاءة والشكل رقم (4) يستعمل لصناعة العلب أو الأنابيب المغلفة من إحدى نهايتيها أما الشكل (5) فيمثل الجهاز المستعمل لصناعة الأنابيب المفتوحة النهائيين .



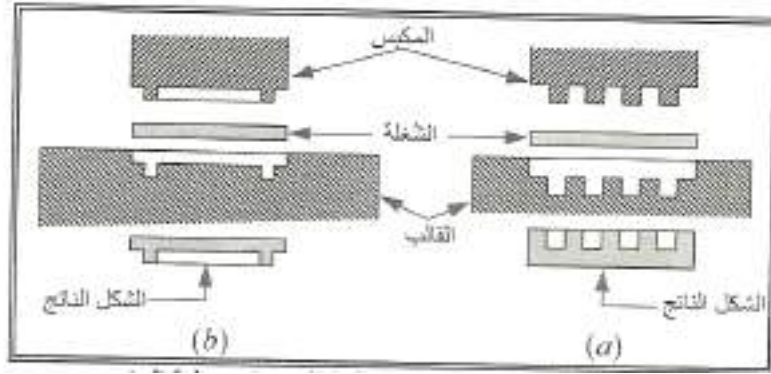
شكل (4) البثق الصدمي



شكل (5) عملية بثق الانابيب

## 5- التشكيل بالسك والختم Coining and Embossing

عملية السك عبارة عن تشكيل الكتل أو الأقراص المعدنية الصغيرة نسبيا بكبسها بين مكبسين يحتوي سطحهما على الهيئة أو الشكل المراد إعطائه لوجهي الكتلة أو القرص المعدني .  
ويصمم القالب الذي يتكون من المكبسين بشكل لا يسمح بانسياب المعدن إلى الخارج وتستعمل هذه الطريقة بصورة خاصة لتشكيل قطع النقود المعدنية والميداليات وأجزاء الآلات الكاتبة ( حروف الطبع ) وما شابه.

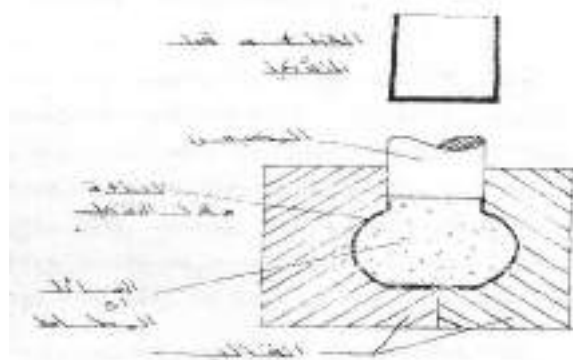


شكل (6) التشكيل بالسك

أما عملية الختم فتستعمل عادة كمرحلة نهائية لإعطاء شكل نهائي لقطعة سبق وان شكلت بطرق التشكيل الأخرى وليس الغرض من التشكيل بالختم إحداث تغيير كبير في شكل أو هيئة القطعة بل إنها تقتصر على إحداث تغييرات طفيفة في الشكل وضبط دقيق لأبعاد ومقاسات القطعة المشكولة

## 6- التشكيل بضغط السوائل أو المطاط Forming by Rubber or Liquids

يستعمل التشكيل بضغط السوائل أو المطاط ويسمى أحيانا التشكيل بالنفخ لتوسيع قطر أنبوية أو علية مشكلة مسبقا بإحدى طرق التشكيل في منطقة معينة من الأنبوب ويتم التشكيل بوضع الأنبوب المشكل داخل قالب يطابق شكله الأنبوب مع اتساع قطره عند المنطقة المطلوبة ثم يملا الأنبوب وهو داخل القالب بالماء أو الزيت أو بكتلة مطاطية يضغط على السائل أو المطاط بواسطة مكبسين فيتم توسيع القطر بتأثير ضغط السائل أو المطاط .



شكل (7) التشكيل بضغط السوائل أو المطاط

- بعض العمليات الخاصة للتشكيل :-

هنالك بعض العمليات الخاصة والمستحدثة لتشكيل المعادن إن هذه العمليات والتي تمتاز عادة بتكاليفها الباهظة وحاجتها إلى أجهزة معقدة أحيانا تستخدم عادة لتشكيل المواد المعدنية التي لا يمكن تشكيلها بالأساليب الأنفة الذكر أو على الأقل يصعب تشكيلها بهذه الأساليب . ومن ناحية أخرى فان هنالك منتجات ذات مواصفات خاصة قد لا يمكن تشكيلها بالطرق الاعتيادية للتشكيل فتنجح عادة بالطرق الآتية :-

## 1- تشكيل مساحيق المعادن Powder Metallurgy

لقد استعملت هذه الطريقة لتشكيل المعادن والسبائك التي لا يمكن تشكيلها بعمليات التشكيل الميكانيكي أو عمليات التشغيل مثل معادن التنجستن والمولبدنيوم وسبائكهما وخاصة كاربيد التنجستن و كاربيد المولبدنيوم ذو الصلادة الفائقة ودرجات الانصهار المرتفعة ثم اتسع استعمالها إلى أن أصبح يشمل عددا كبيرا من المعادن والسبائك الواسعة الانتشار مثل الألمنيوم والنحاس والصلب .

وتتلخص عملية تشكيل مساحيق المعادن بثلاثة عمليات أساسية هي :-

1-تحضير مساحيق المعادن ومزجها .

2-كبس المساحيق بواسطة مكابس في قوالب تعطي المسحوق الشكل أو الهيئة المطلوبة .

3-تلييد المنتجات المكبوسة وذلك بتسخينها إلى درجات حرارة عالية مرتفعة نسبيا .

ويجري تحضير المساحيق المعدنية إما بالطرق الميكانيكية (الطحن , التفريز , البرادة ) أو بالطرق الكيماوية ( المساحيق الناتجة من بعض التفاعلات الكيماوية ) وهنالك طرق أخرى أكثر تعقيدا .

1-المزج(mixing): يمتلك مزج المساحيق المعدنية أهمية كبيرة من حيث تجانس المنتج النهائي. وان المزج الجيد لأنواع مختلفة من المساحيق يستوجب الحصول على توزيع حجمي ملائم لحبيبات المسحوق. ولغرض التحكم في مسامية المنتج وجعلها بالمقدار المناسب تضاف المساحيق السبائكية ومواد مزيطة ومواد متطايرة إلى المسحوق الأساسي أثناء عملية الخلط والمزج. تستغرق عملية المزج وقتا محددا ويعتمد على الخبرة العملية وعلى النتائج المرغوب الحصول عليها.

2-عملية الكبس (compacting) :ويتم فيها تعريض المساحيق إلى ضغط عالي بوجود درجة الحرارة ويسمى الناتج بالقالب الأخضر ويمكن أن يتم الكبس على البارد أو على الساخن. تكون عملية الكبس ذات أهمية كبيرة لكونها تحدد كثافة وتجانس المنتج النهائي. إن القدرة على الحصول على كثافة ضغط مناسبة تكون محددة غالبا بقابلية التصنيع بطريقة ميتالورجيا المساحيق.

إن الغرض من عملية الكبس هو من اجل جمع حبيبات المسحوق المعدني داخل الشكل المطلوب وحسب الأبعاد المرغوب بها اخذين بنظر الاعتبار التغيرات التي تحصل في العملية اللاحقة للكبس وهي التلييد. يمكن تصنيف عمليات الكبس إلى نوعين أساسيين هما:

أ-الكبس بالضغط: ويتم باستخدام الضغط في هذه العملية ومن الأمثلة عليها الكبس بالقوالب ، الكبس المتساوي في كافة الاتجاهات وغيرها من العمليات.

ب-الكبس بدون ضغط: وتشمل الكبس بتأثير الجاذبية.

- 3-عملية التلييد (sintering): يعرض القالب الأخضر لدرجات حرارة اقل من درجة الانصهار للمعدن الصلب وبدون ضغط . إن الغرض من عملية التلييد هو الحصول على الخواص المرغوب بها للمنتج النهائي. واهم منتجات هذه الطريقة :
- 1-المحامل الذاتية التزيب
  - 2-المرشحات المعدنية
  - 3-أسلاك المصاييح الكهربائية ورؤوس أقلام القطع .

#### مزايا وعيوب عملية تشكيل مساحيق المعادن :-

- تمتاز عملية تشكيل مساحيق المعادن عن غيرها من عمليات التشكيل بما يلي :-
- 1-إن منتجات هذه العملية لا تحتاج إلى عمليات إضافية للتشكيل أو التشغيل حيث يمكن استعمالها مباشرة .
  - 2-خطوات إنتاج المنتجات سهلة وذات كفاءة إنتاجية عالية .
  - 3-تتوفر إمكانية إنتاج منتجات لا يمكن تشكيلها أو تكون صعبة التشكيل بالطرق الاعتيادية للتشكيل والتشغيل .
  - 4-تتوفر إمكانية كبيرة لتغيير التركيب الكيميائي للمنتجات عن طريق التحكم في مزيج المساحيق وبالتالي توفر الإمكانية في الحصول على الخواص المتباينة .

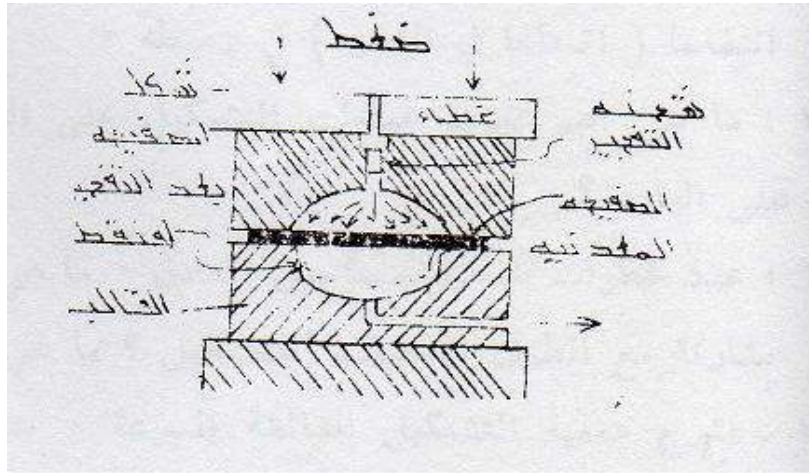
أهم عيوب هذه الطريقة هي:

- 1-صعوبة إنتاج المنتجات ذات الأشكال أو الهياكل المعقدة .
- 2-معظم منتجات هذه الطريقة تكون ذات مقاومة ومناة اقل من منتجات عمليات التشكيل الأخرى .
- 3-ارتفاع تكاليف صناعة القوالب والمكابس المستعملة في العملية .

#### 2-عملية التشكيل الفائقة السرعة والطاقة أو عملية التشكيل بالمتفجرات High Rate Forming

تستعمل هذه الطريقة لتشكيل المعادن والسبائك الفائقة الصلادة والتي يكون تشكيلها صعبا بالأساليب الأنفة الذكر على سبيل المثال معدن التيتانيوم وسبائك الفولاذ المقاوم للصدأ وبعض سبائك الألمنيوم وتستغل هذه الطريقة المقدار الهائل من التشكيل الذي يحدث بسهولة في المواد المعدنية لدى تعرضها إلى قوة تؤثر عليها بسرعة هائلة وهناك طرق عديدة لهذه العملية نكتفي بشرح واحدة والشكل التالي يبني مثلا على عملية التشكيل بالمتفجرات حيث يتكون الجهاز من قالب متين جدا يحتوي على فراغ يمثل الجسم المطلوب تشكيله ويتصل فراغ القالب بقناة ذات قطر صغير نسبيا تعمل على تسريب الهواء إلى الجو الخارجي .

يوضع اللوح المعدني المراد تشكيله على فوهة القالب ثم يثبت عليه وعاء مملوء بسائل مثل الماء وتعلق شحنة متفجرة قوية ( يستعمل الديناميت عادة ) في الوعاء الحاوي على السائل وعند تفجير الشحنة تتولد موجة قوية جدا داخل السائل الذي يرتطم بقوة هائلة باللوح المعدني ويدفعه إلى فراغ القالب متخذا شكله تستعمل هذه العملية لتشكيل المنتجات ذات الأحجام الكبيرة والتي تمتاز بالصلادة الفائقة وهذه العملية تشبه إلى حد بعيد عملية السحب العميق .



شكل (8) عملية التشكيل بالمتفجرات



## 1 - أهداف البلورة وإعادة التبلور Crystallization and Recrystallization :التجربة:

تعتبر عملية البلورة إعادة البلورة من أفضل الطرق المستخدمة في تنقية المواد الكيميائية الصلبة وهي أكثر استقرار وأسهل تداولاً من السوائل والزيوت إذ يمكن تنقيتها وتشخيصها بسهولة . فأهمية تنقية وبلورة المواد الكيميائية يأتي بعد تحضيرها من موادها الأولية في المختبرات أو استخلاصها وفصلها من المصادر الطبيعية النباتية أو الحيوانية.

2 - الخلفية النظرية : عند تحضير المركبات العضوية الصلبة في المختبرات فإن الناتج معظم حالاته يكون غير نقي ومصحوباً بنواتج ثانوية أخرى أو شوائب بنسب مئوية تختلف وظروف التجربة. ولتنقية هذه المركبات فإن عملية البلورة وإعادة البلورة تعتبر من أفضل الطرق المتبعة لهذا الغرض . فأحد الشروط الأساسية المهمة في عملية البلورة هو اختيار المذيب المناسب والذي يجب أن تتوفر فيه الشروط التالية:

• أن تكون ذوبانية المادة الصلبة العضوية في هذا المذيب عالية على الساخن (في درجات الحرارة العالية ) وضئيلة على البارد.

• أن تكون الشوائب قابلة للذوبان في المذيب على البارد حتى يتم فصلها والتخلص منها بخطوة الترشيح الأخيرة، أو لا تذوب نهائياً فيه حتى بعد التسخين وبذلك يتم فصلها بالترشيح الأول أي بعد تسخين المادة مع المذيب في الخطوة الأولى.

• أن يكون المذيب متوسط أو سريع التطاير حتى يتم تجفيف البلورات بسهولة لتعيين درجة انصهارها.

• أن يكون المذيب غير سام شديد الاشتعال (قدر الإمكان).

فاختيار المذيب المناسب في عملية البلورة يتوقف على تركيب المركب ويتم على أساس قاعدة الذوبانية المعروفة ( الشبيه يذيب شبيهه) والمركبات القطبية التي تحتوي على مجاميع هيدروكسيل أو كربونيل أو أمينات أو أمضاض كربوكسيلية فإنها تذوب في الماء والكحولات وذلك و عن طريق تكوين روابط هيدروجينية مع المذيب بينما المركبات التي لا تحتوي على مجاميع قطبية فإنها أكثر ذوباناً في الإيثر البترولي والبنزين ورباعي كلوريد الكربون و الدايبوكسان ، وهناك مذيبات أخرى لها خصائص مشتركة مثل الأسيتون الذي يذيب النوعين من المركبات .أنظرالجدول (4) لاختيار المذيب المناسب. وفي حالة وجود أكثر من مركب واحد مطلوب من الناتج الخام ، فإنه يجب عمل البلورة الجزئية (Fractional Crystallization)

وذلك بإذابة الناتج الخام في مذيب مناسب وغليه حتى درجة الإشباع . وفي هذه الحالة فإن المحلول الناتج سيكون مشبعاً بأحد المركبات وغير مشبع بالمركب الآخر ، يبرد المحلول تدريجياً حتى ينفصل المركب الأول بشكل بلورات نقية ثم يفصل بالترشيح ، أما الراشح المتبقي فيغلى حتى يتبخر جزء من المذيب ويصبح مشبعاً لأحد مكوناته الذي ينفصل بصورة نقية بالتبريد البطيء . تكرر العملية عدة مرات في كل مرة تختبر نقاوة البلورات المنفصلة وذلك بواسطة تعيين نقاط انصهارها ، وقد تحتاج العملية إلى إعادة بلورة حتى نحصل على مركبات عالية النقاوة . فهناك بعض التحضيرات العضوية تنتج مشتقات لها أشكال بلورية مختلفة ومتقاربة في سرعة انفصالها وبلورتها وفي هذه الحالة يفضل التبريد البطيء جداً لكي يعطي فرصة كافية للبلورات كي تنمو وتكبر بصورة جيدة حتى يمكن تمييزها إما بالعين المجردة أو بواسطة المجهر وهناك احتمال فصلها بواسطة الإبرة وهذا ما تم فعلاً في فصل أنداد ملح حمض الطرطريك المكونة من نوعين مختلفين من البلورات بواسطة العدسة

والملقط من قبل العالم (باستور) عام 1848. جدول (4) المذيبات المقترحة لعملية البلورة :

أصناف المركبات المذيب المناسب القطبية الهيدروكربونات الإيثرات الهاليدات مركبات الكربونيل الكحولات والأحماض الأحماض السلفونية الأملاح العضوية البننان، الهكسان، التلوين الإيثر الأثيلي ، البترول الإيثيري الكلورفورم ، ثنائي كلور والميثان خلات الأيثيل، الأسيتون الكحول الأسيتون الماء الماء مركبات غير قطبية (غير محبة للماء) (مركبات قطبية) (محبة للماء) (عملية انفصال البلورات من المحاليل قد تتأخر في بعض الأحيان وقد لا تتم نهائياً وفي هذه الحالة تتبع إحدى الطرق التالية :- يجب عمل احتكاك مابين جدران الدورق الذي يحتوي على المحلول مع قضيب زجاجي أو معدني.

- إضافة عدة بلورات من المركب النقي إن كان متيسراً . إضافة مذيب آخر قابل للامتزاج مع المذيب الأول وأقل تذويبا للمركب المطلوب والتعكير الناتج في البداية يمكن إزالته بالرج ، يستمر بإضافة المذيب ويسخن المحلول حتى يتكون تعكير ثابت يعمل كنواة لتجميع الجزيئات الأخرى حولها بشكل بلوري أثناء التبريد البطيء للمزيج . فالحالات التي يتحول فيها المركب الصلب إلى سائل زيتي داخل المحلول في درجة حرارة الغرفة يستحسن التبريد في حمام ثلجي مع الاستمرار في حك جدار الدورق الذي يحتويها بقضيب زجاجي أو معدني كما ذكرنا أعلاه. إن الحالات التي يصعب فيها اختيار مذيب مناسب لذوبان المركبات العضوية الصلبة يستحسن فيها استخدام مذيبات أعلى في السلسلة الكربونية حيث أن ارتفاع درجات غليانها قد يساعد على الذوبان ولذلك يستبدل البنزين بالتلوين أو الزايلين في إذابة المركبات غير القطبية أو تستخدم الكحولات العالية في إذابة المركبات القطبية بدلاً من الكحول الإيثيلي ، وقد يستخدم البيريدين وحمض الفورميك النيترو بنزين في حالات أخرى .

## الفصل الثالث عشر - علاقات الإجهاد - الانفعال :-

مجرد أن يتحقق المهندس من عدم فشل كتلة التربة كلياً، يجب عندها بشكل عام التأكد من مقدار الحركة التي سوف تنتج عن تسقيط الأحمال والقرار فيما لو كانت هذه الحركة ضمن مدى مسموح به . لعمل ذلك، يحتاج المهندس إلى علاقة إجهاد-انفعال للتربة .

من دراستنا العامة لتصرف الإجهاد - الانفعال في الفصل الحادي عشر، نعلم أن بسبب التصرف المعقد لهذا سوف يعتمد مقدار الانفعال المتسبب بوساطة إجهاد ما على تركيب ونسبة فراغ وتاريخ الإجهاد الماضي للتربة فضلاً عن طريقة تسليط الإجهاد . لقد طوّر هانسن ( Hansen - 1966 ) معادلة تعطي علاقة الإجهاد - الانفعال لتربة رملية معينة لأي تحميل مع اتجاه ثابت للاجهادات الرئيسية . مع ذلك فإن هذه العلاقة معقدة جداً . من المفضل اعتيادياً استخدام معادلات ومعلومات مهيئة لمسألة محددة متوفرة مسبقاً .

في مسائل عديدة، غالباً ما تكون افضل طريقة هي بوساطة القياس المباشر للانفعالات الناتجة عن فحص مختبري لاستخدام الاجهادات التي سوف تحتث في كتلة التربة الحقيقية .

فيما يخص المسائل الأخرى، سوف يساعدنا كثيراً استخدام أفكار ومعادلات من نظرية المرونة (Theory of Elasticity) . هذا سوف يعني أنه يجب أن تحوّل منحنيات الإجهاد - الانفعال اللاخطية الحقيقية الى شكل خطي (Linearized) أي أن تستبدل بوساطة خطوط مستقيمة . عندها سوف يتحدث المهندس بدلالة المعامل (Modulus) ونسبة بويزون (Poisson's Ratio) في التربة . من الواضح ليس المعامل ونسبة بويزون من الثوابت في التربة ولكن هما كميتان تصفان بشكل تقريبي تصرف التربة لمجموعة محددة من الاجهادات . سوف تنطبق قيم مختلفة من المعامل ونسبة بويزون لاية مجموعة أخرى من الاجهادات . عند التكلم عن المعامل، يجب أن نكون حذرين جداً بالأخص في تحديد معناه .

غالباً ما يستخدم كل من المصطلحين المعامل المماسي (Tangent Modulus) و المعامل القاطع (Secant Modulus) . يكون المعامل المماسي ميل الخط المستقيم المرسوم مماساً لمنحني الإجهاد - الانفعال في نقطة محددة على المنحني ( انظر الشكل رقم 1.1.13 ) . سوف تتغير قيمة المعامل المماسي مع النقطة المختارة . يكون المعامل المماسي في النقطة الابتدائية من المنحني هو المعامل المماسي الابتدائي (Initial Tangent Modulus) . أما معامل القطع فهو ميل الخط المستقيم الرابط ما بين نقطتين منفصلتين على المنحني . سوف تتغير قيمة المعامل القاطع مع مواقع كلا النقطتين . كلما اقتربت النقطتان عن بعضهما، سوف يصبح المعامل القاطع مساوياً إلى المعامل المماسي . فيما يخص مادة خطية حقيقية تكون كافة القيم من هذا المعامل واحدة .

### 1.13 مبادئ من نظرية المرنة :-

إذا سلطنا إجهاد على محور واحد ( Uniaxial Stress )  $\sigma_z$  على اسطوانة مرنة<sup>(1)</sup> (شكل رقم (1.1.13)) سوف يحدث انضغاطاً عمودياً و استطالة جانبية اذ :-

$$(1.1.13) \dots \quad \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$$

$$(2.1.13) \dots \quad \varepsilon_x = \varepsilon_y = -\mu\varepsilon_z$$

اذ أن :-

$\varepsilon_z, \varepsilon_y, \varepsilon_x =$  الانفعالات بالاتجاهات  $z, y, x$  على التوالي ( الإشارة الموجبة هي للانضغاط ) .

$E =$  معامل يونغ ( Young's Modulus ) للمرونة .

$\mu =$  معامل بوزون ( Poisson's Ratio ) .

إذا سلطنا اجهدات قص  $\tau_{zx}$  على مكعب مرن فسوف يحدث تـخـلـخـل قص ( Shear Distortion ) اذ

:-

$$(3.1.13) \dots \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

اذ أن  $G =$  معامل القص ( Shear Modulus ) .

تعرف المعادلات ( 1.1.13 - 3.1.13 ) الثوابت الثلاثة الاساسية في نظرية المرنة :  $E$  و  $G$  و  $\mu$

.  $\mu$  في الحقيقة نحتاج فقط إلى اثنين من الثوابت لأن :-

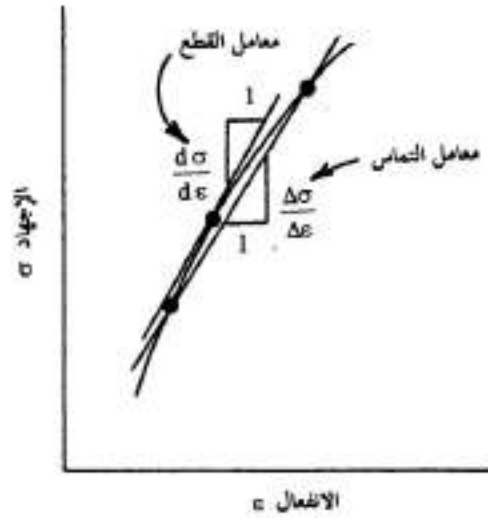
$$(4.1.13) \dots \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

فيما يخص مادة مرنة مع كافة مركبات الإجهاد عاملة, نستطيع أن نستخدم مبدأ المطابقة ( Principle

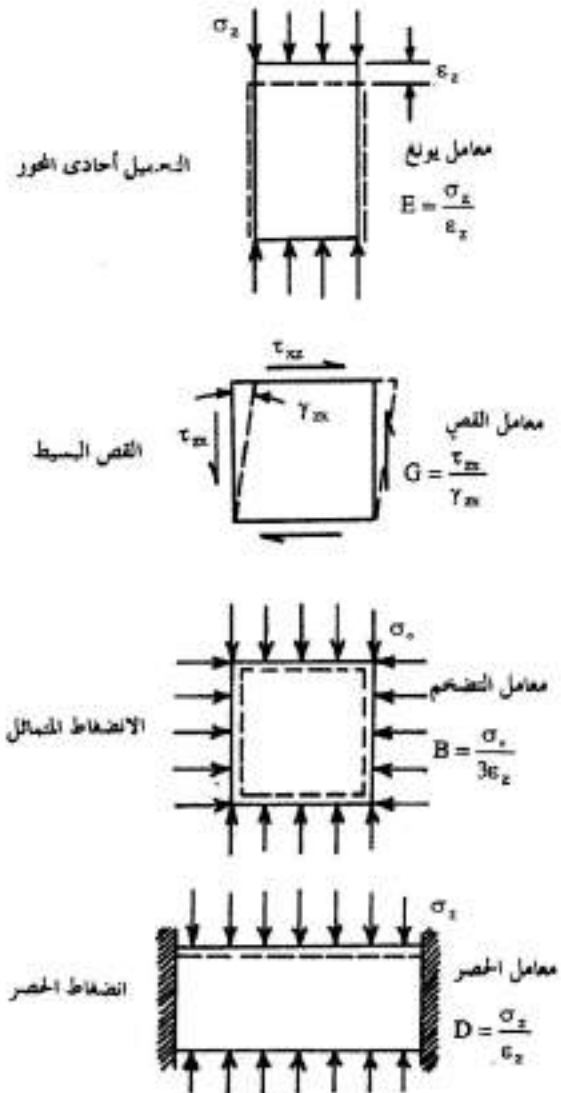
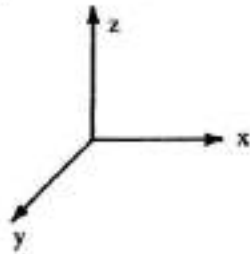
of Superposition ) للحصول على :-

$$(أ.5.1.13) \dots \quad \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

بموجب مقدار  
إضافة الإجهاد



بموجب حالة التحميل



شكل رقم (1.1.13) أنواع مختلفة من المعاملات .

$$(ب.5.1.13) \dots \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]$$

$$(ج.5.1.13) \dots \quad \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$(د.5.1.13) \dots \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$(هـ.5.1.13) \dots \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

$$(و.5.1.13) \dots \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

إن الانفعال الحجمي ( Volumetric Strain ) هو :-

$$(ز.5.1.13) \dots \quad \frac{\Delta V}{V} = \frac{3\sigma_o}{E}(1-2\mu)$$

في الحالة الخاصة حيث يكون  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma_o$  و  $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$  فسوف يساوي الانفعال الحجمي إلى :-

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3\sigma_o}{E}(1-2\mu)$$

يعرف معامل التضخم B (Bulk Modulus) بالشكل الآتي :-

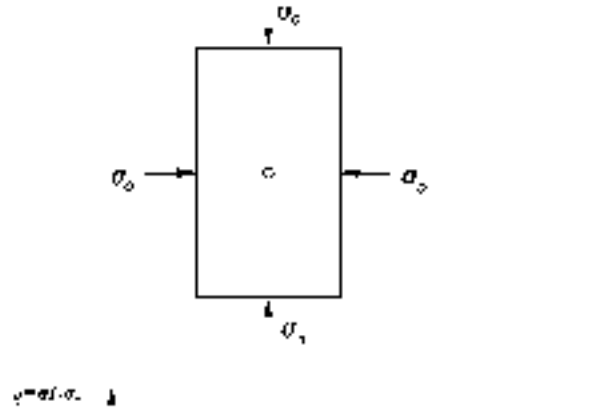
$$(6.1.13) \dots \quad B = \frac{\sigma_o}{\Delta V/V} = \frac{E}{3(1-2\mu)}$$

اشتقاق :-

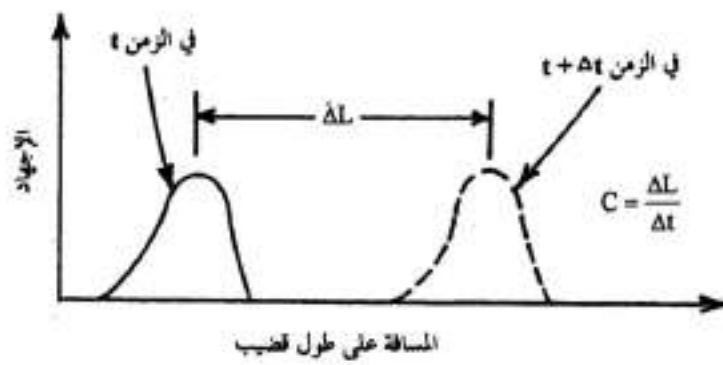
إذا أجرينا فحص ثلاثي المحاور متماثل على تربة ما كما مبين في الشكل رقم (2.1.13) فسوف يكون مسار الإجهاد كما مبين في نفس الشكل رقم (2.1.13) .

$$\text{معامل التضخم } B = \frac{P}{\varepsilon_v}$$

$$= \frac{\sigma_o + \sigma_o + \sigma_o}{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z} = \frac{\sigma_o}{3\varepsilon_z}$$



شكل رقم (1.1.13) فحص انضغاط متماثل ثلاثي المحاور



شكل رقم (2.1.13) معنى السرعة الموجية .

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma}{E} [\sigma_0 - 2\mu\sigma_0]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [1 - 2\mu]$$

$$\therefore B = \frac{\sigma_0}{\frac{3\sigma_0}{E}(1-2\mu)} = \frac{E}{3(1-2\mu)}$$

هناك نوع آخر من المعاملات وهو معامل الحصر ( Constrained Modulus ) D و الذي هو نسبة الإجهاد المحوري إلى الانفعال المحوري في حالة الانضغاط المحصور شكل رقم (1.1.13) . بالإمكان احتساب هذا المعامل من المعادلات (5.1.13) بوساطة وضع  $(\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0)$  . لذلك :-

$$(7.1.13) \dots \quad \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z$$

$$(8.1.13) \dots \quad D = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

اشتقاق :-

يجرى فحص الانضغاط المحصور على تربة رملية بالتحديد في جهاز الاويدوميتر . إذا اجري نفس الفحص على تربة طينية فسوف يدعى عندئذٍ بفحص الانضمام ( Consolidation Test ) . من خواص التربة الموضوعة في قالب الاويدوميتر :-

$$\varepsilon_z = \varepsilon_a = \varepsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V_0}$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_r$$

$$D = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{\sigma_z}{\frac{\Delta V}{V_0}}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]$$



$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$E \neq \infty$$

$$[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] = 0$$

$$\sigma_x (1 - \mu) = \mu \cdot \sigma_z \quad , \quad (\sigma_x = \sigma_y)$$

$$\sigma_x = \frac{\mu \cdot \sigma_z}{(1 - \mu)}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left[ \sigma_z - \frac{2\mu^2 \cdot \sigma_z}{(1 - \mu)} \right]$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \left[ \frac{1 - \mu - 2\mu^2}{(1 - \mu)} \right]$$

$$= \frac{\sigma_z}{E} \left[ \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \right]$$

$$D = \frac{\sigma_z}{E} = \frac{\sigma_z}{\frac{\sigma_z}{E} \left[ \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \right]}$$

$$D = \frac{E(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

يتعرض التحميل باتجاه واحد و الانضغاط المحصور لانفعال قص و تغير في الحجم . يبين المثال (1.1.13) هذه الحقيقة المهمة .

مثال (1.1.13) :-

المطلوب :- جد الانفعال الحجمي  $\left( \frac{\Delta V}{V} \right)$  و انفعال القص الأقصى اثناء : (أ) التحميل باتجاه واحد و (ب) الانضغاط المحصور .

الحل :-

الحالة	الحجمية	القص
التحميل باتجاه واحد	$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = (1-2\mu)\frac{\sigma_z}{E}$	$\tau_{\max} = \frac{\sigma_z}{2}$ $\gamma_{\max} = \frac{\sigma_z}{2G}$
الانضغاط المحصور	$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)\sigma_z}{E(1-\mu)}$	$\tau_{\max} = \frac{\sigma_z}{2} \frac{(1-2\mu)}{1-\mu}$ $\gamma_{\max} = \frac{\sigma_z}{2G} \frac{(1-2\mu)}{1-\mu}$

ملاحظة :- يصبح الانفعال الحجمي صفراً فيما يخص الحالة عندما  $\mu = 0.5$  . يتكون إجهاد القص الأقصى  $\tau_{\max}$  على مستويات مائلة بزاوية مائلة قدرها  $45^\circ$  عن الأفق . يحدث انفعال القص الأقصى  $\gamma_{\max}$  في عنصر تكون أطرافه مائلة بزاوية قدرها  $45^\circ$  مع الأفق .  
فيما يخص مادة مرنة، تنطبق المعادلات السابقة على إضافات من الإجهاد سواءً تبتدى من إجهاد ابتدائي معين أو من إجهاد قدره صفراً . يبين المثال (2.1.13) اشتقاقاً لمعادلات يمكن استخدامها لإيجاد قيمتي E و  $\mu$  من انفعالات مقاسة .

### المثال (2.1.13) :-

المعلوم :- الانفعالات  $\Delta\varepsilon_x = \Delta\varepsilon_y$  و  $\Delta\varepsilon_z$  التي سببت بواسطة الاجهادات  $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y$  و  $\Delta\sigma_z$  المسلطة على اسطوانة من مادة مرنة .

المطلوب :- جد صيغتين ملائمتين لمعامل يونغ و نسبة بوزون .

الحل :-

تصبح المعادلتين ( 5.1.13 أ و 5.1.13 ج ) بالشكل الآتي :-

$$E\Delta\varepsilon_x = \Delta\sigma_x - \mu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_z)$$

$$E\Delta\varepsilon_z = \Delta\sigma_z - 2\mu\Delta\sigma_x$$

بالإمكان حل هاتين لتعطيان :-

$$E = \frac{(\Delta\sigma_z + 2\Delta\sigma_x)(\Delta\sigma_z - \Delta\sigma_x)}{\Delta\sigma_x(\Delta\varepsilon_x - 2\Delta\varepsilon_z) + \Delta\sigma_z\Delta\varepsilon_z}$$

$$\mu = \frac{\Delta\sigma_x \Delta\varepsilon_z - \Delta\varepsilon_x \Delta\sigma_z}{\Delta\sigma_x (\Delta\varepsilon_z - 2\Delta\varepsilon_x) + \Delta\sigma_z \Delta\varepsilon_z}$$

تصرف الإجهاد - الانفعال لترية مرنة نموذجية :-

يعطى تصرف الإجهاد - الانفعال لمادة على شكل تربة نموذجية من هيئة عامة من قانون هوك ( Hooke's Law ) بواسطة المعادلات (5.1.13) . سوف يفترض أن تكون قيمتا E و  $\mu$  ثابتتين عبر إضافات صغيرة من الإجهاد و الانفعال اذ اعتبرت المادة مرنة خطياً . مع ذلك تظل هذه المعادلات صحيحة لإضافات كبيرة من الإجهاد  $\Delta\sigma$  و الانفعال  $\Delta\varepsilon$  . إذا كتبت هذه المعادلات بدلالة الاجهادات الرئيسية و الانفعالات الرئيسية فسوف تصبح :-

$$(أ.9.1.13) \dots \quad \Delta\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma_1 - \mu(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3)]$$

$$(ب.9.1.13) \dots \quad \Delta\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma_2 - \mu(\Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_1)]$$

$$(ج.9.1.13) \dots \quad \Delta\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma_3 - \mu(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)]$$

بسبب كون اجهادات القص وانفعالات القص صفراً على المستويات الرئيسية في الحالة الخاصة للتناظر المحوري (Axial Symmetry) اذ يكون فيه  $\sigma_2 = \sigma_3$  و  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$  تصبح عندئذٍ المعادلة (9.1.13 أ و ج) بالشكل الآتي :-

$$(10.1.13) \dots \quad \Delta\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma_1 - 2\mu\Delta\sigma_3]$$

$$(11.1.13) \dots \quad \Delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma_3(1 - \mu) - \mu\Delta\sigma_1]$$

لذلك

$$(12.1.13) \dots \quad \Delta\varepsilon_v = (\Delta\varepsilon_1 + 2\Delta\varepsilon_3) = \frac{(1 - 2\mu)}{E} \Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3$$

$$(13.1.13) \dots \quad \Delta\varepsilon_v = \frac{3(1 - 2\mu)}{E} \Delta p$$

بشكل شبيه

$$(14.1.13) \dots \quad \Delta\varepsilon_s = \frac{2}{3} (\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_3) = \frac{2(1 + \mu)}{3E} (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$$

أو

$$(15.1.13) \dots \Delta \varepsilon_s = \frac{2(1+\mu)}{3E} \Delta q$$

غالباً ما تكتب المعادلتان (13.1.13) و (15.1.13) بالشكل الآتي :-

$$(16.1.13) \dots \Delta \varepsilon_v = \frac{1}{B} \Delta p$$

$$(17.1.13) \dots \Delta \varepsilon_s = \frac{1}{3G} \Delta q$$

تظهر المعادلتين (16.1.13) و (17.1.13) خاصية مهمة من المادة المرنة المتماثلة النموذجية . عندما ترتبط لا متغيرات الانفعال بشكل صحيح مع لا متغيرات الإجهاد سوف تعتمد إضافات انفعال القص  $\Delta \varepsilon_s$  فقط على الإضافات التي تقابل لا متغير الإجهاد المناظر  $\Delta q$  وبشكل شبيهة تعتمد إضافات الانفعال الحجمي  $\Delta \varepsilon_{vol}$  فقط على إضافات لا متغير الإجهاد المقابل  $\Delta p$  . للتأكيد على هذه النقطة بإمكاننا أن نكتب ما يلي :-

$$(18.1.13) \dots \Delta \varepsilon_v = \frac{1}{B} \Delta p + 0 \cdot \Delta q$$

$$(19.1.13) \dots \Delta \varepsilon_s = 0 \cdot \Delta p + \frac{1}{3G} \Delta q$$

لذلك ترتبط الانفعالات الحجمية  $\varepsilon_{vol}$  مع لا متغير الإجهاد  $p$  ومنعزلة عن  $q$  في حين ترتبط انفعالات القص  $\varepsilon_s$  مع لا متغير الإجهاد  $q$  ومنعزلة عن  $p$  . على الرغم من انه تم اشتقاق المعادلتين (18.1.13 و 19.1.13) في الحالة الخاصة اذ  $\sigma_2 = \sigma_3$  يظهر بأنها صحيحة كذلك في حالات الإجهاد العامة للمواد التي هي متماثلة والتي تكون مرنة خطياً عبر الإضافات المناسبة .

المثال (3.1.13) - تصرف تربة مرنة متماثلة نموذجية في حالة الانفعال المستوي :-

المطلوب:-

استحصل صيغ تربط بين متغيري الانفعال  $\varepsilon_v$  و  $\varepsilon_s$  مع متغيري الإجهاد  $s$  و  $t$  لتربة مرنة خطية متماثلة نموذجية محملة في حالة انفعال مستوي .

الحل:-

فيما يخص الانفعال المستوي  $\varepsilon_2 = 0$  لذلك ومن المعادلة (3.2.9)  $\Delta \sigma_2 = \mu(\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3)$  و :-

$$\Delta \varepsilon_1 = \left( \frac{1}{E} \right) \left[ \Delta \sigma_1 (1 - \mu^2) - \Delta \sigma_3 (\mu + \mu^2) \right]$$

$$\Delta \varepsilon_3 = \left( \frac{1}{E} \right) \left[ \Delta \sigma_3 (1 - \mu^2) - \Delta \sigma_1 (\mu + \mu^2) \right]$$

لذلك فيما يخص تحميل الانفعال المستوي :-

$$\Delta \varepsilon_v = (\Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_3) = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E} (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3)$$

أو

$$\Delta\varepsilon_v = \frac{2(1+\mu)(1-\mu)}{E} \Delta s$$

و

$$\Delta\varepsilon_\gamma = (\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_3) = \frac{(1+\mu)}{E} (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$$

أو

$$\Delta\varepsilon_\gamma = \frac{2(1+\mu)}{E} \Delta t$$

بالإمكان كتابة هذه بالشكل الآتي :-

$$\Delta\varepsilon_v = \frac{2(1+\mu)}{3B} \Delta s + 0.\Delta t$$

$$\Delta\varepsilon_\gamma = 0.\Delta s + \frac{1}{6} \Delta t$$

السرعة الموجية :-

تعرف سرعة انتشار الموجة ( Wave Propagation ) أو ببساطة أكثر السرعة الموجية ( Wave Velocity ) على أنها المسافة التي انتقلت بها موجة ما في وحدة الزمن (شكل رقم (3.1.13)). هناك عدة سرع موجية مختلفة تقابل كل واحدة منها موجة ذات علاقة بنوع مختلف من الانفعال :-

$$(أ.20.1.13) \dots \quad C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{سرعة القضيب ( Rod Velocity )}$$

$$(ب.20.1.13) \dots \quad C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{سرعة القص ( Shear Velocity )}$$

$$(ج.20.1.13) \dots \quad C_D = \sqrt{\frac{D}{\rho}} \quad \text{سرعة التغير الحجمي ( Dilatation Velocity )}$$

$$\frac{\gamma}{g} = \text{كثافة الكتلة} = \rho \quad \text{اذ أن}$$

$$g = \text{التعجيل الأرضي ( Gravitational Acceleration )}$$

$$C_L, C_D = \text{سرع الموجات الانضغاطية للتحميل باتجاه واحد و الانضغاط المحصور على}$$

التالي .

بسبب هذه العلاقات البسيطة بين المعامل و السرعة, غالباً ما تقاس السرعة و تستخدم لاحتساب المعامل .

## 2.13 التصرف اثناء الانضغاط المحصور :-

يعطي الشكل رقم (3.5.11) منحني إجهاد - انفعال نمطي لترية رملية اثناء الانضغاط المحصور . بما أن ليس هناك انفعال جانبي ( Lateral Strain ) اثناء هذا الفحص يكون الإجهاد المحوري ( Axial Stress ) مساوياً تماماً إلى الانفعال الحجمي ( Volumetric Strain ) . يعطي المثال رقم (1.2.13) قيم من معامل الحصر ( Constrained Modulus ) كما قيس من هذا المنحني . يجب ملاحظة المقدار العام لمعامل الحصر لترية رملية ما إضافة إلى تقدير حقيقة أن الترية الرملية تصبح أكثر صلابة مع التحميل و إعادة التحميل المتكرر .

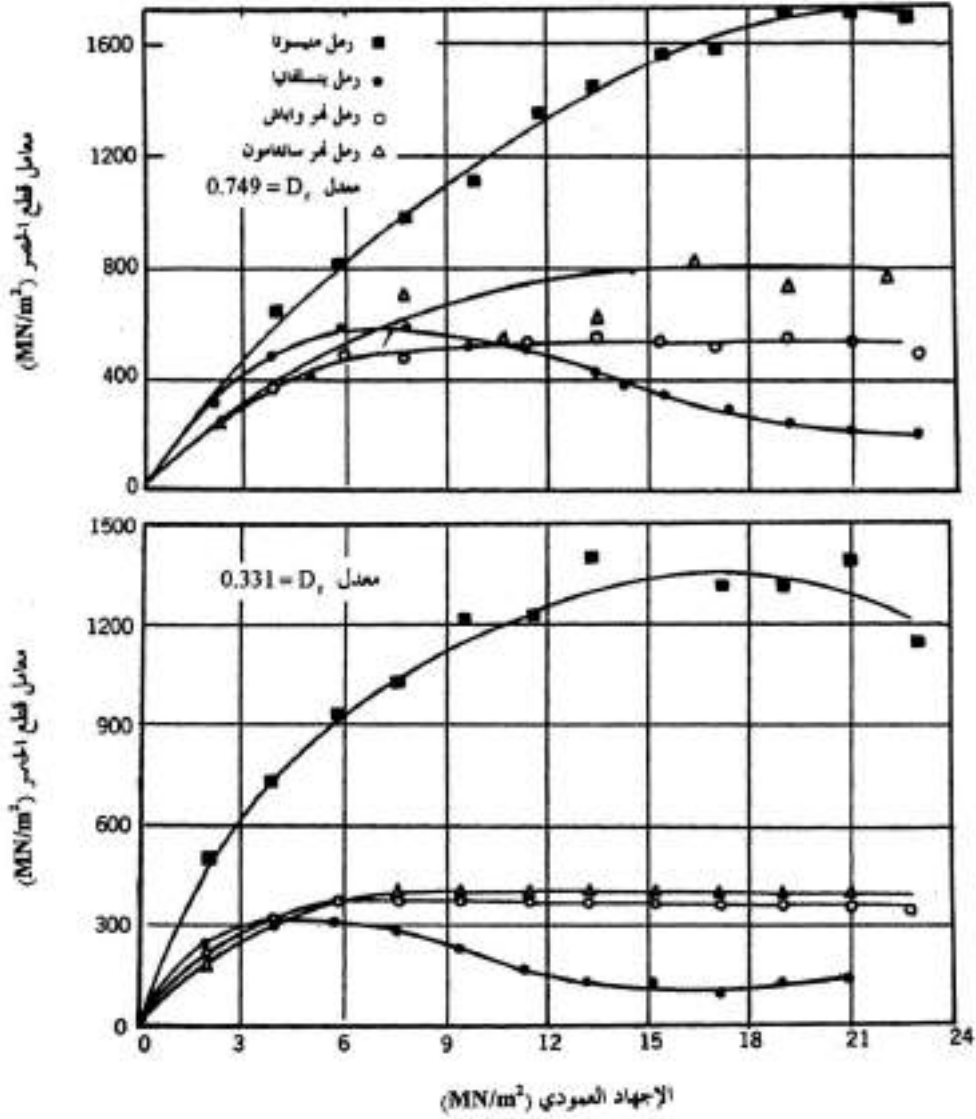
كما نوقش في الفصل الحادي عشر, يصبح تهمش و تكسر الدقائق أكثر أهمية فيما يخص الاجهادات الأكبر من  $3500 \text{ kN/m}^2$  . لذلك فيما يخص الاجهادات الكبيرة يقترب المعامل من أن يصبح ثابتاً أو حتى متناقصاً (شكل رقم (1.2.13)). لقد تألفت ترية مينيسوتا الرملية ( Minnesota Sand ) من دقائق صلبة مكورة في حين تألفت ترية بنسلفانيا الرملية ( Pennsylvania Sand ) من دقائق مطحونة وذات زاوية . يظهر المنحنيان الآخراَن تصرف الترب الرملية المتدرجة بشكل جيد .

### مثال (1.2.13) :-

المعلوم :- منحني الإجهاد - الانفعال في الشكل رقم (3.5.11) .

- المطلوب :-
- أ. المعامل القاطع من  $0 - 100 \text{ kN/m}^2$  للتحميل الأول .
  - ب. المعامل القاطع من  $1 - 800 \text{ kN/m}^2$  للتحميل الأول .
  - ج. المعامل القاطع من  $1 - 800 \text{ kN/m}^2$  للتحميل الثاني .
  - د. المعامل القاطع من  $1 - 800 \text{ kN/m}^2$  لإزالة الثقل الثاني .
  - هـ. المعامل المماسي في  $100 \text{ kN/m}^2$  للتحميل الأول .

الحل :-



شكل رقم (1.2.13) تصرف عدة رمال خلال الانضغاط باتجاه واحد . أن معامل القطع هو من صفر  $MN/m^2$  ولغاية الإجهاد المبين (من هندرون - 1963 - Hendron).

المعامل kN / m <sup>2</sup>	$\Delta\varepsilon$	$\Delta\sigma$ kN / m <sup>2</sup>	الحالة
13000	0.0078	100	أ
58000	0.0120	700	ب
163000	0.0043	700	ج
230000	0.0031	700	د
23000	0.0298	700	هـ(2)

#### الكثافة النسبية الابتدائية :- Initial Relative Density

كما هو متوقع كلما كانت التربة سائبة أكثر كلما يكون المعامل اصغر لإضافة ثقل معين . يظهر ذلك بواسطة النتائج المعطاة في الجدول رقم (1.2.13) .

#### التحميلات المتكررة :- Repeated Loadings

يبين الشكل رقم (2.2.13) زيادة المعامل اثناء الدورات المتلاحقة من التحميل . يتزايد المعامل بشكل واضح ما بين التحميلين الأول والثاني و بالتدريج يصبح التزايد اقل و اقل اثناء الدورات المتلاحقة و بعد مئات الدورات يثبت منحنى الإجهاد - الانفعال .

#### معدل الانضغاط :- Rate of Compression

فيما يخص تحميل ابتدائي, يتأثر المعامل بواسطة الزمن المطلوب لتحقيق إجهاد القمة ( Peak Stress ) . قد يتضاعف المعامل إذا كان زمن التحميل 5 ملي ثانية بدلاً عن الثواني المعدودات الاعتيادية ( Whitman et. al - 1964 ) . يكون تأثير زمن التحميل اقل بكثير اثناء الدورات اللاحقة من التحميل المتكرر .

#### التركيب :- Composition

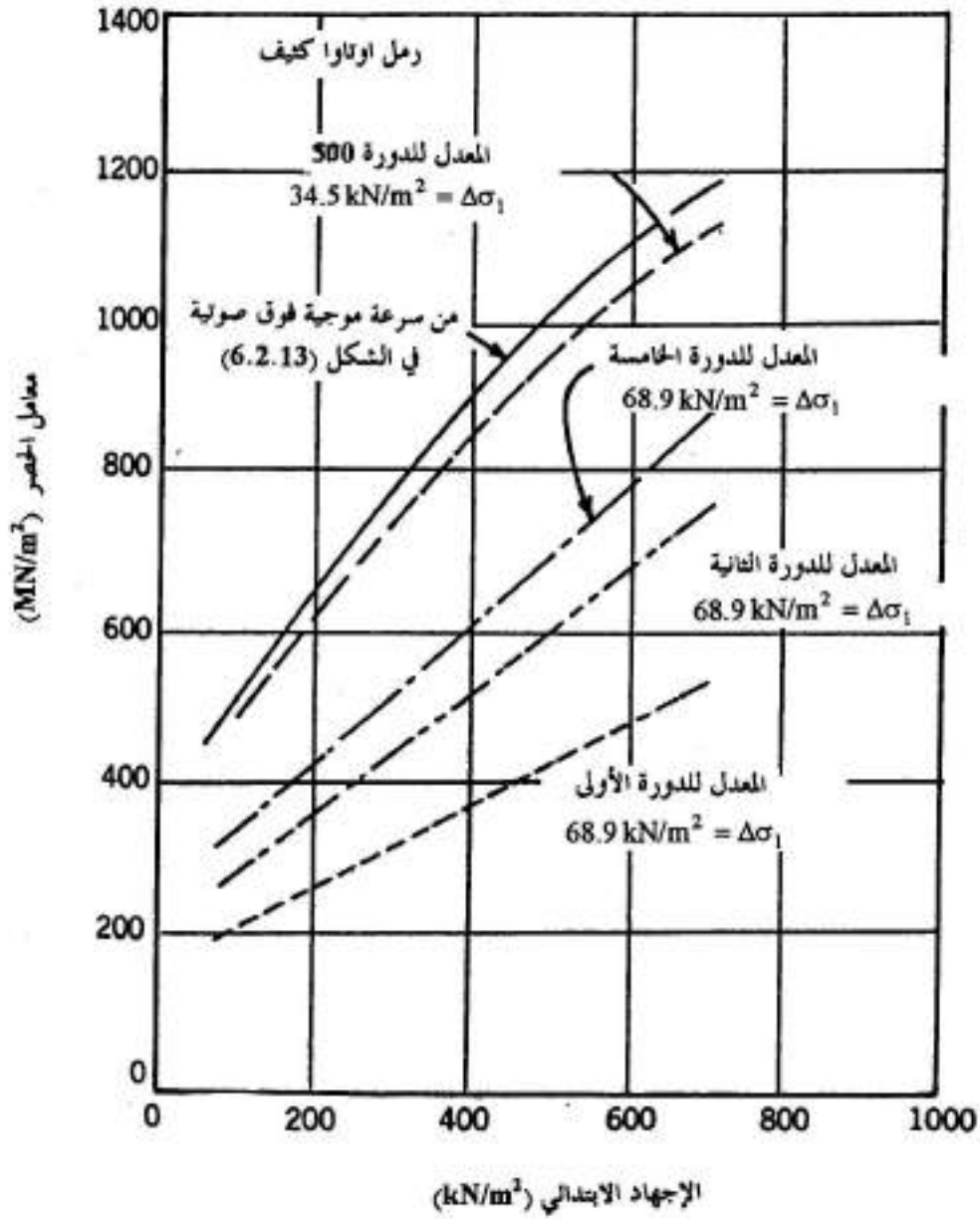
كما في حالة زاوية الاحتكاك يتأثر المعامل بطريقتين بواسطة التركيب : يؤثر التركيب على نسبة الفراغات لكثافة نسبية معينة و من ثم أنها تؤثر على معامل الكثافة النسبية تلك . فيما يخص كثافة نسبية معينة سوف يكون المعامل في تربة رملية زاوية ( Angular ) اقل من تربة رملية مكورة . يبين الجدول رقم (1.2.13) تأثيرات حجم الدقيقة و التدرج . بشكل عام يتناقص المعامل كلما أدى



جدول رقم (1.2.13) معامل قطع الحصر لعدة ترب حبيبية خلال التحميل المركزي

المعامل (MN/m <sup>2</sup> )		الكثافة النسبية $D_r$	التربة
$\Delta\sigma_1$ من 200 إلى 510 (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_1$ من 26 إلى 103 (kN/m <sup>2</sup> )		
60.0	30.3	0	حصو منتظم
179.3	117.2	100	5mm > D > 1 mm
25.5	13.8	0	رمل متدرج بشكل جيد
121.4	51.7	100	1mm > D > 0.02 mm
35.2	14.5	0	رمل ناعم متجانس
120.0	51.0	100	0.3mm > D > 0.07 mm
17.2	2.8	0	غرين متجانس
75.8	35.2	100	0.07mm > D > 0.02 mm

من حسيب 1951 - Hassib



شكل رقم (2.2.13) الزيادة في معامل تقطع الحصر مع دورات متلاحقة من التحميل، ملاحظة:-- رسمت المنحنيات من خلال معدل النقاط المنتشرة .

حجم الدقيقة بنسبة فراغ أكبر و ذلك في كثافة نسبية معطاة . يحاول تأثير التركيب بالتلاشي تحت اجهادات كبيرة جداً و خلال دورات لاحقة من التحميل المتكرر .

الطرق البديلة لإظهار المعلومات :-

فضلاً عن الشكل البسيط من منحنى الإجهاد - الانفعال المبين في الشكل رقم (3.5.11), غالباً ما نستخدم طريقتين أخريتين لرسم معلومات الإجهاد - الانفعال .

يبين الشكل رقم (3.2.13) النتائج من الشكل رقم (3.5.11) مرسومة كنسبة فراغ ( e ) ضد الإجهاد العمودي (  $\sigma_v$  ) . يعرف ميل المنحنى الناتج على انه معامل الانضغاطية ( Coefficient of  $a_v$  (Compressibility) .

$$(1.2.13) \dots \quad a_v = -\frac{de}{d\sigma_v} \quad \text{أو} \quad a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma_v}$$

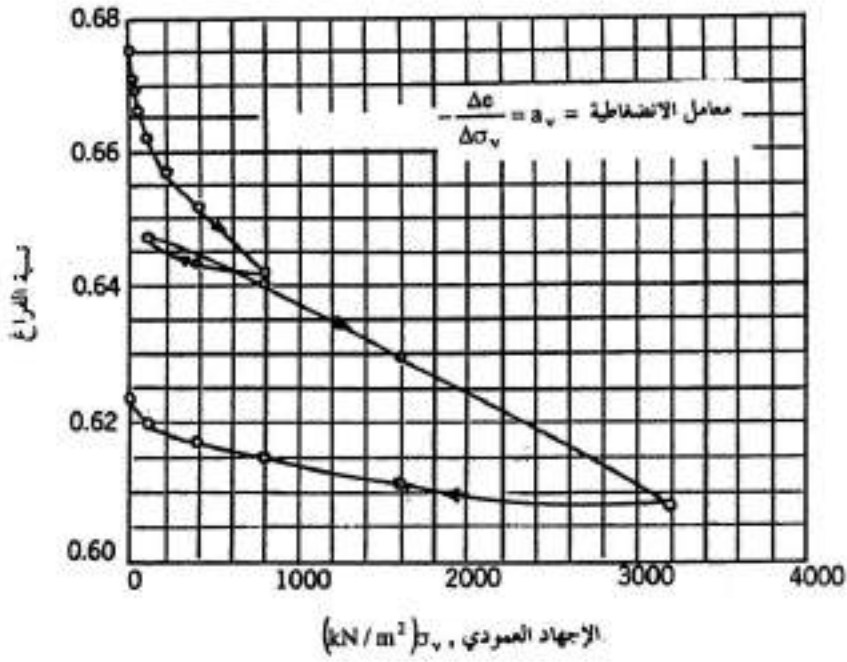
يظهر الشكل رقم (4.2.13) النتائج نفسها مرسومة كنسبة فراغ ضد لوغارثم الإجهاد العمودي . يكون هذا الشكل من الرسم مفيداً لسببين : (أ) يكون مناسباً لظهور تصرف الإجهاد - الانفعال عبر مدى واسع من الاجهادات و (ب) تصبح منحنيات كهذه عادةً مستقيمة تقريباً تحت الاجهادات الكبيرة . كما سوف يبين في الباب الرابع, يكون هذا الشكل من المرتمس مفيداً بالأخص في الترب الطينية . يظهر الشكل رقم (5.2.13) المنحنيات للشكل رقم (2.5.11) معاد رسمها بهذه الطريقة . تحت اجهادات كبيرة تحاول المنحنيات في الترب الرملية المختلفة الوقوع عبر مسار مشترك . يكون

ميل هذا النوع من المنحنى هو مؤشر الانضغاط ( Compression Index )  $C_c$  :-

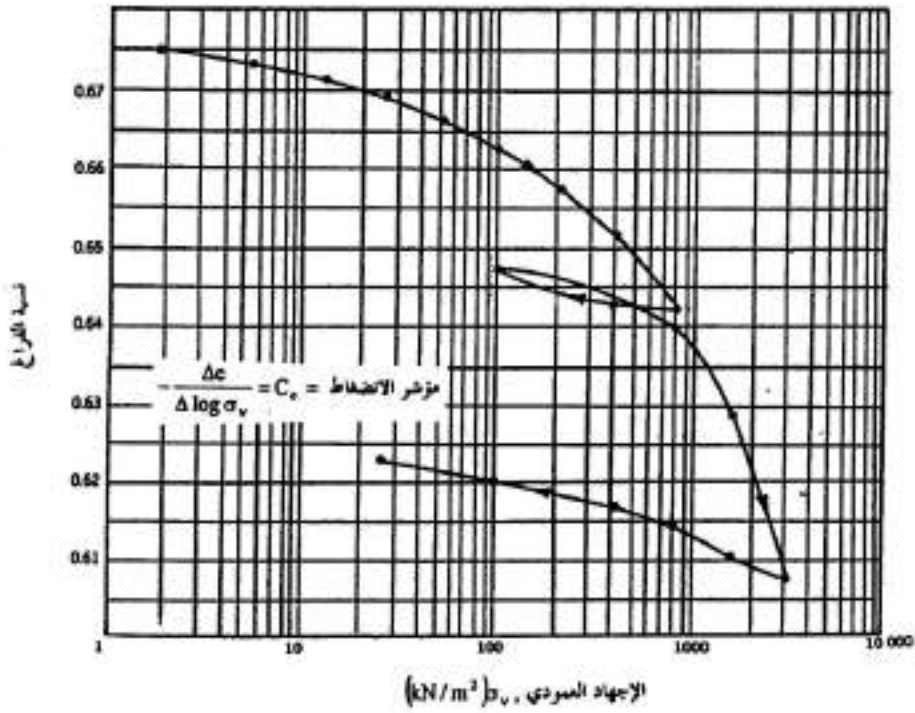
$$(2.2.13) \dots \quad C_c = -\frac{de}{d(\log \sigma_v)} \quad \text{أو} \quad C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma_v)}$$

يحتسب ميل  $C_c$  من خط الانضغاط البكري ( Virgin Compression Line ) أي في الموقع الذي تتعرض التربة لهذا الإجهاد للمرة الأولى . يحتسب معامل آخر بنفس الصيغة المبينة في المعادلة أعلاه ما عدا انه يحتسب من خط الانتفاخ ( Swelling Line ) . يدعى هذا المعامل بمؤشر الانتفاخ اذ يبين الخواص المرنة من انتفاخ التربة .

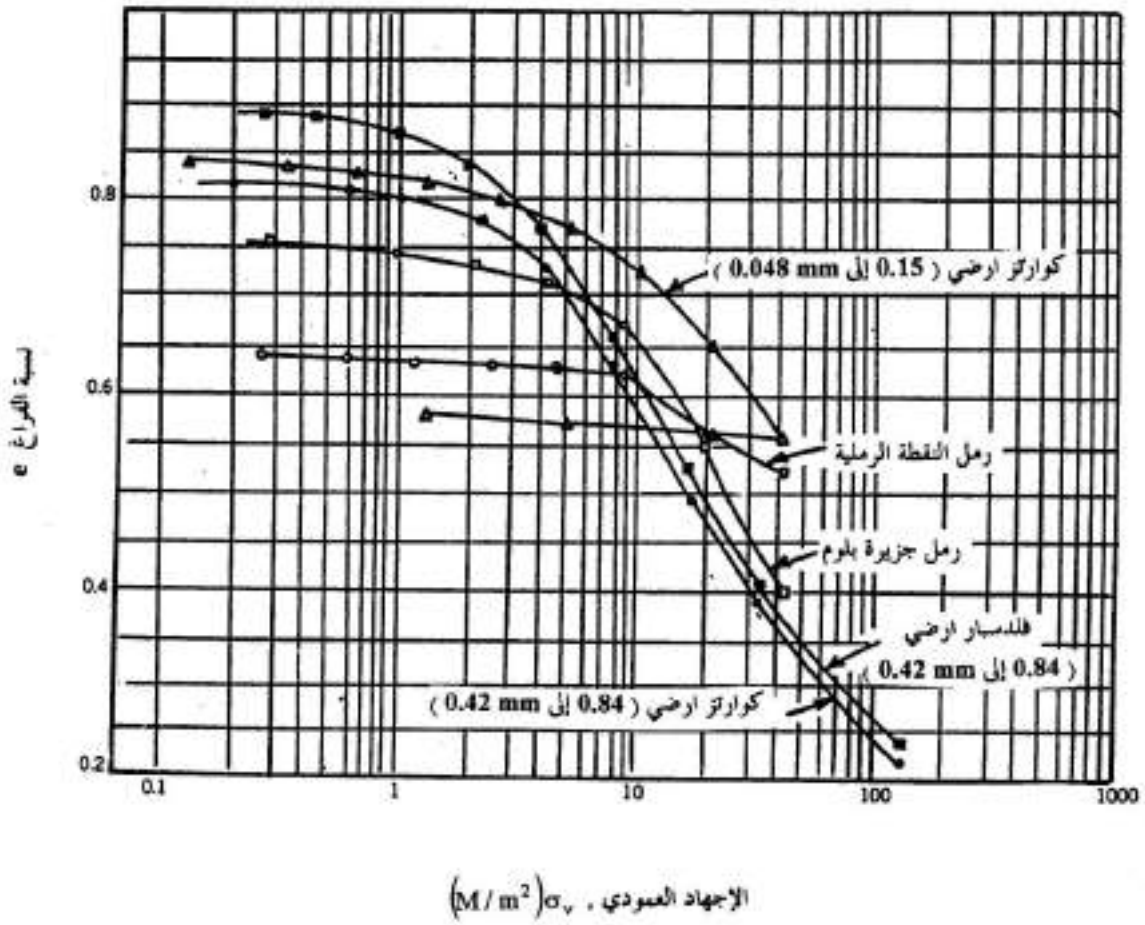
يكون  $C_c$  لذلك التغير في نسبة الفراغ مبيناً لكل دورة لوغارتمية من الإجهاد . هناك حد آخر لوصف تصرف الإجهاد - الانفعال في الانضغاط المحصور و هو مؤشر تغير الحجم ( مؤشر الانضغاطية



شكل رقم (3.2.13) نتائج فحص الانضغاط محصور حيث رسم نسبة الفراغ ضد الإجهاد بمقياس طيعي .



شكل رقم (4.2.13) نتائج فحص الانضغاط المحصور مرسوم نسبة فراغ ضد الإجهاد على مقياس لوغاريتمي .



شكل رقم (5.2.13) نتائج فحوص ضغط محصور لاجهاد عالي على رمال متعددة  
(من روبرتس - 1964 - Roberts).

الحجمية) ( Coefficient of Volume Change ( Compressibility ) ) اذ انه ببساطة عبارة عن مقلوب معامل الحصر :-

$$(3.2.13) \dots \quad m_v = \frac{d\varepsilon_v}{d\sigma_v} \quad \text{أو} \quad m_v = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\sigma_v}$$

يعطي الجدول رقم (2.2.13) العلاقات بين  $D$  و  $m_v$  و  $a_v$  و  $C_c$  . سوف يساوي الانفعال العمودي اثناء الانضغاط المحصور إلى  $\left( \frac{\Delta e}{1+e_0} \right)$  اذ أن  $e_0$  هي نسبة الفراغ الابتدائية<sup>(3)</sup>.

مثال (2.2.13) :-

المعلوم :- منحنيات الإجهاد - الانفعال في الأشكال رقم (3.2.13 و 4.2.13) .

المطلوب :- قيم  $m_v$  و  $a_v$  و  $C_c$  للاجهادات المستخدمة في المثال (1.2.13) نفسها.

الحل :-

بالإمكان وزن القيم من هذه الأشكال . بالإمكان احتسابها باستخدام المعادلات في الجدول رقم (2.2.13) و لكن هذا الحساب غير دقيق في حالة القيم القاطعة من  $C_c$  لأن اختيار معدل الإجهاد  $\sigma_{va}$  يؤثر بشكل كبير على القيم المحتسبة .

$C_c$	$a_v$ $m^2 / MN$	$m_v$ $m^2 / MN$	الحالة
0.0065	0.130	0.078	أ
0.0225	0.028	0.017	ب
0.0079	0.010	0.006	ج
0.0066	0.0073	0.0045	د
0.0140	0.065	0.045	هـ

ملاحظة :- يكون  $C_c$  بدون وحدات . يكون التغير بكل دورة لوغاريتمية نفسها لأية مجموعة من الوحدات .

لاحظ تناقص الانضغاطيتين  $a_v$  و  $m_v$  مع زيادة الإجهاد و لكن يتزايد  $C_c$  . يكون أكبر قيمة من  $C_c$  في الشكل رقم (4.2.13) هي 0.07 .

جدول رقم (2.2.13) العلاقات ما بين متغيرات الإجهاد-الانفعال المختلفة

مؤشر الانضغاط	معامل الانضغاطية	معامل التغير الحجمي	معامل الحصر	
$D = \frac{(1+e_o)\sigma_{va}}{0.435C_c}$	$D = \frac{1+e_o}{a_v}$	$D = \frac{1}{m_v}$	$D = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\varepsilon_{vert}}$	معامل الحصر
$m_v = \frac{0.435C_c}{(1+e_o)\sigma_{va}}$	$m_v = \frac{a_v}{1+e_o}$	$m_v = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\sigma_v}$	$m_v = \frac{1}{D}$	معامل التغير الحجمي
$a_v = \frac{0.435C_c}{\sigma_{va}}$	$a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta\sigma_v}$	$a_v = (1+e_o)m_v$	$a_v = \frac{1+e_o}{D}$	معامل الانضغاطية
$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v}$	$C_c = \frac{a_v \sigma_{va}}{0.435}$	$C_c = \frac{(1+e_o)\sigma_{va} m_v}{0.435}$	$C_c = \frac{(1+e_o)\sigma_{va}}{0.435D}$	مؤشر الانضغاط

ملاحظة : تمثل  $e_o$  نسبة الفراغ الابتدائية. تمثل  $\sigma_{va}$  معدل الاجهادات من الابتدائية والنهائية.

بشكل عام يشبه منحنى الإجهاد - الانفعال للتحميل الابتدائي قطع مكافئ ( Parabola ) . لذلك بالإمكان التعبير عن علاقة الإجهاد - الانفعال بالشكل الآتي :-

$$\sigma_v = C(\varepsilon_v)^n \quad \dots (4.2.13)$$

يتغير المعامل C مع نوع التربة و نسبة الفراغ الابتدائية . فيما يخص مدى واسع من الترب فلقد وجد بأن الأس ( n ) يقترب كثيراً من (2) . بالنسبة لترتيب مثالي من كرات مرنة يكون هذا الأس (3) . يكون الفرق بين القيمتين النظرية و الحقيقية للأس ناتج عن الانزلاق و إعادة الترتيب للدقائق ضمن التربة الحقيقية . تتضمن المعادلة (4.2.13) بالضرورة زيادة كلاً من المعامل القاطع من إجهاد قدره صفرًا و المعامل المماسي مع  $\sqrt{\sigma_v}$  .

#### Relationship to Wave Velocity

- العلاقة مع السرعة الموجية :-

يظهر الشكل رقم (6.2.13) قيم نمطية من السرعة الموجية المزبدة في الحجم ( Dilatation Wave Velocity ) من خلال الترب الحبيبية . تتزايد السرعة اعتبارياً مع  $(\sigma_v)^{0.25}$  و التي تعني بموجب المعادلة (20.1.13.ج) بضرورة زيادة معامل الحصر مع  $(\sigma_v)^{1/2}$  . مع ذلك يكون المعامل المحتسب من السرعة الموجية المقاسة باستخدام المعادلة (20.1.13.ج) بشكل عام أكبر بكثير من معامل الحصر المقاس مباشرة في الاويدوميتر . يظهر هذا واضحاً في المثال (3.2.13) .

مثال (3.2.13) :-

المعلوم :- السرعة الموجية ضد الإجهاد في الشكل رقم (6.2.13) . و المعامل ضد الإجهاد في الشكل رقم (2.2.13) .

المطلوب :- إيجاد معامل الحصر لاجهاد قدره  $138 \text{ kN/m}^2$  . قارن مع المعامل المقاس مباشرة .

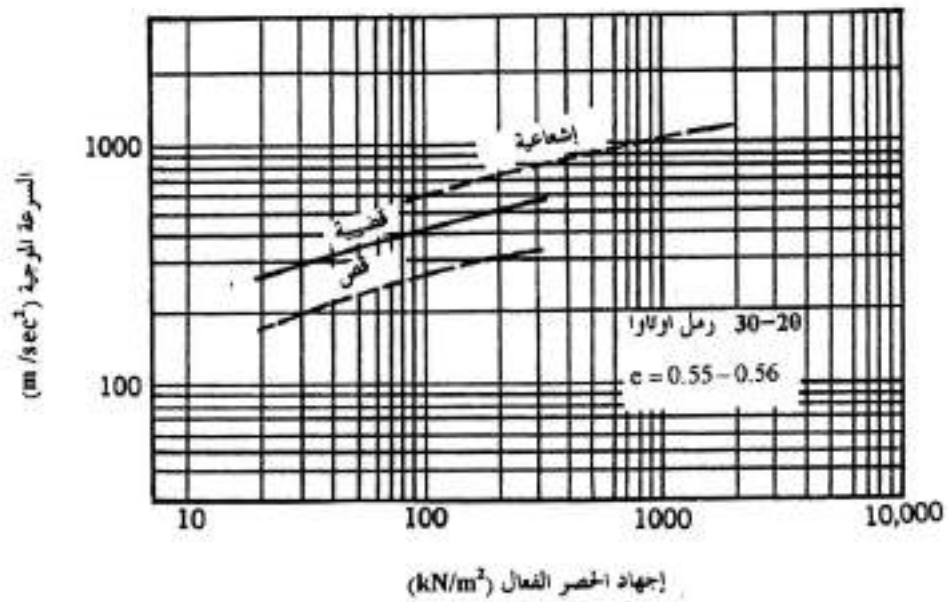
الحل :-

$$C_D = 579 \text{ m/sec} \quad \text{. القيمة النمطية بالنسبة للوزن النوعي } \gamma = 16.5 \text{ kN/m}^2 \text{ أو إن الكثافة } \rho = 1.68 \text{ ton/m}^2$$

$$D = \rho C_D^2 = 1.68 \times 579^2 \times \text{kN/m}^2 = 563205 \text{ kN/m}^2 \\ = 563.2 \text{ MN/m}^2$$

بالمقارنة مع  $207 \text{ MN/m}^2$  المقاسة مباشرة بالايودوميتر .





شكل رقم (6.2.13) السرعة الموجية من خلال الرمل كدالة من إجهاد الحصر. أن السرعتين الإشعاعية والقص هما من ويتمان ولورنس (Whitman and Lawrence-1963) أما السرعة القصية فهي من هاردين وريتشارت (Hardin and Richart - 1963).

ينتج الفرق بسبب الاجهادات الصغيرة المرتبطة مع الموجة الزلزالية ( Seismic Wave ) . هنا تظهر تشوهات مرنة للدقائق بشكل أساسي في حين تسبب الاجهادات الكبيرة المسلطة في فحص الاويدوميتر انزلاقاً بين الدقائق المتجاورة . لقد خططت هذه الحالة في الشكل رقم (8.5.11) . إذا استخدمت إضافات من الإجهاد صغيرة جداً في الاويدوميتر فسوف يصبح المعامل المقاس مباشرة مساوياً تقريباً للمعامل المختسب من السرعة الموجية ( Whitman et al -1964 ) . فضلاً عن ذلك, يكون المعامل المختسب بعد دورات عديدة من التحميل و حتى باستخدام إضافات إجهاد كبيرة مساوياً حوالي للمعامل المختسب من السرعة الموجية (شكل رقم (2.2.13)). . لذلك لا تكون فقط السرعة الموجية مفيدة كقياس مباشر لانضغاطية التربة اثناء تحميل مركز منفرد و لكن كذلك لأنها تظهر الانضغاطية اثناء التحميل المتكررة . هذا يظهر صحيحاً مهما كان تردد ( Frequency ) التحميل المتكرر .

لمعلومات إضافية حول السرعة الموجية راجع هاردين و ريتشارت ( Hardin and Richart - 1963 ) وويتمان ( Whitman - 1966 ) .

### Behavior During

### 3.13 التصرف اثناء الانضغاط ثلاثي المحاور :-

#### Triaxial Compression Test

يعطي فحص ثلاثي المحاور القياسي ( أي مع إجهاد حصر ثابت و إجهاد محوري متزايد ) قياساً مباشراً لمعامل يونغ . يتناقص المعامل مع زيادة الإجهاد المحوري و في قمة منحنى الإجهاد - الانفعال يصبح معامل المماس صفراً . عند ذكر قيمة لمعامل يونغ لتربة ما فيكون اعتيادياً المعامل القاطع من جهد فرقي قدره صفراً إلى آخر قدره نصف أو ثلث إجهاد فرق القمة . يكون هذا مدى شائع للاجهادات العاملة في مسائل الأسس الحقيقية لأنه عادةً يستخدم معامل أمان قدره (2) أو (3) في هذه المسائل . يوضح المثال (1.3.13) احتساب المعامل في منحنى إجهاد - انفعال نمطي .

#### المثال (1.3.13) :-

المعلوم :- منحنى الإجهاد - الانفعال للفحص في الشكل رقم (1.6.11) .

المطلوب :- معامل يونغ القاطع لاجهاد فرقي قدره نصف إجهاد القمة .

الحل :-

$$380 \text{ kN/m}^2 = \Delta\sigma_{\text{في القمة}}$$

$$190 \text{ kN/m}^2 = \Delta\sigma_v \text{ (في المنتصف)}$$

$$0.002 = \Delta\varepsilon_v$$

$$95000 \text{ kN/m}^2 = 95 \text{ MN/m}^2 = E$$

فيما يخص المقياس الذي رسم به هذا المنحني، من الصعوبة التنبؤ فيما لو كان المنحني يتصرف خطياً أو منحنيًا لحد منتصف القمة. مع ذلك تظهر المعلومات الدقيقة جداً المعطاة في الشكل رقم (1.3.13) أن المنحني لا خطي (Nonlinear) منذ بداية التحميل تقريباً. لقد اقترح كوندنر و زلاسكو (Kondner and Zelasko - 1963) إمكانية امرار معادلة قطع ناقص (Hyperbolic Equation) عبر منحنيات الإجهاد - الانفعال لترتبة رملية في انضغاط ثلاثي المحاور قياسي بالشكل الآتي :-

$$(1.3.13) \dots \quad \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1}$$

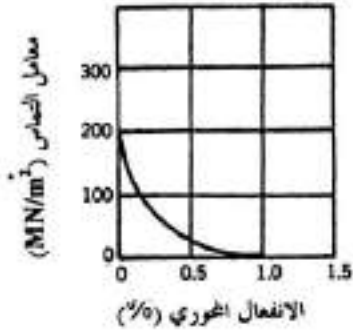
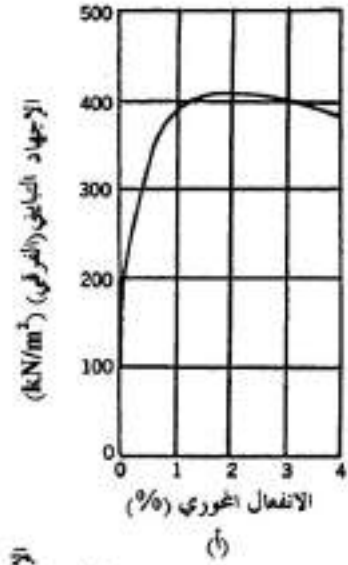
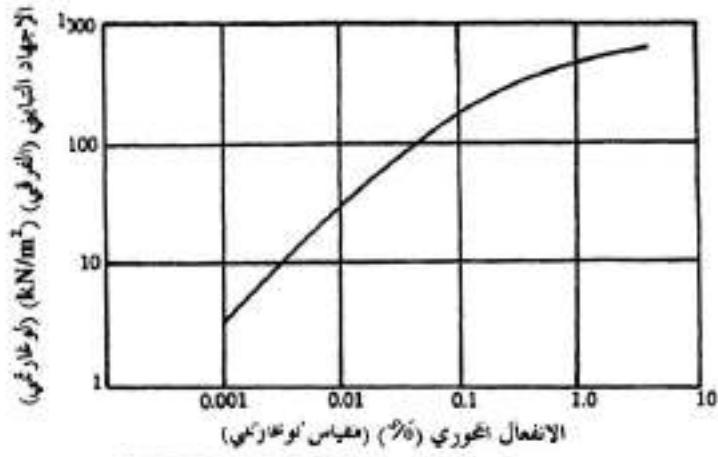
اذ أن a و b هما ثابتان. سوف تناقش هذه في القسم (2.1.6.13).

#### إجهاد الحصر :- Confining Stress

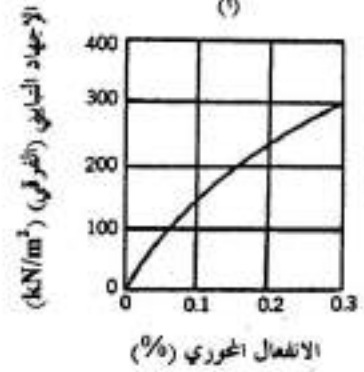
مع زيادة إجهاد الحصر يتزايد المعامل. في الحالة التي يكون بها الإجهاد الابتدائي  $\sigma_0$  متماثلاً يتزايد المعامل مع  $\sigma_0^n$ . يتغير n من 0.4-1.0. يكون معدل القيمة المعقول هو n=0.5. تنطبق القيم الأكبر من الأس على الترب الرملية السائبة. في اغلب المسائل العملية، لا تكون الاجهادات قبل التحميل متماثلة. إن تأثير الحالة الحقيقية للإجهاد على المعامل غير واضحة ولكن افضل فكرة متوفرة هي اعتماد المعامل على معدل الاجهادات الرئيسية الابتدائية. لذلك :-

$$(2.3.13) \dots \quad E \approx \sqrt{\sigma_v \frac{1+2K_0}{3}}$$

اذ أن  $K_0$  هو معامل الإجهاد الجانبي في حالة السكون. تكون المعادلة (2.3.13) صحيحة فقط عندما  $0.5 < K_0 < 2$  وعندما يكون معامل الأمان (Factor of Safety) ضد الفشل أو (الإخفاق) (Failure) هو (2) أو اكثر.



(ج)



(د)

(ب)

شكل رقم (1.3.13) معلومات الإجهاد-الانفعال من فحص ثلاثي المحاور. ملاحظة :- رمل متوسط  
 مادون الزاوية: المسامية = 0.39 . إجهاد الحصر =  $98.5 \text{ kN/m}^2$  (من شين 1948 - Chen).

### عوامل أخرى :-

يكون تأثير نسبة الفراغ والتركيب وتاريخ الإجهاد ومعدل التحميل على E هو نفسه كما يتأثر بها D. يبين الجدول رقم (1.3.13) التأثير العام لنسبة الفراغ والتركيب على E لتحميل أولي لمنتصف فرق إجهاد القمة . يعطي جدول رقم (2.3.13) قيم من E مستحصلة بعد عدة دورات من التحميل . تكون القيم في الجدول رقم (2.3.13) معبرة عن المعامل المماسي الابتدائي وعن المعامل المحتسب من سرعة موجة القضيب ( Rod Wave Velocity ) .

من المرغوب به مقارنة هذه القيم من E للمعادن التي تتألف منها دقائق التربة الحبيبية مع حديد وألمنيوم (انظر الجدول رقم (3.3.13)). سوف تكون الانضغاطية الكبيرة هي في التربة والتي هي نتيجة عن طبيعتها الدقائقية و هي واضحة في هذه المقارنة .

### Poisson's Ratio

### نسبة بوزون :-

بالإمكان تقدير نسبة بوزون من نسبة الانفعال الجانبي ( Lateral Strain ) إلى الانفعال المحوري ( Axial Strain ) اثناء فحص انضغاط ثلاثي المحاور مع تحميل محوري . لقد اظهر الشكل رقم (1.6.11) قيم من هذه النسبة لمراحل مختلفة اثناء فحص نمطي . اثناء المدى الأولي من الانفعال اذ تستخدم الأفكار من نظرية المرونة تتغير نسبة بوزون مع الانفعال . تصبح قيمة نسبة بوزون للتراب الرملية ثابتة فقط للانفعالات الكبيرة ( Large Strains ) التي تتضمن الفشل و عندها يكون لها قيمة أكبر من 0.5 . تعني قيمة كهذه من  $\mu$  زيادة في حجم المادة اثناء فحص ثلاثي المحاور ( انظر المثال 1.1.13) . تكون قيمة نسبة بوزون اقل من 0.5 فقط اثناء المراحل الابتدائية من فحص كهذا اذ يتناقص حجم النموذج .

بسبب هذا التصرف, من الصعب جداً عمل تقييم دقيق لقيمة  $\mu$  التي سوف تستخدم في أية مسألة. لحسن الحظ يكون لقيمة  $\mu$  اعتيادياً تأثيراً صغيراً نسبياً على التوقعات الهندسية . فيما يخص المراحل الابتدائية من التحميل الأولي لتربة رملية التي عنده تصبح إعادة ترتيب الدقائق مسألة مهمة فتكون عندها قيم نمطية من  $\mu$  قدرها حوالي 0.1 - 0.2 . اثناء التحميل الدوراني ( Cyclic Loading ) تصبح قيمة  $\mu$  ثابتة اذ تقع بين 0.3 - 0.4 . غالباً ما تستخدم النسبة لسرعتين موجيتين من نوعين مختلفين في تقدير قيمة  $\mu$  التي سوف تطبق للتحميل الدوراني .

جدول رقم (1.3.13) معامل يونغ للتحميل الابتدائي.

كثيفة (MN/m <sup>2</sup> )	سائبة (MN/m <sup>2</sup> )	
35	14	دقاتق زاوية ، قابلة للكسر
105	56	دقاتق صلبة ، مدورة

ملاحظة :- معامل القطع إلى منتصف فرق إجهاد حصر قدره 101.3 kN/m<sup>2</sup> ( 1 جو ) .

جدول رقم (2.3.13) معامل يونغ للتحميل المتكررة.

معامل يونغ (MN/m <sup>2</sup> )		
كثيف	مفكك	تربة ( تحت ضغط حصر قدره 101.3 kN/m <sup>2</sup> ( 1 جو ) ) .
207	117	كوارتز منخول مهشم ، ناعم ذو زوايا
310	179	رمل اوتاوا منخول ، ناعم مدور
669	207	رمل اوتاوا القياسي ، متوسط مدور
241	138	رمل منخول ، متوسط مادون الزاوية
186	124	كوارتز منخول مهشم ، متوسط ذو زوايا
193	103	رمل متدرج بشكل جيد ، خشن مادون الزاوية

جدول رقم (3.3.13) نسبة بوزون و معامل يونغ لمواد مختلفة

المادة	نسبة بوزون	معامل يونغ (MN/m <sup>2</sup> )
امفيولايت	0.30-0.28	10 <sup>3</sup> ×121.4-93.8
انهايدرايت	0.30	10 <sup>3</sup> ×68.3
دايايس	0.30-0.27	10 <sup>3</sup> ×116.5-86.9
دايوراييت	0.29-0.26	10 <sup>3</sup> ×107.6-75.2
دولومايت	0.30	10 <sup>3</sup> ×121.3-110.3
ديونايت	0.28-0.26	10 <sup>3</sup> ×182.7-148.9
نيس فلدسباري	0.20-0.15	10 <sup>3</sup> ×118.6-82.7
جابرو	0.31-0.27	10 <sup>3</sup> ×126.9-88.9
غرانيت	0.27-0.23	10 <sup>3</sup> ×86.2-73.1
ثلج	0.36	10 <sup>3</sup> ×7.10
الحجر الجيري	0.30-0.27	10 <sup>3</sup> ×107.6-86.9
ماريل	0.30-0.27	10 <sup>3</sup> ×107.6-86.9
مايكاسشت	0.20-0.15	10 <sup>3</sup> ×101.4-79.3
اريسيديان	0.18-0.12	10 <sup>3</sup> ×80.0-64.8
اوليكو كلاسايت	0.29	10 <sup>3</sup> ×84.8-80.0
كوارتزاييت	0.15-0.12	10 <sup>3</sup> ×96.5-82.1
حجر ملحي	0.25	10 <sup>3</sup> ×35.4
سلايت	0.20-0.15	10 <sup>3</sup> ×112.4-79.3
ألنيوم	0.36-0.34	10 <sup>3</sup> ×75.8-55.2
حديد	0.29-0.28	10 <sup>3</sup> ×200.0

Simple Shear - القص البسيط :-

يجد معامل القص للتربة استخداماً واسعاً بالأخص مع مسائل اهتزاز الأسس اذ يقيّم اعتيادياً من خلال قياس سرعة القص الموجية .

لقد بين الشكل رقم (6.2.13) التغير النمطي من سرعة موجة القص مع إجهاد الحصر . يظهر الشكل رقم (1.4.13) تأثير نسبة الفراغ . تؤثر عوامل مثل الانضغاطية على  $C_s$  بوساطة التأثير على نسبة الفراغ . بالإمكان استخدام الشكل رقم (1.4.13) على مدى واسع و مختلف من الترب الحبيبية .

كما في حالي معامل الحصر و معامل القضيبي يكون معامل القص المستحصل عليه من تحميل متكرر ساكن للغايات العملية مساوياً إلى المعامل المحتسب عن السرعة الموجية لنفس الإجهاد الابتدائي . يكون هذا صحيحاً للاجهادات التي هي اقل بكثير عن تلك المرتبطة مع الفشل . بالإمكان اخذ إجهاد الحصر مساوياً إلى :-

$$\frac{\sigma_v}{3}(1 + 2K_0)$$

Special Triaxial Tests

فحوص ثلاثية محاور خاصة :-

في سبيل نسخ نوع التحميل المتوقع ضمن كتلة التربة الحقيقية, غالباً ما يتغير كلاً إجهاد الحصر والإجهاد المحوري خلال فحص ثلاثي المحاور . باستخدام المعادلات التي اشتقت في المثال (2.1.13), بالإمكان استخدام قيمتي  $E$  و  $\mu$  المحتسبتين من فحص كهذا . يظهر المثال (1.4.13) هذه النقطة .

مثال (1.4.13) :-

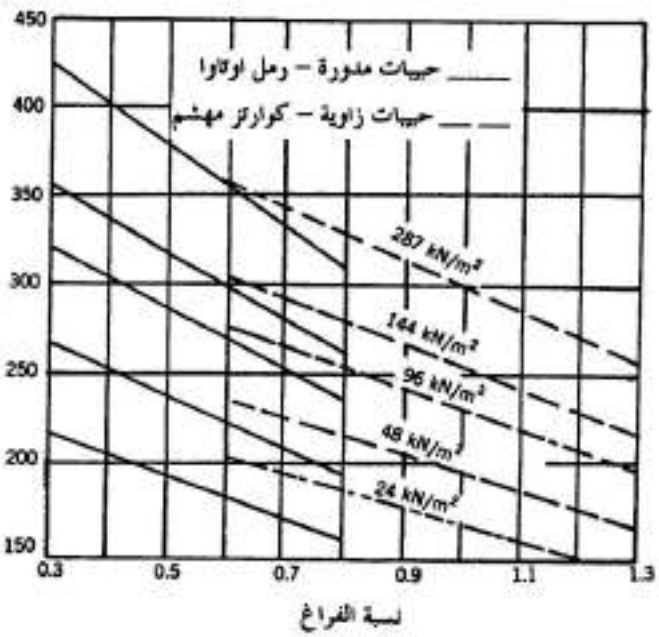
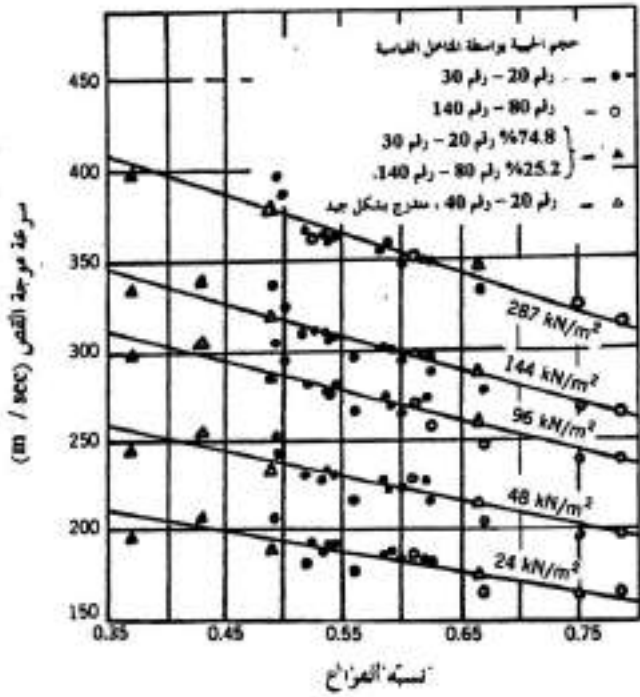
المعلوم :- المعلومات المعطاة من الفحص B من الشكلين رقم (2.7.11 و 4.7.11) .  
المطلوب :- جد  $E$  و  $\mu$  في نهاية الفحص الأولي .

الحل :-

تكون الخطوة الأولى هي إيجاد قيمتي  $\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_v$  و  $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_h$  .

$$\Delta\sigma_z = \Delta s + \Delta t = 152 + 81 = 233$$





شكل رقم (1.4.13) سرع موجة القص من خلال رمال الكوارتز (من هاردين و ريتشارت 1963 - Hardin and Richart).

$$\Delta\sigma_x = \Delta s - \Delta t = 152 - 81 = 71$$

تكون الانفعالات من هذا التحميل هي :-

$$\Delta\varepsilon_z = 0.00268$$

$$\Delta\varepsilon_x = 0.00020$$

لذلك ومن المثال (2.1.13) :-

$$\begin{aligned} E &= \frac{(233 + 2 \times 71)(162)}{71(0.00268 - 0.0004) + 233(0.00268)} \\ &= \frac{375(162)}{0.162 + 0.625} = 77200 \text{ kN/m}^2 \\ \mu &= \frac{71(0.00268) - 0.00020(233)}{0.787} \\ &= \frac{0.189 - 0.047}{0.787} = 0.18 \end{aligned}$$

### Constitutive Relationships

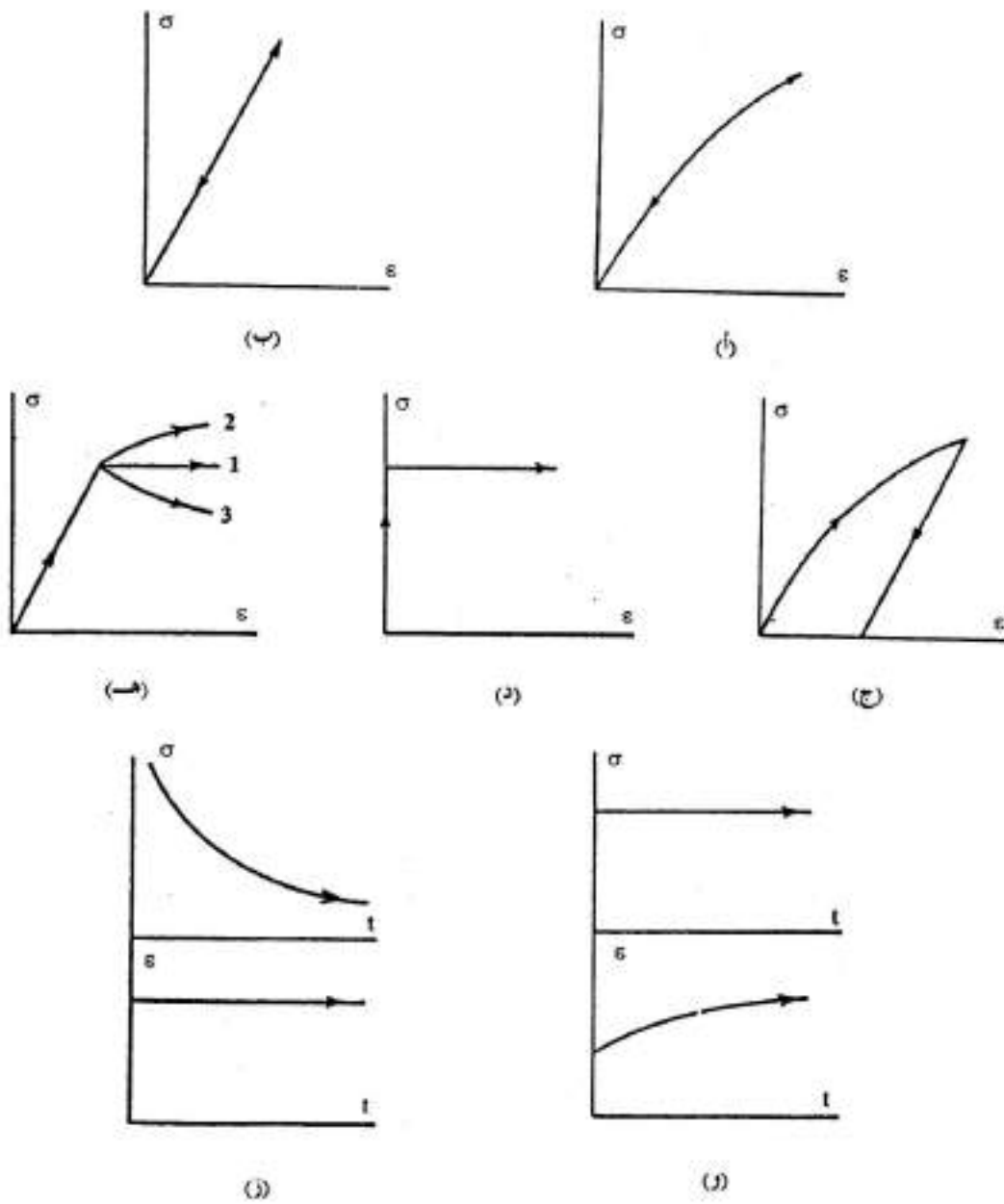
### 5.13 العلاقات التكوينية :-

أنواع تصرف الإجهاد - الانفعال :-

يظهر الشكل رقم (1.5.13) أنواع متعددة من منحنيات الإجهاد - الانفعال التي قد تنتج عن فحص انضغاط بنموذج اسطواني . يظهر الشكل رقم (1.5.13.أ) منحنى تحميل مطابق لمنحني إزالة ثقل . تسترجع كافة الانفعالات عند إزالة الثقل . هذا هو التصرف المرن ( Elastic ) . إذا كانت العلاقة الخطية كما في الشكل رقم (1.5.13.ب) فتدعى المادة عندئذٍ مرنة خطياً ( Linearly Elastic ) .

عندما لا تسترجع بعض الانفعالات عند إزالة الثقل كما في شكل رقم (1.5.13.ج) تدعى الانفعالات عندئذٍ غير المسترجعة بالانفعالات اللدنة ( Plastic Strains ) اذ يكون تصرف المادة لدناً . يظهر الشكل رقم (1.5.13.د) تصرفاً صلباً - لدناً ( Rigid - Plastic ) اذ لا تتواجد انفعالات مستعادة ( Recoverable Strains ) .

هناك عادةً بعض الانفعالات المستعادة فضلاً عن أخرى غير مستعادة ( Irrecoverable ) (شكل رقم (1.5.13.ج)) و التي تؤدي إلى تصرف لدن و مرن بمستوي الإجهاد نفسه ( Elasto-plastic ) .



شكل رقم (1.5.13) أنواع تصرف الإجهاد-الانفعال : (أ) مرن لا خطي. (ب) مرن خطي. (ج) غير مرن أو لسدن . (د) صلب، لدن بمطالة. (هـ) لدن ومرن في نفس مستوي الإجهاد : (1) لدن بمطالة (2) انفعال تصليبي (3) انفعال تليسي (و) زحف مرن لزوج تحت إجهاد ثابت . (ز) استرخاء مرن لزوج تحت انفعال ثابت .

في المثال في الشكل رقم (1.5.13 هـ)، هناك ثلاثة أنواع من التصرف المرن و اللدن الخطي الذي يتميز بوساطة التصرف بعد وصول الاجهادات إلى إجهاد الإذعان ( Yield Stress )  $\sigma_y$  . يكون المنحني (1) هو حالة اللدونة بشكل تام ( Perfectly Plastic ) . لا يتأثر إجهاد الإذعان بالانفعالات في المدى اللدن . يكون المنحني (2) حالة انفعال تصليبي ( Strain Hardening ) في حين يكون المنحني (3) هو في حالة انفعال استرخاء ( تليين ) ( Strain Softening ) .

تتضمن كافة الحالات في أعلاه انفعالات و اجهادات تقع بشكل آني . للمواد اللزجة ( Viscous ) و اللزجة و المرنة بمستوي الاجهاد نفسه ( Visco-elastic ) انفعالات تتكوّن بينما يكون الثقل ثابتاً (شكل رقم (1.5.13 و)) أو اجهادات تتناقص بينما يبقى الانفعال ثابتاً (شكل رقم (1.5.13 ز)) . للمواد اللزجة و المرنة الخطية علاقة خطية بين الإجهاد و الانفعال في زمن معطى . بكلمات أخرى إذا سلط الثقل بفترة زمنية قدرها  $t$  يتكوّن بعض الانفعال و إذا سلط ضعف الثقل بنفس الفترة التي قدرها  $t$  يتكون ضعف ذلك الانفعال . لا يكون هناك ابدأ تقريباً علاقة خطية بين الإجهاد و الانفعال من جانب و الزمن من جانب آخر .

#### Stress and Strain Tensors

المصفوفتان المتجهتان للإجهاد و الانفعال :-

تكون المصفوفة المتجهة للإجهاد ( Stress Tensor ) بالاتجاهات الثلاثة العامة لعنصر من التربة في الموقع بالشكل الآتي (شكل رقم (2.5.13 أ)) :-

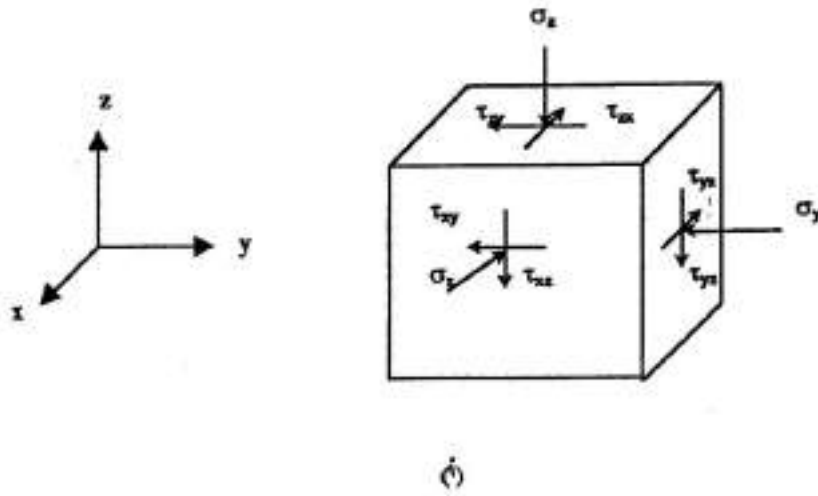
$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

شبيهاً بذلك تكون المصفوفة المتجهة للانفعال ( Strain Tensor ) بالاتجاهات الثلاثة العامة هي (شكل رقم (2.5.13 ب)) :-

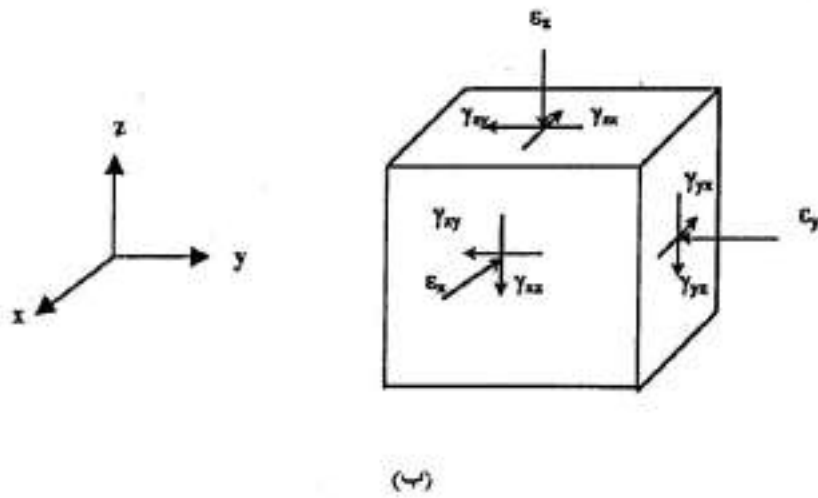
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

تتطلب معادلة اتزان عزوم الزاوية ( Equation of Balance of Angular Momentum ) ما يلي :-

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} , \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} , \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$



التفافية (عرف) الإشارة للإجهاد في ميكانيك التربة



التفافية (عرف) الإشارة للانفعال في ميكانيك التربة.

شكل رقم (2.5.13) تعريف الاجهادات و الانفعالات بالاتجاهات الثلاثة.

في ذات الوقت و فيما يخص الانفعالات :-

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} , \quad \gamma_{xz} = \gamma_{zx} , \quad \gamma_{yz} = \gamma_{zy}$$

لذلك بالإمكان التعبير عن المصفوفة المتجهة للإجهاد بالاتجاهات الثلاثة بشكل كامل بواسطة المتجه

( Vector ) الآتي :-

$$[\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]$$

شبيهاً بذلك بالإمكان التعبير عن المصفوفة المتجهة للانفعال بالاتجاهات الثلاثة بشكل كامل بواسطة

المتجه الآتي :-

$$[\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]$$

تكون العلاقة بين الإجهاد و الانفعال ( المسبب و النتيجة - Cause and Effect ) هي العلاقة التكوينية

( Constitutive Relation ) للترية أو ما تسمى بعلاقة الإجهاد - الانفعال ( Stress - Strain )

-( Relationship

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}_{6 \times 1} = [D]_{6 \times 6} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}$$

تدعى المصفوفة [D] بالمصفوفة التكوينية ( Constitutive Matrix ) للترية . سوف يحتزل متجه الإجهاد

في المسائل ذات البعدين بالشكل الآتي :-

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_z \end{bmatrix} \text{ و يكون عندئذ متجه الانفعال هو } \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} \text{ المقابل له .}$$

سوف تصبح عندئذ العلاقة التكوينية في المسائل ذات البعدين :-

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_z \end{bmatrix}_{4 \times 1} = [D]_{4 \times 4} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \varepsilon_z \end{bmatrix}_{4 \times 1}$$

### المرونة الخطية: - Linear Elasticity

تكون العلاقات الأساسية بين الإجهاد والانفعال التي تعتمد عليها علاقات أخرى في أحيان كثيرة هي تلك للمرونة الخطية . لأغلب الغايات العددية, يكون من المفيد كتابة الاجهادات والانفعالات بكميات متجهة كما بين في الفصلين التاسع و الحادي عشر :-

$$(1.5.13) \dots \{\sigma\}^T = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}]$$

$$(2.5.13) \dots \{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]$$

عندما تنطبق حالات الانفعال المستوي فبالإمكان عندئذٍ اختزال المتجهين بالشكل الآتي :-

$$(3.5.13) \dots \{\sigma\}^T = [\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}]$$

$$(4.5.13) \dots \{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}]$$

بما أن هناك ستة مركبات مستقلة من الإجهاد و ستة من الانفعال, سوف نحتاج في أكثر الحالات عامة إلى ستة و ثلاثين معاملاً للربط بينهم خطأً . مع ذلك بواسطة الأخذ بنظر الاعتبار الطاقة المخزونة في جسم مرن خطي يتعرض للانفعال فبالإمكان أن نظهر وجوب تكوّن المعاملات بمصفوفة متناظرة ( Symmetric Matrix ) . يجب أن يكون الحد الرابط بين مثلاً  $\sigma_x$  و  $\varepsilon_y$  نفس ذلك الذي يربط بين  $\sigma_y$  إلى  $\varepsilon_x$  . يختزل هذا التناظر في علاقة الإجهاد - الانفعال عدد الحدود المستقلة إلى 21 . بالإمكان التعبير عن العلاقة على شكل المصفوفة التالية :-

$$(5.5.13) \dots \{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$$

اذ أن :-

$$(6.5.13) \dots [D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ & & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ \text{Sym.} & & & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ & & & & D_{55} & D_{56} \\ & & & & & D_{66} \end{bmatrix}$$

سوف يختزل عدد الحدود المستقلة بشكل كبير بواسطة اعتبار مستويات أو محاور التماثل في أعلاه . في الهندسة الجيوتكنيكية (او هندسة تقنيات الارض) (Geotechnical Engineering), تكون أكثر نوعيتين شائعتين في الاستخدام هما التماثل الكلي (Complete Isotropy) واللاتماثل العكسي ( Cross Anisotropy) . ينطبق اللاتماثل العكسي عندما يكون هناك مستويًا ( أفقيًا اعتياديًا ) اذ تكون كافة علاقات الإجهاد - الانفعال به متماثلة أي سوف لا يفرق كيفية اختيار المحاور ضمن المستوي وتكون عندها ثوابت المرونة نفسها . تكون ثوابت المرونة للاجهادات والانفعالات خارج المستوي مختلفة . يكون للمصفوفة [ D ] الناتجة خمسة ثوابت مستقلة . إذا كان محور z عمودياً على المستوي المتماثل فسوف تصبح المصفوفة :

$$(7.5.13) \dots [D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{11} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{13} & D_{13} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{11} - D_{12} \end{bmatrix}$$

يحدث التماثل الكلي عندما يتم اختيار المحاور عشوائياً اذ لن يكون هناك تأثيراً على ثوابت المرونة . عندئذٍ يكون للمصفوفة [D] حدين مستقلين فقط وتصبح عندئذٍ :-

$$(8.5.13) \dots [D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{12} & D_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} - D_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{11} - D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{11} - D_{12} \end{bmatrix}$$

بالإمكان التعبير عن الثوابت بدلالة عدة متغيرات مختلفة . تكون أكثرها شيوعاً هي الآتية :-

1. معامل يونغ ( Young's Modulus ) E :- يربط بين الانفعال المحوري والإجهاد المحوري تحت فحص شد أو انضغاط بسيط .

$$(9.5.13) \dots \sigma_x = E \varepsilon_x$$



اذ تكون كافة الاجهادات الأخرى مساوية للصفر .

2. نسبة بويزون (Poisson's Ratio)  $\mu$  :- تربط هذه بين الانفعال المحوري والانفعال العمودي الجانبي في فحص شد أو انضغاط بسيط .

$$(10.5.13) \dots \quad \varepsilon_y = \varepsilon_z = -\mu\varepsilon_x$$

اذ تكون كافة الاجهادات الأخرى صفراً ماعدا  $(\sigma_x \neq 0)$  .

3. معامل القص (Shear Modulus) :- تربط هذا بين إجهاد القص وانفعال القص .

$$(11.5.13) \dots \quad \sigma_{xy} = 2G\varepsilon_{xy} + G\gamma_{xy}$$

4. معامل التضخم (Bulk Modulus) B :- تربط هذا بين الانفعال الحجمي ومعدل الإجهاد أو الإجهاد الثماني .

$$(12.5.13) \dots \quad \sigma_{oct} = B\varepsilon_v$$

5. ثابتا لامى (Lame's Constants)  $\lambda$  و  $G$  :- تربط هذان بين الاجهادات والانفعالات بالشكل الآتي :-

$$(13.5.13) \dots \quad \sigma_x = \lambda\varepsilon_v + 2\mu\varepsilon_x$$

(مع معادلات شبيهة فيما يخص الاجهادين  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$ ) و :-

$$(14.5.13) \dots \quad \tau_{xy} = 2G\gamma_{xy}$$

(مع معادلات شبيهة فيما يخص اجهادات القص الأخرى) .

معامل الحصر (Constrained Modulus) D ، :-

يربط هذا بين الانفعال المحوري والإجهاد المحوري عندما يكون الانفعالات المحوريان الآخران مبقيين صفراً :-

$$\sigma_x = D\varepsilon_x$$

اذ يكون الانفعالات الأخران  $\varepsilon_y$  و  $\varepsilon_z$  مساويين للصفر . تظهر العلاقات الآتية بين هذه الثوابت

:-

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad B = \frac{E}{3(1-2\mu)} = \lambda + \frac{2}{3}G$$

(15.5.13) ...

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad D = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

بالإمكان التعبير عن علاقة الإجهاد - الانفعال بطرق عدة ولكن أكثرها فائدة هي الآتية :-

$$(16.5.13) \dots [D] = \frac{E}{(1+\mu)(1-\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\mu \end{bmatrix}$$

و

$$(17.5.13) \dots [D] = \begin{bmatrix} B + \frac{4}{3}G & B - \frac{2}{3}G & B - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ B - \frac{2}{3}G & B + \frac{4}{3}G & B - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ B - \frac{2}{3}G & B - \frac{2}{3}G & B + \frac{4}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G \end{bmatrix}$$

و

$$(17.5.13) \text{ (ب)} \dots [D] = \begin{bmatrix} D & D-2G & D-2G & 0 & 0 & 0 \\ D-2G & D & D-2G & 0 & 0 & 0 \\ D-2G & D-2G & D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G \end{bmatrix}$$

فيما يخص حالات الانفعال المستوي يكون كل من  $\varepsilon_{yz}$  و  $\varepsilon_{xz}$  و  $\varepsilon_{zz}$  مساوياً إلى الصفر اذ تصيح  
علاقة الإجهاد - الانفعال :-

$$(18.5.13 أ) \dots \quad \{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$$

$$(18.5.13 ب) \dots \quad \{\sigma\}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}] \cdot \{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}]$$

$$(19.5.13) \dots \quad [D] = \begin{bmatrix} B + \frac{4}{3}G & D - \frac{2}{3}G & 0 \\ B - \frac{2}{3}G & D + \frac{4}{3}G & 0 \\ 0 & 0 & 2G \end{bmatrix} = \frac{E}{(1-\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & 0 \\ 0 & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\mu \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} D & D-2G & 0 \\ D-2G & D & 0 \\ 0 & 0 & 2G \end{bmatrix}$$

بالإمكان كتابة هذه العلاقات كذلك و بالصيغة المعكوسة ( Inverse Form ) :-

$$(20.5.13 أ) \dots \quad \{\varepsilon\} = [C]\{\sigma\}$$

اذ أن

$$(20.5.13 ب) \dots \quad [C] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\mu \end{bmatrix}$$

أما فيما يخص حالة الإجهاد المستوي ( Plane Stress Case ) فسوف يكون عندئذ

$$-: \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

واخيراً في حالة التماثل المحوري ( Axisymmetric Case ) فسوف تكون العلاقة التكوينية بالشكل الآتي:-

$$\begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{bmatrix}$$

المثال (1.5.13):-

المعلوم :- نموذج تربة طينية من نوع (CL) حسب تصنيف كاساغراندي من منطقة الزعفرانية جنوب بغداد في العراق تم فحصه مختبرياً تحت حالة انضغاط ثلاثي المحاور من النوع المنضغ الميزول (CD) اذ تم تعريض النموذج إلى إجهاد خلية مقداره  $100 \text{ kN/m}^2$ . وكانت نتائج الفحص كما مبين في شكل مثال (1.5.13)، (نصير حميد السعدي، 1989).

وجد أن لهذا النموذج الخواص الآتية :

$$e_o = 0.70 \quad , \quad w = 24.3\% \quad , \quad G_s = 2.7$$

$$k_o = 0.60 \quad , \quad \mu = 0.45$$

اخذ هذا النموذج من عمق 5 m تحت مستوى سطح الأرض، ثم سلط حملاً مقداره  $400 \text{ kN/m}^2$  فوق مساحة تحميل دائرية قطرها 10 m اذ يقع هذا النموذج تحت خط محور هذا الحمل .

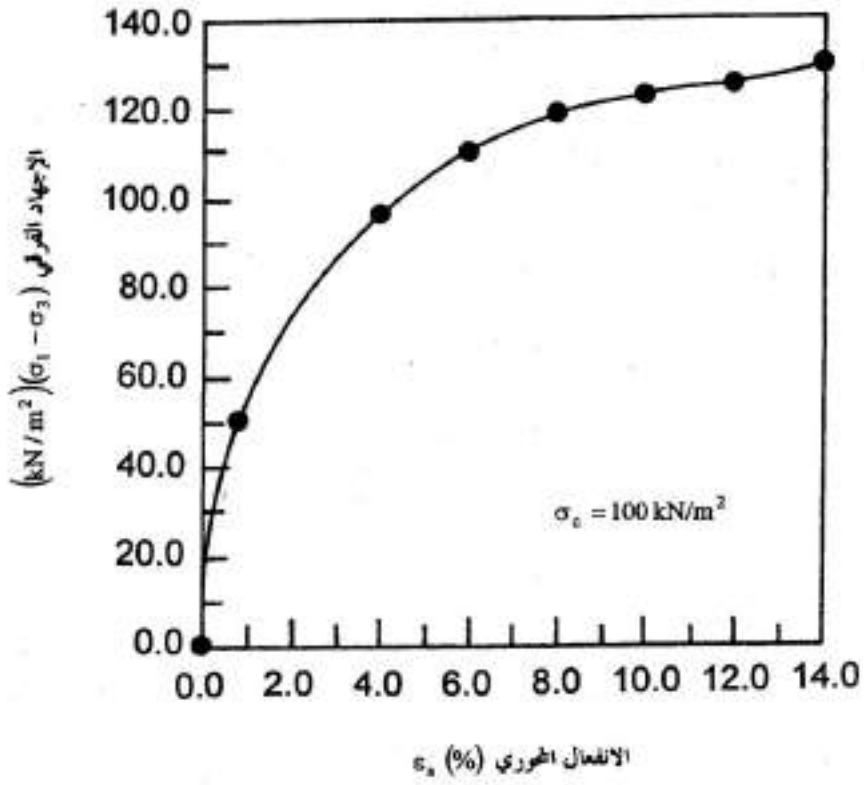
المطلوب :- حساب الانفعالات الناتجة في هذا النموذج على افتراض:

1. أن حالة التحميل هي انفعال مستوي Plane Strain .
  2. أن حالة التحميل هي تماثل محوري Axisymmetric Condition .
  3. أن حالة التحميل ثلاثية الأبعاد Three-Dimensional Condition .
- افتراض أن منسوب الماء الجوفي هو بمستوى سطح الأرض .

الحل :-

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{1+w}{1+e} G_s \gamma_w$$

$$= \frac{1+0.243}{1+0.70} \times 2.7 \times 9.81 = 19.37 \text{ kN/m}^2$$



شكل مثال (1.5.13) نتائج فحص ثلاثي محاور منظم غير موزون على تربة طينية من الزعفرالية في بغداد (بعد السعدي 1989 - al-Saady).

أ. الاجهادات الارضية الساكنة Geostatic Stresses

$$\sigma'_{vg} = (19.37 - 9.81) \times 5 = 47.8 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_{hg} = 0.6 \times 47.8 = 28.68 \text{ kN/m}^2$$

ب. الاجهادات الناتجة عن الحمل الخارجي :

باستعمال الشكل رقم (3.4.9) :

$$\frac{Z}{R} = \frac{5}{5} = 1, \quad \frac{X}{R} = 0$$

$$\frac{\Delta\sigma_v}{\Delta q_s} = 0.64, \quad \therefore \Delta\sigma_v = 400 \times 0.64 = 256 \text{ kN/m}^2$$

و باستعمال الشكل رقم (3.4.9) :-

$$\frac{\Delta\sigma_3}{\Delta q_s} = 0.1, \quad \therefore \Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_h = 0.1 \times 400 = 40 \text{ kN/m}^2$$

بجمع الاجهادات من الفقرتين (أ) و (ب) :-

$$\sigma'_v = 47.8 + 256.0 = 303.8 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_h = 28.68 + 40.0 = 68.68 \text{ kN/m}^2$$

و من علاقة الإجهاد - الانفعال في شكل مثال (1.5.13) يمكن الحصول على قيمة معامل المرونة المماسي الابتدائي  $E_o$  .

$$E_o = \frac{140}{0.01} = 14000 \text{ kN/m}^2$$

1. حالة الانفعال المستوي :- Plane Strain

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}$$

$$\sigma_z = \sigma_v' = 303.8 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_x = \sigma_h' = 68.68 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau_{xz} = 0$$

$$\begin{Bmatrix} 68.68 \\ 303.80 \\ 0.0 \end{Bmatrix} = \frac{14000(1-0.45)}{(1+0.45)(1-2 \times 0.45)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{0.45}{1-0.45} & 0 \\ \frac{0.45}{1-0.45} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2 \times 0.45}{2(1-0.45)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}$$

و عند إجراء عكس المصفوفة نحصل على :-

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.694 \times 10^{-5} & -4.6607 \times 10^{-5} & 0 \\ -4.6607 \times 10^{-5} & 5.6964 \times 10^{-5} & 0 \\ 0.0 & 0 & 2.0714 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 68.68 \\ 303.80 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

و عليه ينتج عن ضرب المصفوفتين :-

$$\varepsilon_x = -1.0247 \times 10^{-2}$$

$$\varepsilon_z = 1.4105 \times 10^{-2}$$

$$\gamma_{xz} = 0$$

Axisymmetric Condition

2. حالة التماثل المحوري :-

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_h' = 68.68 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_z = \sigma_v' = 303.8 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{Bmatrix} 68.68 \\ 303.8 \\ 0.0 \\ 68.68 \end{Bmatrix} = \frac{14000(1-0.45)}{(1+0.45)(1-2 \times 0.45)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{0.45}{1-0.45} & 0 & \frac{0.45}{1-0.45} \\ \frac{0.45}{1-0.45} & 1 & 0 & \frac{0.45}{1-0.45} \\ 0 & 0 & \frac{1-2 \times 0.45}{2(1-0.45)} & 0 \\ \frac{0.45}{1-0.45} & \frac{0.45}{1-0.45} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix}$$

و عند إجراء عكس المصفوفة نحصل على :-

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -7.1428 \times 10^{-5} & -3.2143 \times 10^{-5} & 0 & -3.21428 \times 10^{-5} \\ -3.2143 \times 10^{-5} & 7.1428 \times 10^{-5} & 0 & -3.21428 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 2.0714 \times 10^{-4} & 0 \\ -3.21428 \times 10^{-5} & -3.21428 \times 10^{-5} & 0 & 7.1428 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 68.68 \\ 303.8 \\ 0.0 \\ 68.68 \end{Bmatrix}$$

و عليه ينتج عن ضرب المصفوفتين :-

$$\varepsilon_r = -7.0668 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_z = 1.7285 \times 10^{-2}$$

$$\gamma_{rz} = 0, \quad \varepsilon_\theta = -7.0668 \times 10^{-7}$$

### Three - Dimensional Condition

### 3. حالة التحميل ثلاثية الأبعاد :-

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}$$

$$\sigma_x = \sigma_y = 68.68 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_z = 303.8 \text{ kN/m}^2, \quad \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

$$\begin{Bmatrix} 68.68 \\ 68.68 \\ 303.8 \\ 0.0 \\ 0.0 \\ 0.0 \end{Bmatrix} = \frac{14000}{(1+0.45)(1-2 \times 0.45)} \begin{bmatrix} 1-0.45 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0.45 & 1-0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0.45 & 0.45 & 1-0.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2 \times 0.45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2 \times 0.45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2 \times 0.45 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}$$

وعند إجراء عكس للمصفوفة نحصل على :-

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1.413 \times 10^{-7} & 1.51827 \times 10^{-7} & 0 & 0 & 0 \\ 3.4087 \times 10^{-7} & 1 & 1.51827 \times 10^{-7} & 0 & 0 & 0 \\ 3.2108 \times 10^{-7} & 1.5664 \times 10^{-7} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 68.68 \\ 68.68 \\ 303.80 \\ 0.0 \\ 0.0 \\ 0.0 \end{Bmatrix}$$

وعليه ينتج عن ضرب المصفوفتين :



$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= -7.0668 \times 10^{-3} \\ \varepsilon_y &= -7.0668 \times 10^{-3} \\ \varepsilon_z &= 1.7285 \times 10^{-2} \\ \gamma_{xy} &= 0 \quad , \quad \gamma_{yz} = 0 \quad , \quad \gamma_{zx} = 0\end{aligned}$$

### 6.13 النمذجة العددية لتصرف الإجهاد - الانفعال :-

إن التربة هي مادة لا خطية . تكون العلاقات بين الإجهاد و الانفعال أكثر تعقيداً من تلك للمواد المرنة الخطية البسيطة الموصوفة في الأقسام السابقة . لذلك في سبيل تمثيل مسائل الهندسة الجيوتكنيكية بشكل واقعي يجب استخدام شكل معين من علاقة لا خطية و لقد كان تطوير علاقات كهذه واحدة من الأشياء المهمة في البحوث في السنوات الأخيرة .

يمكن تقسيم الوسائل المختلفة لتعريف التصرف التكويني للترب و الصخور إلى ثلاثة مجاميع مختلفة:-  
1. تمثيل منحنيات الإجهاد - الانفعال المعطاة بوساطة طرق امرار المنحنيات أو الاستكمال أو استخدام دوال رياضية .

2. نظريات المرونة اللاخطية ( Nonlinear Elasticity ) .

3. نظريات اللدونة ( Plasticity Theories ) .

### 1.6.13 وسائل امرار المنحنيات :- Curve Fitting Techniques

#### 1.1.6.13 النماذج الخطية المزدوجة أو الخطية المتعددة :- Bilinear and Multi-Linear

##### Models

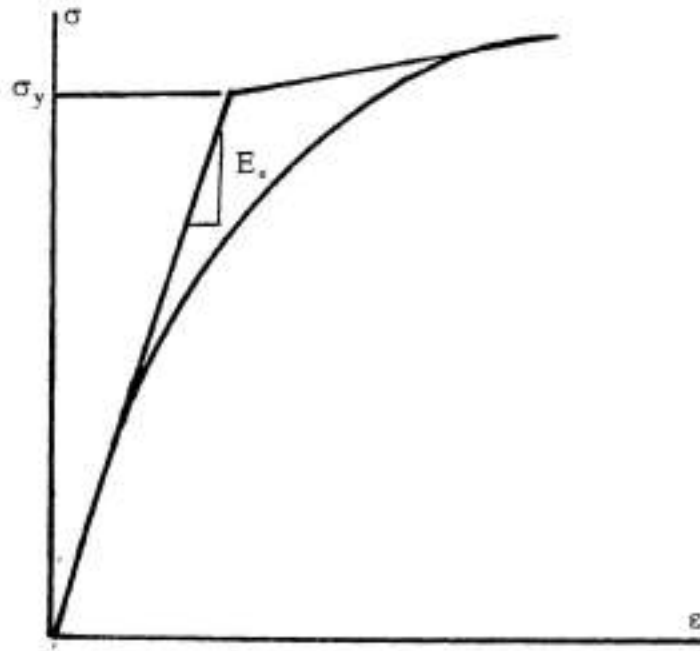
أن أبسط نوع من العلاقات اللاخطية هو الخطي المزدوج المبين في الشكل رقم (1.1.6.13) . للمادة معامل ابتدائي قدره  $[D_i]$  . حينما تصل الاجهادات إلى قيمة الإذعان  $\sigma_y$  تبدل المعاملات إلى قيمة  $[D_y]$  . قبل الإذعان بالإمكان كتابة علاقة الإجهاد - الانفعال بالشكل الآتي :-

$$\{\Delta\sigma\} = [D_i]\{\Delta\varepsilon\} \quad \dots \quad (1.1.1.6.13 \text{ أ})$$

بعد الإذعان تصبح المعادلة :-

$$\{\Delta\sigma\} = [D_y]\{\Delta\varepsilon\} \quad \dots \quad (1.1.1.6.13 \text{ ب})$$

تكون الطريقة العادية في تكوين علاقات خطية مزدوجة هو بوساطة تبديل قيمة معامل يونغ من قيمة ابتدائية  $E_i$  إلى قيمة إذعان  $E_y$  . تكون هذه مرغوبة بسبب إمكانية عزل معامل يونغ ببساطة عن الصلابة . يكون الضرر هو بتقليل معامل التضخم لمقدار معامل القص . تصبح المادة منضغطة و



شكل رقم (1.1.1.6.13) نموذج ثنائي الخط لمادة لا خطية .

متشوهة بشكل عالٍ بعد الإذعان و غالباً ما تظهر نتائج لا يمكن الاعتماد عليها . يكون من الأفضل تقليل معامل القص و إبقاء معامل التضخم ثابتاً .

أن مشكلة واضحة من هذا النوع من النمذجة هو أن علاقة الإجهاد - الانفعال الحقيقية منحنية. يظهر الشكل رقم (2.1.1.6.13) طريقتين لامرار علاقة خطية مزدوجة عبر علاقة منحنية و لكن لا يكون واضحاً مباشرة أيهما الأفضل .

في الخطوة التالية بالإمكان تقسيم المنحني اللاخطي إلى عدد من المنحنيات الخطية و التي تؤدي إلى ما يدعى **بالنماذج الخطية المتعددة ( Multi Linear Models )** أو **نماذج خطية قطعية ( Piecewise Linear Models )** .

تعطي هذه الطريقة نتائج مقبولة و يمكن الاعتماد عليها كما في استخدام الدوال الرياضية مثل **متعددات الحدود ( Polynomials )** و **القطع الناقصة ( Hyperbolas )** و **القطع المكافئة ( Parabolas )** و **الشرائح ( Splines )** . تكون فائدة استخدام الدوال الرياضية هو حاجتنا لمتغيرات قليلة فقط لوصف المنحنيات . على العكس من ذلك أن استخدام الدوال الرياضية يمكن أن يؤثر على دقة حساب المعامل المماسي . يجب أن نؤكد هنا بأن استخدام الدوال الرياضية سوف تؤلف بالضرورة نفس طريقة الخط القطعي .

### 2.1.6.13 علاقات القطع الناقص :- Hyperbolic Relations

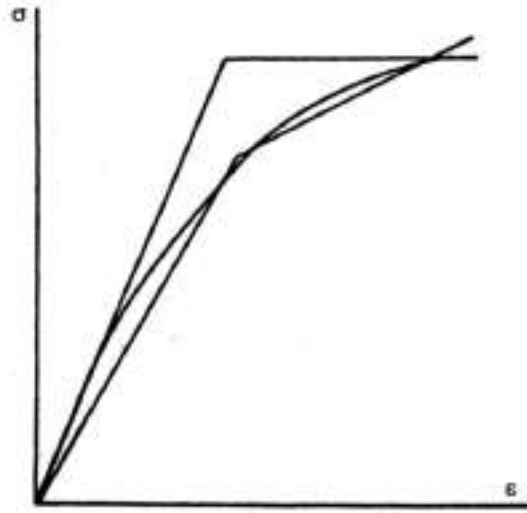
لقد طور دانكن و آخرون ( Duncan et al - 1984 ) الدالة المستخدمة بشكل واسع لتمثيل منحنيات الإجهاد - الانفعال باستخدام ما وجده كوندنر ( Kondner - 1963 ) بأن رسم منحني الإجهاد ضد الانفعال في فحص الانضغاط ثلاثي المحاور يكون قريباً جداً من قطع ناقص . يظهر الشكل رقم (1.2.1.6.13) علاقة كهذه و التي يمكن أن تكتب على شكل المعادلات الآتية :-

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{b + a\varepsilon} \quad \dots \quad (1.2.1.6.13 \text{ أ})$$

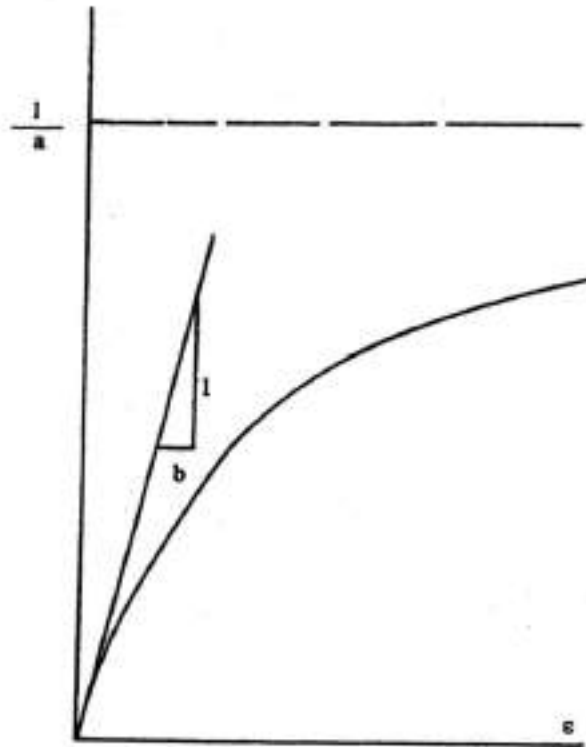
أو

$$\frac{\varepsilon}{\sigma} = b + a\varepsilon \quad \dots \quad (1.2.1.6.13 \text{ ب})$$

لقد أزيلت الرموز التحتانية من الاجهادات و الانفعالات في سبيل التوضيح اذ يمثل كل من  $\sigma$  و  $\varepsilon$  الإجهاد و الانفعال العموديين على التوالي . يعمل الشكل الأخير من المعادلة خطأً مستقيماً



شكل رقم (2.1.1.6.13) الخيارات في النموذج الثاني الخط .



شكل رقم (1.2.1.6.13) نموذج القناع الناقص لمادة لا خطية .

(شكل رقم (2.2.1.6.13)). بالإمكان كذلك رسم المحورين من  $\frac{\sigma}{\varepsilon}$  و  $\varepsilon$  عكسياً لتدقيق فيما لو كانت معلومات الفحص تشكل قطعاً ناقصاً أو لإيجاد المتغيرات للقطع الناقص من معلومات الفحص.

المثال (1.2.1.6.13): -

المعلوم :- تربة رملية من منطقة كربلاء في العراق ذات كثافة نسبية قدرها 80%، فحصت تحت حالة إجهاد انضغاطي ثلاثي محاور مبزول تحت ضغط خلية قدره  $\sigma_c = 100 \text{ kN/m}^2$  ، و كانت علاقة الإجهاد - الانفعال الناتجة كما مبينة في شكل مثال (1.2.1.6.13.أ). (سعد علي غالب - (Ghalib, 1975).

المطلوب :- استعمال نموذج القطع الناقص لتمثيل منحنى الإجهاد - الانفعال .

الحل :- ترسم العلاقة بين  $\frac{\varepsilon_a}{\sigma_d}$  و  $\varepsilon_a$  كما مبين في شكل مثال (1.2.1.6.13.ب). تظهر العلاقة على شكل خط مستقيم . من هذا الشكل نحصل على معاملات نموذج القطع الناقص .

$$a = 0.0007 \times 10^{-2} = 7 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{kN}$$

$$\therefore E_i = \frac{1}{a} = \frac{1}{7 \times 10^{-6}} = 142857 \text{ kN/m}^2$$

$$b = \frac{0.027}{10.5} = 0.00257 \text{ m}^2 / \text{kN}$$

$$\therefore \sigma_{ult} = \frac{1}{a} = 389 \text{ kN/m}^2$$

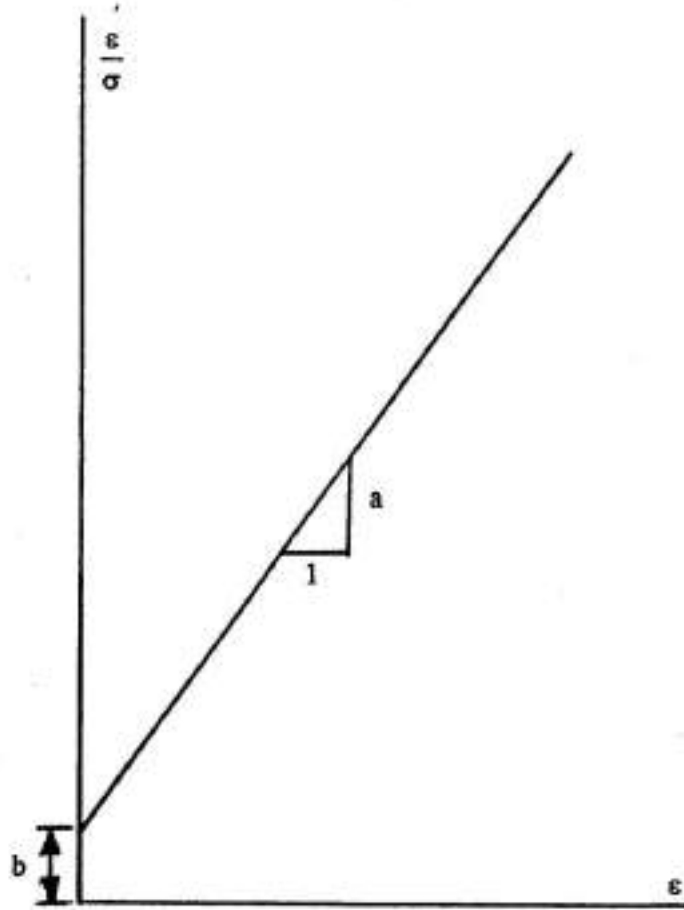
و بتطبيق العلاقة:-

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{b + a\varepsilon}$$

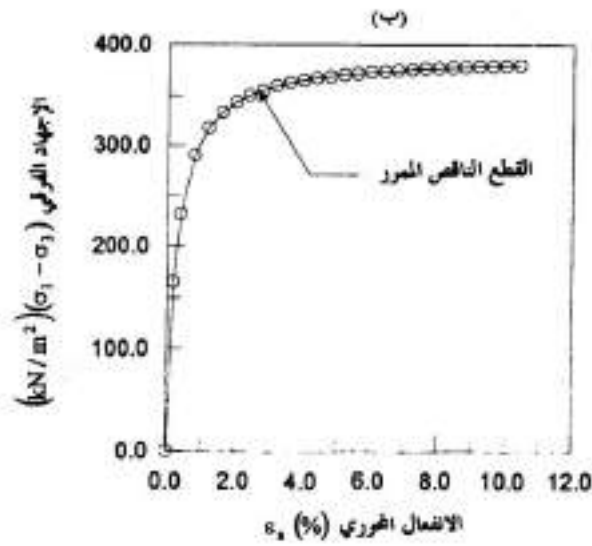
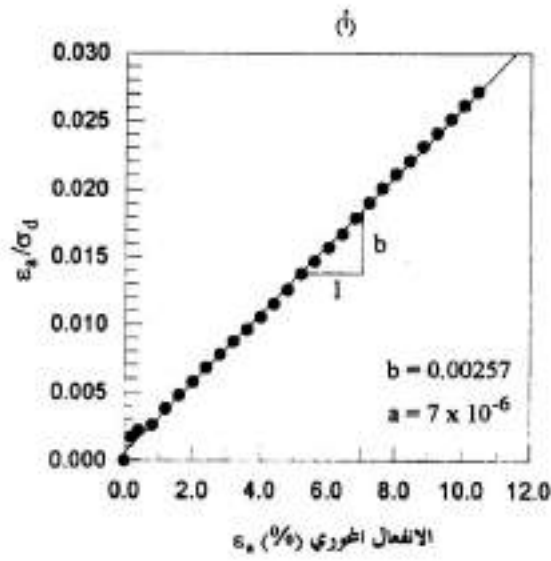
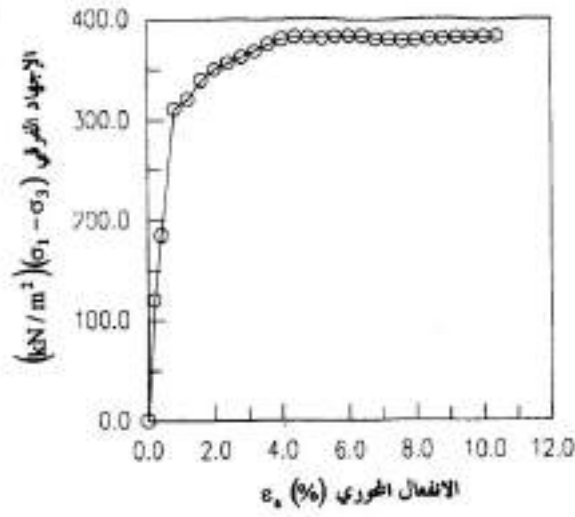
يمكن الحصول على علاقة الإجهاد - الانفعال بدلالة معاملات نموذج القطع الناقص كما مبين في شكل مثال (1.2.1.6.13.ج).

### 3.1.6.13 نماذج أخرى :-

هناك نماذج أخرى لتمثيل منحنيات مثل دالة رامبرغ - اوزكود ( Ramberg - Osgood ) التي توفر طريقة بديلة وربما في بعض الأحيان وسيلة افضل من دالة القطع الناقص . بالإمكان تمثيل نموذج رامبرغ - اوزكود بالشكل الآتي :-



شكل رقم (2.2.1.6.13) نموذج القطع الناقص مع المحورين المستبدلين .



شكل مثال (1.2.1.6.13) نتائج فحص ثلاثي محاور على تربة رملية من الرطبة غسري العراق (بعد باهر - 1989)

$$(1.3.1.6.13) \dots \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \lambda \left( \frac{\sigma}{E_i} \right)^m$$

اذ أن :-

$$\lambda = \left( \begin{array}{c} 1 \\ -1 \\ \theta_2 \end{array} \right) \left( \frac{\sigma_2}{E_i} \right)^{1-m}$$

هنا (m) هو أس يعرّف شكل المنحني و  $\theta_2$  هي نسبة  $\frac{E_2}{E_1}$  (شكل رقم (1.3.1.6.13)).

### 2.6.13 المرونة اللاخطية :-

تقسم هذه إلى نوعين رئيسيين و هما نماذج مفرطة المرونة ( Hyperelastic Models ) و نماذج قليلة المرونة ( Hypoelastic Models ) . بالإمكان الرجوع إلى كتاب شين و صليب ( Chen and Saleeb – 1982 ) للتعرف على هذه .

### Plasticity Theory

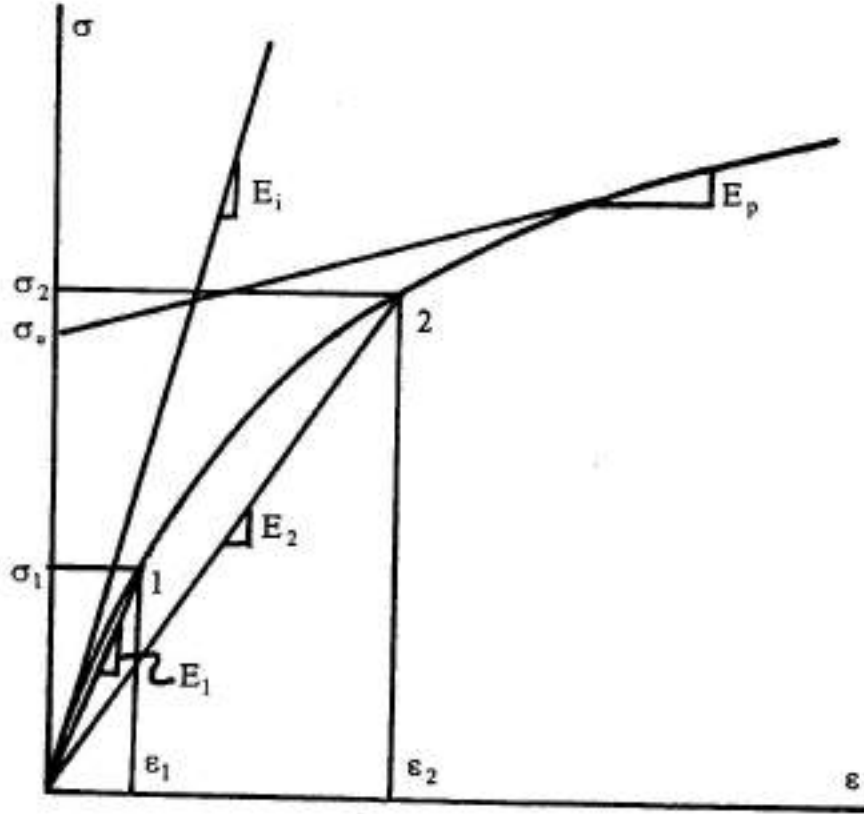
### 3.6.13 نظرية اللدونة :-

لقد أصبحت هذه النظرية هي الأكثر شيوعاً في الحال الحاضر و سوف يتم التطرق إلى مبادئها في الباب السادس من هذا الكتاب .

### 7.13 ملخص للنقاط الرئيسة :-

تنطبق مبادئ نظرية المرونة على الترتب بطريقة تقريبية فقط . مع ذلك, غالباً ما يكون من المفيد استخدام هذه الأفكار و استعمال قيم من المعامل و نسبة بوزون تنطبق تقريباً على تحميل محدد . من الواضح سوف نحتاج إلى الحكمة عند اختيار القيم لهذه المتغيرات . تؤثر العوامل المؤثرة على  $\phi$  نفسها كذلك على المعامل . مع ذلك يكون التأثير على المعامل أكثر وضوحاً . من الصعب تقدير قيم من المعامل مع دقة عالية و كلما احتجنا إلى تقدير دقيق يكون توفر معلومات الفحص للتربة المحددة ضرورياً.





شكل رقم ( 1.3.1.6.13 ) نموذج تحميل رامبرغ - اوزكود.

بما أن المعامل يعتمد على نسبة الفراغ فمن الصعوبة استحصال نماذج غير متخلخلة من ترب حبيبية لذلك سوف يكون من الصعوبة قياس المعامل بدقة خصوصاً في الترب الحبيبية . من الخبرة، يظهر أن دورة ثانية من التحميل خلال فحص مخبري تعطي اعتيادياً أفضل قياس للمعامل الموقعي . يظهر عادةً أن تأثيرات تخلخل النموذج تعوّض بوساطة تأثيرات التحميل الابتدائي . لا توجد ارتباطات و علاقات معتمد عليها بين المعامل و عدّاد الضربات .

#### الملاحظات :-

1. تمثل الكلمة مرنة حقيقة قابلية المادة على استعادة حجمها و شكلها الأصلي بعد إزالة الإجهاد . في هذا الكتاب نستخدم الكلمة بمعنى صارم لتعني المادة التي لها منحنى إجهاد - انفعال خطي و قابل للاستعادة .
2. أخذت القياسات عبر خط التماس من 100 - 800 kN/m<sup>2</sup> .
3. يمكنك العودة إلى المثال (3.1.3) للتحقق من هذه المعادلة .

#### اسئلة الفصل الثالث عشر

1-13 اذا كانت قيمة  $E = 110 \text{ MN/m}^2$  و  $\mu = 0.35$  , قدّر قيمة معامل الحصر D ومعامل القص G .

2-13 فيما يخص المعلومات المعطاة في السؤال رقم (1-13)، احسب سرعة الاتساع  $C_D$  والسرعة القصيبيية  $C_L$  وسرعة القص  $C_s$  .  
افرض قيمة مناسبة من  $\rho$  لتربة رملية كثيفة.

3-13 وجدت قيمة  $k_v$  لتربة رملية على انها 0.45 . احسب قيمة نسبة بوزون  $\mu$  على فرض ان التربة الرملية مادة مرنة.

4-13 راجع الشكلان رقم (2.7.11) و (4.7.11). فيما يخص الفحص D وتحميل ابتدائي، احسب قيمتا E و  $\mu$  (أ) لزيادة الاجهاد باكملها و(ب) للزيادة الى نقطة المعلومات الاولى.

افرض اولاً امكانية احتساب E و  $\mu$  كما لو كانا في فحص ثلاثي محاور نمطي باستخدام المعادلتين رقم (1.1.13) و(2.1.13) ثم استخدم المعادلات المعطاة في المثال رقم (2.1.13).

5-13 اعد السؤال رقم (4-13) باستخدام نتائج الفحص A و للتحميل الثاني.

6-13 قدر معامل يونغ (المعامل القاطع لحد  $\frac{1}{3}$  ثقل الفشل للتحميل الاول) فيما يخص رمل متدرج بشكل جيد ومادون الزاوية وكثيف واقع بعمق 60 متر تحت سطح الارض. ملاحظة : عليك تقدير عوامل عدة في سبيل الوصول الى تقدير مرضٍ .

7-13 قدر معامل القص على عمق 6 امتار لترية رملية تمتلك  $e = 0.6$  و  $G = 2.7$  و  $k_0 = 0.5$  باستخدام المعلومات المعطاة في الشكل رقم (1.4.13).

8-13 اكتب برنامج حاسوبي يقوم باجراء الحسابات العددية للمثال (1.5.13) وللحالات الثلاث من الانفعال المستوي و التماثل المحوري والتحميل ثلاثي الابعاد.

9-13 اكتب برنامج حاسوبي يدخل قيم الاجهاد الفرقي والانفعال المحوري المقابل له ويحسب قيمتي a و b لعلاقة القطع الناقص وبالتالي امكانية الوصول الى الانفعال لأية قيمة من اجهاد معطى.

## الباب الثانى

# الكلال (التعب) Fatigue

### ١-٢ مقدمة

الكلال هو الإنهيار المفاجئ (**Sudden Failure**) للعناصر الإنشائية المعرضة لأحمال متكررة (**Repeated Loads**) أثناء التشغيل بعد عديد من دورات التحميل (**Cycles**).

وموضوع الكلال ذو أهمية قصوى فى المجال الهندسى إذ يلزم للمنشآت الهندسية أن توفى الإشتراطات الثلاثة الآتية :

- ١- تؤدى عملها المطلوب **Function**
- ٢- تؤدى عملها بتكاليف معتدلة **Cost**
- ٣- أن يكون لها مدة تشغيل مناسبة **Service Life**

وغالبا فإن الذى يراعى عند التصميم هما الشرطين الأولين أما الشرط الثالث وهو مدة التشغيل المناسبة فيراعى بطرق تقريبية لأن معظم مهندسى التصميم ليسوا على درجة كافية من الدراية بفن التشغيل مع الزمن. ويعتبر التحميل المتكرر ذو أهمية كبيرة فى المجالات الهندسية إذ قد تتحمل المادة إجهاداً معيناً إذا كان التحميل إستاتيكيّاً ، بينما تنهار المادة بتأثير نفس الحمل إذا كان تكرارياً. كذلك فإن الإجهاد الأقصى المتكرر الذى تتحمله المادة دون حدوث الإنهيار هو أقل من الإجهاد الأقصى فى حالة التحميل الإستاتيكيّ لمرة واحدة. وفى حالة الأحمال المتكررة تتوقف خواص مقاومة المادة على مقدار الإجهادات المتكررة ونوعها وعلى عدد مرات تكرارها. والإجهادات المتكررة تؤدى إلى نتائج خطيرة فى المواد المعرضة لها. وتمثل الكسور بسبب الإجهادات المتكررة حوالى ٩٠% من أسباب الإنهيار فى أجزاء الآلات. وهذا النوع من الإجهادات يسبب الإنهيار على الرغم من أنه أقل من إجهاد حد المرونة. كذلك فإنه لا يحدث فى المادة قبل إنهيارها نفس الظواهر العادية التى تحدث فى حالة التحميل الإستاتيكيّ مثل الخضوع أو التشكل اللدن ويكون الكسر من النوع القصف بينما المادة أصلاً مادة معدنية مطيلة ولذلك فإن الكسر يقع بصورة فجائية دون إنذار.

## ٢-٢ الأحمال المتكررة Repeated Loads

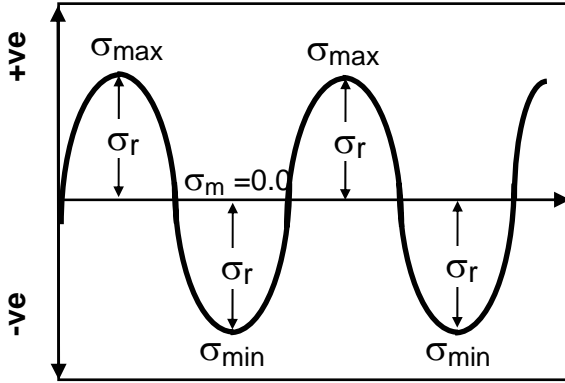
الحمل المتكرر هو الحمل الذي يسبب إجهاداً يتكرر عدد من الدورات ويأخذ إحدى الصور الموضحة في شكل (١-٢) وهي:

### ١- دورة معكوسة كلياً

وفيها يتغير الإجهاد من قيمة قصوى في الشد إلى قيمة قصوى في الضغط.

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \sigma_r$$

$$\sigma_m = 0.0$$

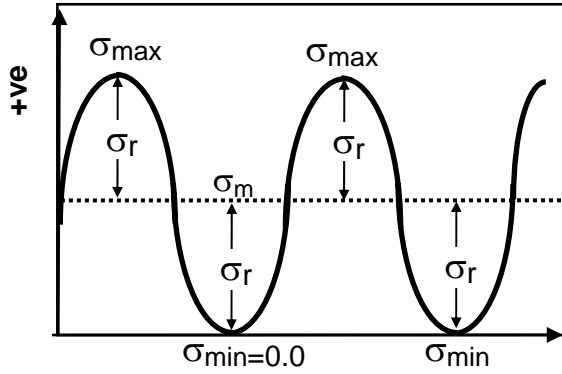


### ٢- دورة نابضة بين صفر ، sigma\_max

وفيها يتغير الإجهاد من قيمة قصوى في الشد أو الضغط إلى الصفر.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}, \quad \sigma_{\min} = 0.0$$

$$\sigma_r = \sigma_m$$



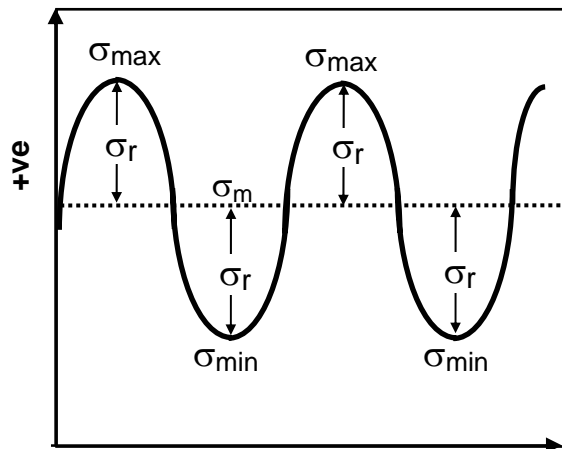
### ٣- دورة نابضة بين قيمتين sigma\_min ، sigma\_max

وفيها يتغير الإجهاد من قيمة قصوى في الشد أو في الضغط إلى قيمة أقل ولكنها أعلى من الصفر.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_m = \sigma_m - \sigma_{\min}$$

إذن فالإجهاد المتكرر عبارة عن إجهاد ثابت "sigma\_m" مضاف إليه إجهاد متغير "sigma\_r".



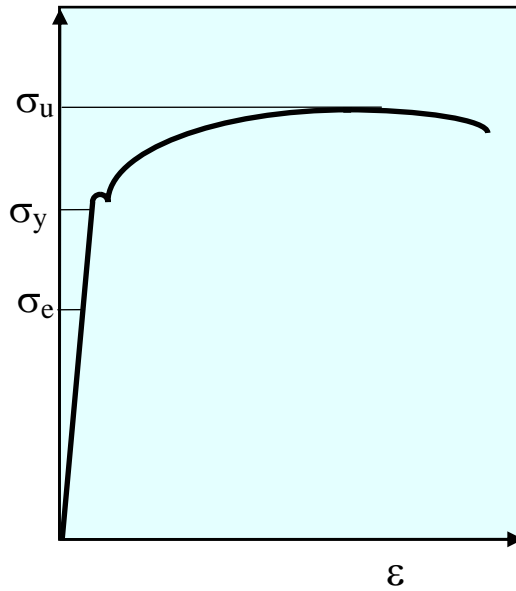
شكل (١-٢) دورات التحميل المختلفة.

## ٣-٢ إجهاد حد الإحتمال Endurance limit stress

إجهاد حد الإحتمال أو حد الصمود " $\sigma_e$ " هو أقصى إجهاد ذو مدى محدود ومعكوس كلياً يؤثر على المعدن بحيث يمكن أن يحدث معه عدد لانتهائى من دورات التحميل بأحمال متكررة دون حدوث الإنهيار ويحدد معملياً.

وينبغى هنا أن نفرق بين خواص المعدن الداخلية (المقاومة) وبين الإجهادات الناشئة عن الأحمال الخارجية. فالخواص الميكانيكية للمعدن "الخواص الداخلية" هي  $\sigma_e$  '  $\sigma_y$  '  $\sigma_u$  كما فى شكل (٢-٢) وهى التى تقسم على عامل الأمان. أما  $\sigma_r$  '  $\sigma_{min}$  '  $\sigma_{max}$  '  $\sigma_m$  فهى الإجهادات المؤثرة نتيجة الأحمال الخارجية ولا تقسم على عامل الأمان.

ويلاحظ أنه فى حالة التحميل الإستاتيكي فإن إجهاد التصميم هو إجهاد الخضوع  $\sigma_y$  أما فى حالة إذا كانت الدورة معكوسة كلياً فإن الإجهاد الأقصى والأدنى هو  $\sigma_e$  أما فى حالة الإجهادات المتكررة والمتراوحة فإننا نحسب قيمة  $\sigma_{min}$  '  $\sigma_{max}$  من بيانى سميث أو غيره بحيث لا تزيد أى منهما عن  $\sigma_y$ .



شكل (٢-٢) منحنى الإجهاد والإنفعال للحديد .

## ٤-٢ تعيين إجهاد حد الإحتمال معملياً Endurance Limit Stress

حد الإحتمال هو أقصى إجهاد ذو مدى محدود ومعكوس كلياً يؤثر على المعدن بحيث يمكن أن يحدث معه عدد لانتهائى من دورات التحميل بأحمال متكررة دون حدوث الإنهيار ويمكن تحديده معملياً بطريقتين:

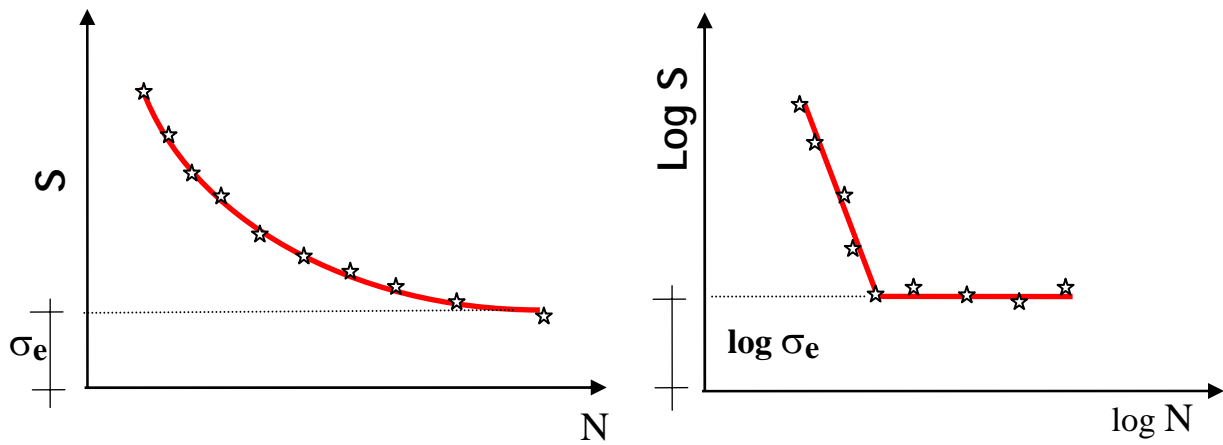
### أولاً: إختبار منحنى الإجهاد وعدد الدورات S-N diagram

ويجرى هذا الإختبار على عدد من العينات المتشابهة والتي يناسب شكلها مكنة الإختبار ويتم كالاتى:

- ١- تعرض العينة الأولى لإجهاد متكرر كبير وتعين عدد الدورات التى تكسرها.
- ٢- تعرض العينة الثانية لإجهاد متكرر أقل من إجهاد العينة الأولى ويعين عدد الدورات التى تكسرها والذي يكون أكبر من العدد الذى كسر العينة الأولى.
- ٣- يكرر نفس العمل مع باقى العينات الأخرى وفى كل مرة يقلل قيمة الإجهاد المتكرر وتعين عدد الدورات اللازمة لكسر العينة.
- ٤- ترسم العلاقة بين الإجهاد S وعدد الدورات N كما بشكل (٢-٣) ويعين حد الإحتمال.

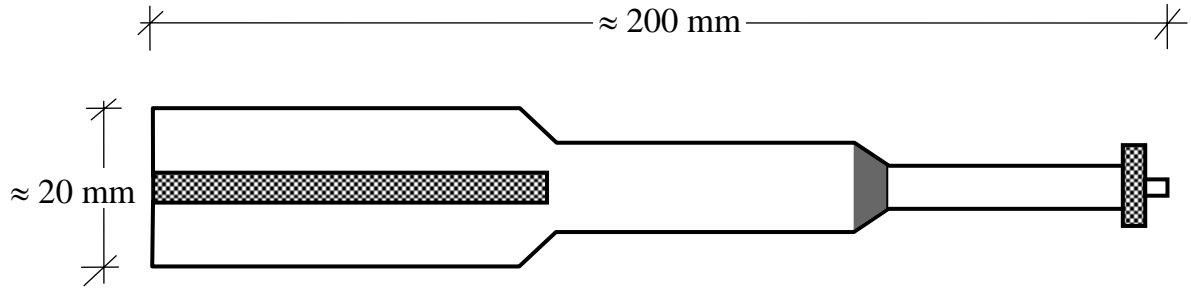
### من عيوب هذا الإختبار:

- أ - يحتاج إلى عدد كبير من العينات.
- ب- كل عينة تحتاج إلى وقت كبير لإحداث الإنهيار بها مما قد يجعل هذا الإختبار يستغرق عدة شهور.



شكل (٢-٣) منحنى الإجهاد وعدد الدورات.

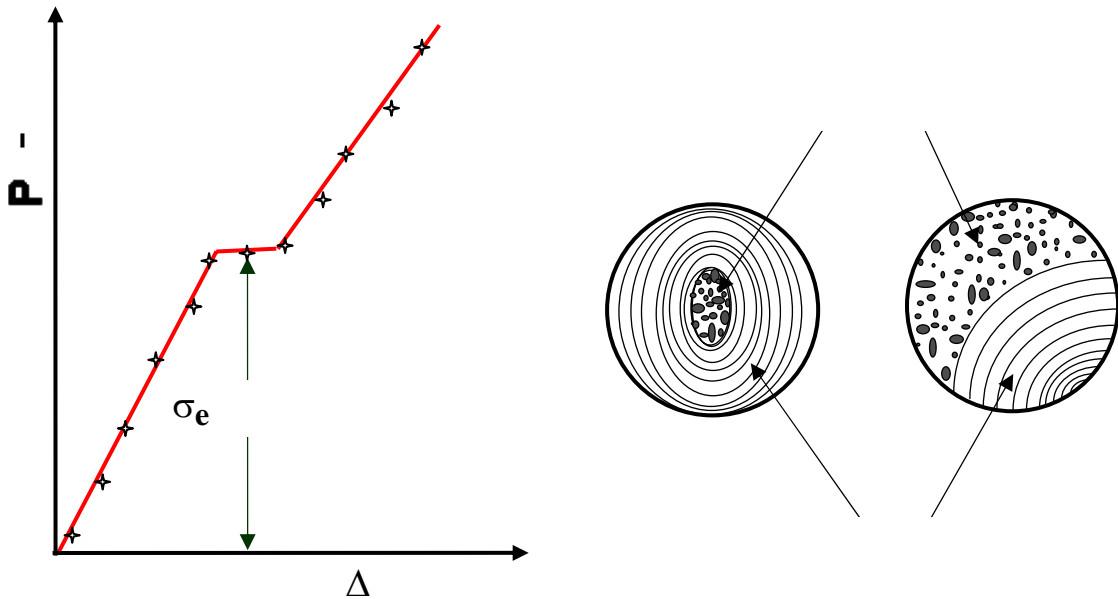
## ثانياً: إختبار منحنى الحمل وسهم الإنحناء P- $\Delta$ diagram



شكل (٤-٢) عينة إختبار كلال الإنحناء.

نظراً لأن تعيين إجهاد حد الإحتمال بطريقة S-N يستغرق وقتاً طويلاً وعدد كبير من العينات فيمكن الإستعاضة عنه بإختبار منحنى الحمل وسهم الإنحناء كما يلي:

- يتم تثبيت العينة شكل (٤-٢) على هيئة كابولي بماكينة الإختبار عن طريق تجويف موجود بالعينة عند هذه النهاية وتحمل العينة عند الطرف الحر بحمل يسبب إجهاد إنحناء صغير بها وبعد التحميل تدار العينة بسرعة معينة ثابتة وتؤخذ قراءة سهم الإنحناء عند الطرف الحر.
- يزداد الحمل ويسجل سهم الانحناء المناظر.
- تتكرر هذه العملية حتى الكسر.
- يرسم منحنى الحمل وسهم الإنحناء كما بشكل (٥-٢) والذي منه يمكن تحديد حد الإحتمال.



شكل (٥-٢) منحنى الحمل وسهم الإنحناء.

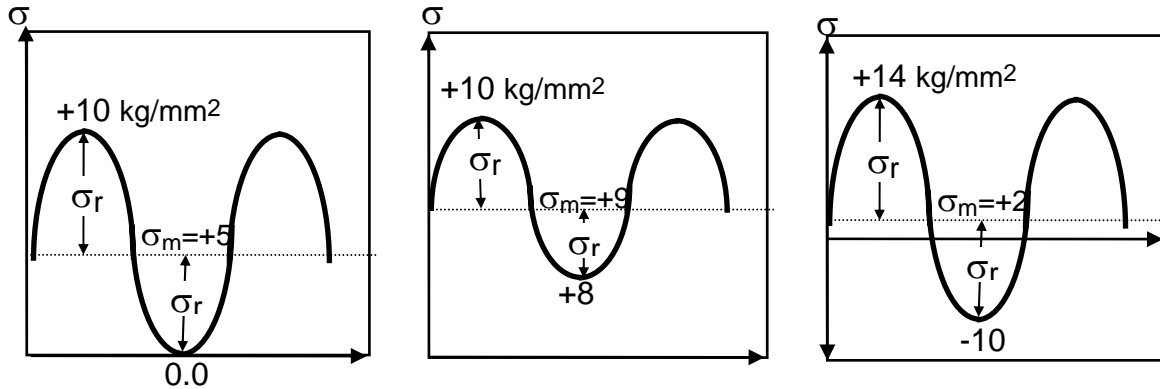




## ٥-٢ بياني سميث Smith Diagram

بياني سميث كما في شكل (٦-٢) يوضح العلاقة بين الإجهاد الأقصى ( $\sigma_{max}$ ) والإجهاد الأدنى ( $\sigma_{min}$ ) وبين الإجهاد المتوسط ( $\sigma_m$ ) لأي دورة من دورات التحميل المتكرر ويطلق عليه أيضاً منحنى مقاومة الكلال. الإحداثي الرأسي يمثل قيمتي  $\sigma_{min}$  و  $\sigma_{max}$  أما الإحداثي الأفقي فيمثل قيمة الإجهاد المتوسط ( $\sigma_m$ ). ولا بد أن يكون مقياس الرسم الأفقي هو نفس المقياس الرأسي. ومن خصائص هذا المنحنى أنه إذا قطعه خط رأسي عند قيمة معينة للإجهاد المتوسط ( $\sigma_m$ ) فإن نقطتي التقاطع مع خط بياني الإجهاد الأقصى وخط بياني الإجهاد الأدنى تمثلان حدود الإجهادات التي يمكن للمعدن تحملها دون تواجد خطر الإنهيار بالكلال. أما إذا خرجت قيمة الإجهاد الأقصى والأدنى لأي دورة عن هذا المنحنى فإن دورة هذا التحميل تكون غير آمنة وقد تسبب الإنهيار بالكلال. ويلاحظ أن الجزء من منحنى مقاومة الكلال الواقع بعد حد المرونة ( $\sigma_y$ ) لا قيمة له من الناحية العملية حيث لا يسمح بأى إجهاد أن تزيد قيمته عن إجهاد الخضوع. ويمكن رسم منحنى سميث لمقاومة الكلال مع مراعاة الأمان المناسب لإستخدامه في التصميم وذلك بإستخدام قيم الخواص الميكانيكية للشد والكلال مقسومه على عامل الأمان المناظر.

**مثال : أجرى تحليلاً تجريبياً للإجهادات بجزء من كوبري معدني معرض لحمل متكرر وكان الإجهاد الأقصى والأدنى لمواقع مختلفة طبقاً لدورات التحميل الآتية:**



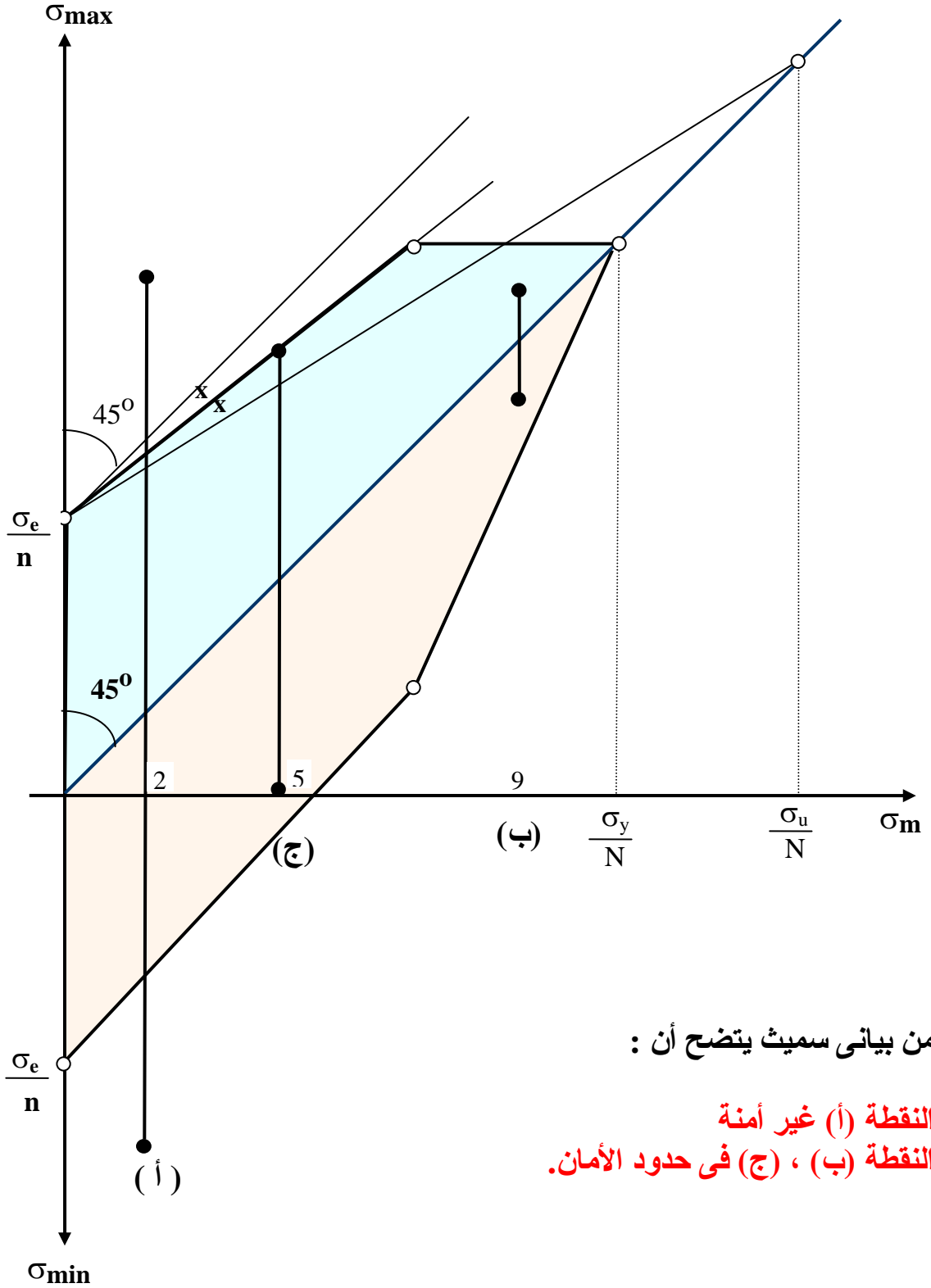
النقطة (ج)

النقطة (ب)

النقطة (أ)

فإذا كانت مقاومة الشد لمعدن الكوبري = ٤٠ كج/مم<sup>٢</sup> وإجهاد الخضوع = ٢٤ كج/مم<sup>٢</sup> وحد الإحتمال = ١٨ كج/مم<sup>٢</sup> - عامل الأمان للشد والخضوع = ٢ وعامل الأمان لحد الإحتمال = ٣. بين ما إذا كانت الإجهادات في الموضع أ ، ب ، ج في حدود الأمان بالنسبة للإنهيار بالكلال.

## الحل



## ٦-٢ المعادلات الوضعية لتحديد الإجهاد الأقصى والأدنى

يعين حد الإحتمال للمعدن  $\sigma_e$  على أساس الإختبار بإستخدام دورة إجهاد معكوسة كلياً ولذلك يعتبر حد الإحتمال هو الإجهاد الأقصى والأدنى المسموح به.

أما إذا كانت دورة الإجهاد غير معكوسة كلياً أى أن هناك قيمة للإجهاد المتوسط  $\sigma_m$  فإن حد الإحتمال لا يعبر عن الإجهاد الأقصى والأدنى ويلزم لذلك تحديد قيم الإجهادات القصوى والدنيا المسموح بها حتى لا يتم الإنهيار بالكلال. وقد وضعت لذلك عدة قواعد أو معادلات تربط بين الخواص الداخلية للمعدن والأحمال المتكررة المؤثرة على المنشأ.

إن هذه المعادلات تقوم بحساب الإجهاد الأقصى والأدنى المسموح به لتفادى الإنهيار بالكلال وذلك بدلالة الإجهاد المتوسط  $\sigma_m$  أى الإجهاد الثابت والخواص الداخلية للمعدن مثل  $\sigma_u$  و  $\sigma_e$  ويتم هذا فى حالة دورات الإجهاد الغير معكوسة كلياً "  $\sigma_m \neq 0.0$  ". وبصفة عامة فإنه ينبغى أن لاتزيد أكبر قيمة للإجهاد يتعرض لها المعدن عن قيمة  $\sigma_y$ .

أما فى حالة الدورات المعكوسة كلياً "  $\sigma_m = 0.0$  " فإن أكبر قيمة للإجهاد  $\sigma_{min}$  '  $\sigma_{max}$  ينبغى أن لا تزيد عن قيمة  $\sigma_e$ .

وتأخذ هذه المعادلات الشكل الآتى:

$\frac{\sigma_r}{\sigma_e} = 1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2$	<b>١- معادلة جريب</b> $y=1-x^2$
--	------------------------------------

$\frac{\sigma_r}{\sigma_e} = 1 - \frac{ \sigma_m }{\sigma_u}$	<b>٢- معادلة جودمان</b> $y=1-x$
---	------------------------------------

$\frac{\sigma_r}{\sigma_e} = 1 - \frac{ \sigma_m }{\sigma_y}$	<b>٣- معادلة سودربرج</b> $y=1-kx$
---	--------------------------------------

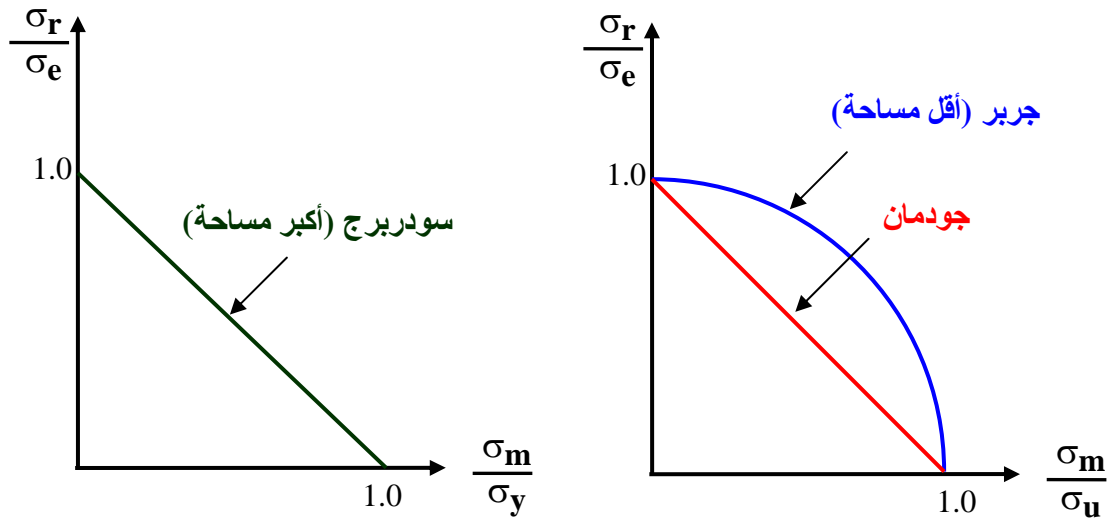
فى حالة إعتبار عامل أمان فإن الذى يُقسم على عامل الأمان هو الخواص الخاصة بالمعدن  $\sigma_e$  '  $\sigma_y$  '  $\sigma_u$  وتصبح المعادلات كما يلى:

سودبرج	جودمان	جربر
$\frac{\sigma_r}{\sigma_e / n} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y / N}$	$\frac{\sigma_r}{\sigma_e / n} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u / N}$	$\frac{\sigma_r}{\sigma_e / n} = 1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u / N}\right)^2$

فإذا علم الإجهاد المتوسط أو الإجهاد الثابت  $\sigma_m$  فإن الإجهاد الأقصى والأدنى المسموح به لتفادي الإنهيار بالكلال يحسب بدلالة  $\sigma_r$  التي تعين من المعادلات السابقة كما يلي :

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_r$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_r$$

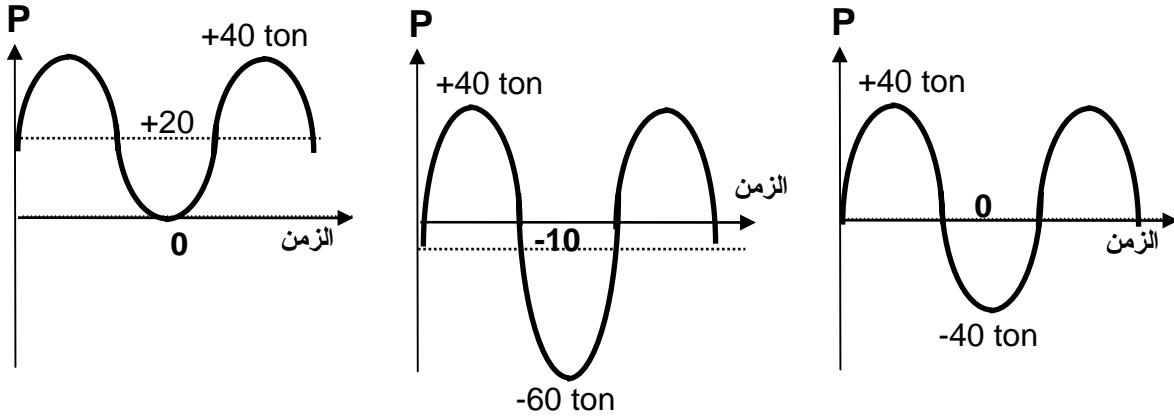


شكل (٧-٢) معادلات جربر وجودمان وسودبرج ممثلة بيانياً.

**مثال:** عينة من الحديد تتعرض لإجهاد شد متوسط = ٢٠ كج/مم<sup>٢</sup> ما هي قيمة الإجهاد العكسي المتكرر الذي يمكن إضافته بإستعمال قانوني جودمان و سودبرج ثم إرسم دورة الإجهاد والزمن لهذه العينة علماً بأن الخواص الميكانيكية هي: مقاومة الشد = ٦٢ كج/مم<sup>٢</sup> وإجهاد الخضوع = ٤٢ كج/مم<sup>٢</sup> وحد الإحتمال = ٢٨ كج/مم<sup>٢</sup> وعامل الأمان = ١,٩.



الحل

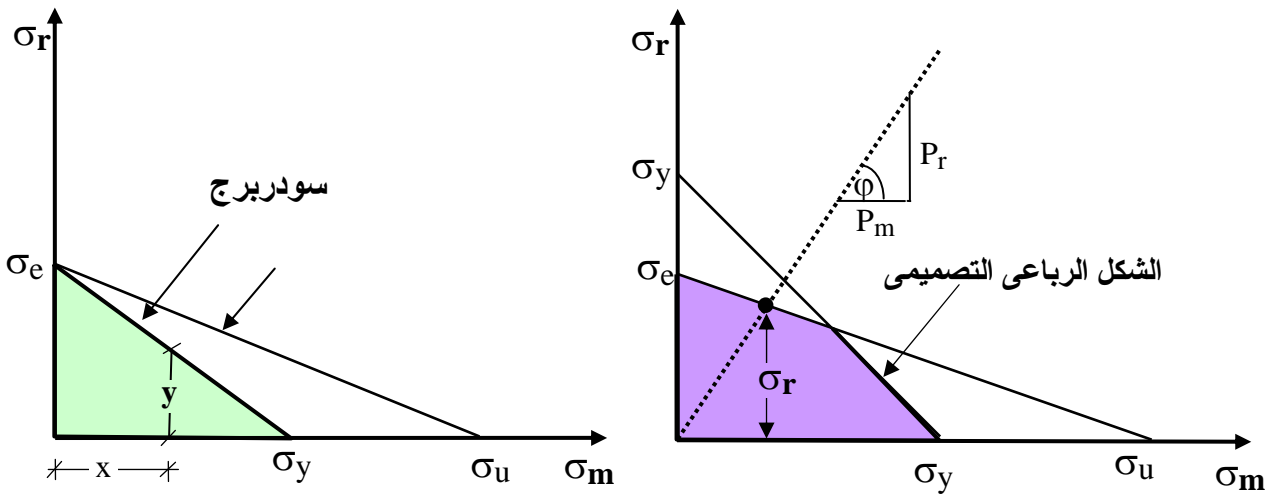


(ج)	(ب)	(أ)
$P_m = \frac{40 - 0}{2} = 20 \text{ ton}$	$P_m = \frac{40 - 60}{2} = -10 \text{ ton}$	<p>الدورة معكوسة كلياً إذن حد الإحتمال هو الذى يؤخذ فى الإعتبار فى التصميم.</p>
$P_r = 40 - 20 = 20 \text{ ton}$	$P_r = 40 + 10 = 50 \text{ ton}$	$\therefore A = \frac{P}{\sigma_e / n} = \frac{40(10)^3}{28 / 4}$
$\therefore \sigma_m = \frac{20(10)^3}{A}, \quad \sigma_r = \frac{20(10)^3}{A}$	$\therefore \sigma_m = \frac{P_m}{A}, \quad \sigma_r = \frac{P_r}{A}$	$A \cong 5714 \text{ mm}^2$
$\frac{\sigma_r}{\sigma_e / n} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y / n}$	$\frac{\sigma_r}{\sigma_e / n} = 1 - \frac{ \sigma_m }{\sigma_y / n}$	$d = 85.3 \text{ mm}$
$\frac{20(10)^3}{7A} = 1 - \frac{20(10)^3}{10A}$	$\therefore \frac{50(10)^3}{7A} = 1 - \frac{10(10)^3}{10A}$	
$\therefore A = 4857 \text{ mm}^2$	$\therefore A = 8143 \text{ mm}^2$	
$d = 78.6 \text{ mm}$	$d = 101.8 \text{ mm}$	

## ٧-٢ المثلث التصميمي للكلال

يمكن رسم أحد بيانيات التصميم للكلال وهي مثلث سودربرج أو مثلث جودمان أو الشكل الرباعي التصميمي كما في شكل (٨-٢) وتستخدم هذه المنحنيات في الحالات الآتية:

- ١- حساب الإجهاد الأقصى والأدنى إذا علم الإجهاد الثابت ( $\sigma_m$ ).
- ٢- عمل تحقيق Check على مدى أمان الإجهادات المؤثرة فعلاً أثناء التشغيل والمعينة تجريبياً وذلك بدلالة  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  اللذين نحسب منهما  $\sigma_r$ ,  $\sigma_m$  ثم نعين كل نقطة فإذا خرجت النقطة الموقعة خارج المثلث يكون الإجهاد غير آمن أما إذا كانت داخل المثلث فيكون الإجهاد في هذا الموقع في حدود الأمان. ويلاحظ أن يكون مقياس الرسم الأفقي هو نفس المقياس الرأسى.



شكل (٨-٢) المثلث التصميمي للكلال.

ملاحظات :

١- في حالة إعطاء الحمل المتوسط والحمل المتغير  $P_r$ ,  $P_m$  فإن  $\frac{\sigma_r}{\sigma_m} = \frac{P_r}{P_m}$  إذن نرسم

الخط الذى ميله  $\frac{P_r}{P_m}$  فيقطع الشكل فى نقطة نحدد منها قيمة  $\sigma_r$ ,  $\sigma_m$  وبالتالي نحدد

$\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$  ويمكن حساب مساحة المقطع A :

$$A = \frac{P_r}{\sigma_r} = \frac{P_m}{\sigma_m} = \frac{P_{\min}}{\sigma_{\min}} = \frac{P_{\max}}{\sigma_{\max}}$$

- ٢- فى حالة التحميل الإستاتيكي فإن إجهاد التصميم هو إجهاد الخضوع  $\sigma_y$ .
- أما فى حالة إذا كانت الدورة المؤثرة هى دورة معكوسة كلياً فإن الإجهاد الأقصى والأدنى للكلال الذى يتخذ أساساً للتصميم هو حد الإحتمال  $\sigma_e$  [  $\sigma_e = \sigma_{\max} = \sigma_{\min}$  ].
- أما فى حالة الإجهادات المتكرر والمتراوحة فإننا نحسب قيمة  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  من معادلات جربير أو جودمان أو سودربرج وهما اللذان يتخذان أساساً للتصميم بشرط أن لا تزيد أى كمية منهما عن  $\sigma_y$ .



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

2006/12/25:

2006/5/10:

)

)

(

.(

6-

(20 wt.% )

( PE )

[ PE + N-6(W.R)]

( PVC )

:

:

(Inelastic)

[4]

(Cy223)

[1]

6-

(E-glass)

.(

)

:

[2]

PE+G.F(W.R)

PE+G.F(S)

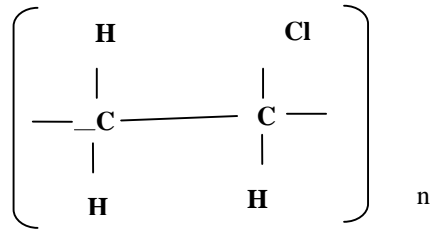
PE+N-6(W.R)

PVC+G.F(W.R)

PVC+G.F(S)

PVC+N-6(W.R)

[3]



6-

(1)

:(Reinforcement Materials )

Nylon – ) (Glass Fibers)  
 (Glass Fibers) -  
 E.Glass

(AB) / .1  
 (BC) / .2  
 (CD) / .3  
 .4

[5] D

[7],[6]

:(Short Fibers) . 1

(8-12 mm)

Woven ) . 2

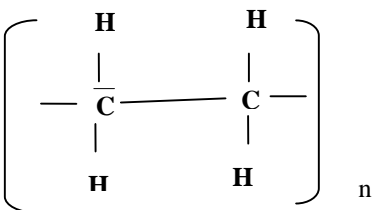
(1) :(Roving

[6](E-glass)

(Nulon-6-Fibers) 6- -

(2) . ( 0o-90o)

6 - [7]



( 1.16 gm/m3)

( 350oC)

( n) :

1 cm 20 cm

.(20 wt.%)

Mass of load Beam      0.40 Kg      PE  
 Mass of Weight Hanger    0.16 Kg  
 Mass of support Pin      0.04 Kg

:      6-  
 (1+0.4+0.16+0.04=1.6 Kg)

( 0.98 , 1.05 ,1.12 , 1.10 , 0.85 , 0.92 ) x 10<sup>6</sup>  $\frac{N}{m^2}$       PVC

: [5]

$$\dots\dots\dots (4) \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

:  $\Delta L$  :

:  $L_0$

. [4]

(2)

(3)

(SM 106 MK)

(1 kgm)

(5) (4)

[PVC+G.F(S)]    [PE+G.F(S)]

[PE+G.F(S)]

. [PVC+G.F(S)]

(7) (6)

[PE+G.F(W.R)]

[PVC+G.F(W.R)]

[PVC+G.F(W.R)]

[PE+G.F(W.R)]

[ PE + N-6(W.R)]

$$\dots\dots (1) \quad \frac{(2.69 + 8M) \times 9.81}{A} = \frac{F}{A} = \sigma$$

: M :

: F ( m2)

: A (Kg)

. (N)

: [8]

$$\dots\dots (2) \quad \frac{F}{A} = \sigma$$

: F N/m2

:  $\sigma$

: A N

(3)

(F)

m2

$$\dots\dots (3) \quad F = (2.69 + 8M) \times 9.81$$

: (1 Kg)

[PVC + N-  
(9) (8) 6(W.R)]

( PE )

( ) ( PVC )  
[PVC [PE+G.F(s)]  
+ G.F(s)] (W.R)

[PE + N-6(W.R)]

(W.R)

:

[1]

. 1989

[10],[9]

[2]

( PE )

.1994

( PVC )

[3]

[ PE + N-6(W.R)]

(3)

.1998

[4]

.2002

[5] D. Pomeroy , "Creep of Engineering Materials" , The Institution of Mechanical Engineering , 1978 .

. [11]

- [6] Francqis Cardarelli, "Materials handbook", Springer-Verlag, London, 2000.
- [7] Melvini-Kohan , "Nylon Plastics" , Plastics Department , United State of America, 1973 .
- [8] Marc Andrew Meyers and Krisham Kumar Chanla , "Mechanical Behavior of Materials" , Prentice Hall , New Jersey, 1999 .
- [9] Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.17, No. 6, pp. 624-631, 2005.
- [10] Journal of Composites for Construction , Vol. 9, No. 2, pp. 147-157, 2005.
- [11] Journal of Engineering Mechanics, Vol. 129, No. 3, pp. 310-317, 2003.

[6](E.glass) : (1)

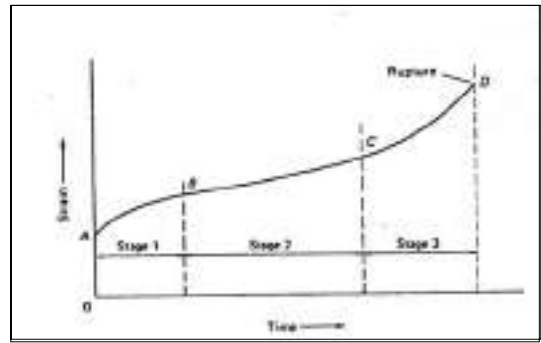
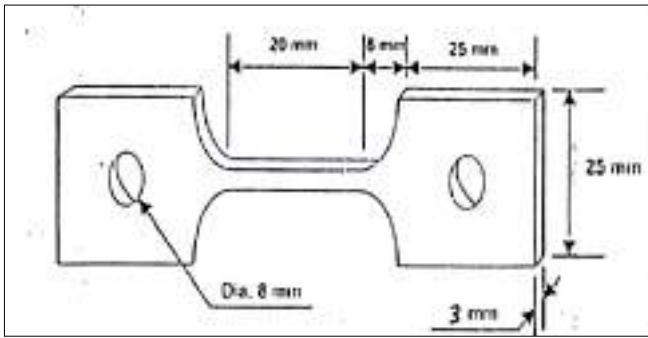
Properties of Fibers	E-glass
$m \mu$ Fibers Diameter	10-14
Elongation %	4.88
Density ( $gm/cm^3$ )	2.54
Young's Modulus (GPa)	75
Tensile Strength (MPa)	1500

[7] (6 - ) : (2)

Properties	Nylon-6
Yield Strength( $N/m^2$ )	60-75
Elongation to the Break %	40-80
Density ( $gm/cm^3$ )	0.99-0.95
Young's Modulus $GN/m^2$	1.4-2.8
Thermal Conductivity $W/m^0C$	0.2

: (3)

	(X10-2 sec-1)
PE+G.F(S)	19763.593
PE+G.F(W.R)	2656.090
PVC+G.F(S)	23996.714
PVC+G.F(W.R)	11516.853
PE+N-6(W.R)	407.8215
PVC+N-6(W.R)	761.915

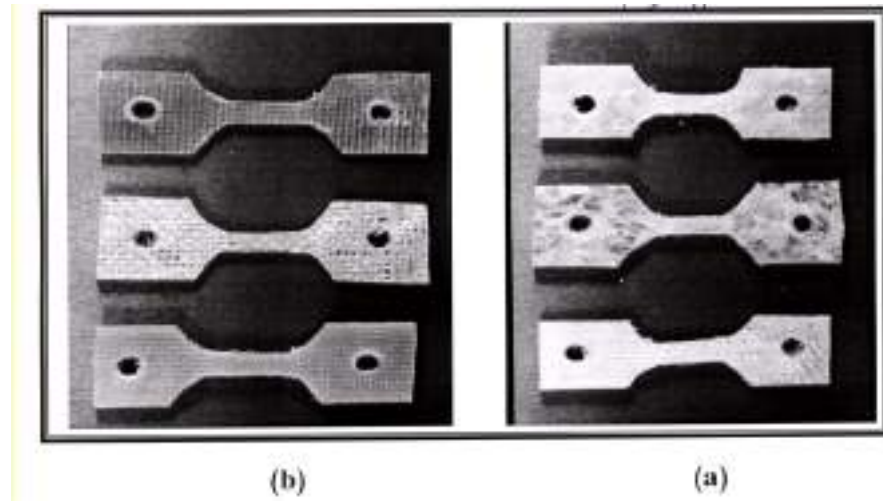


[7]

:(2)

[5]

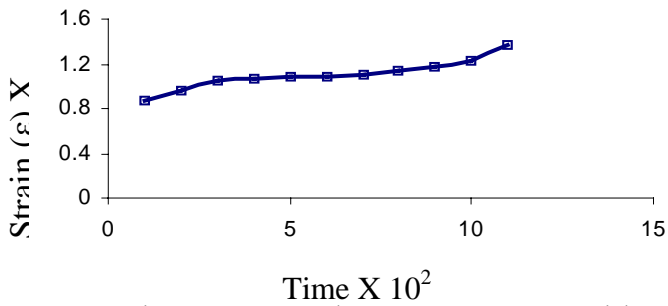
:(1)



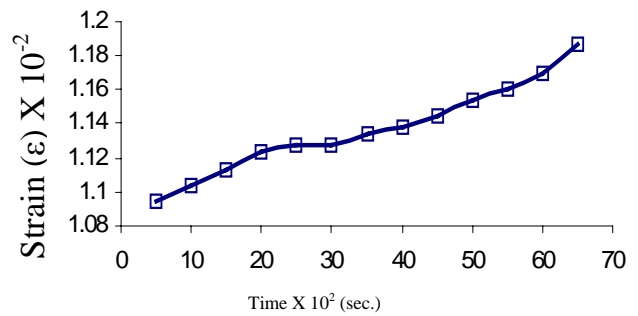
PVC

PE

:(3)

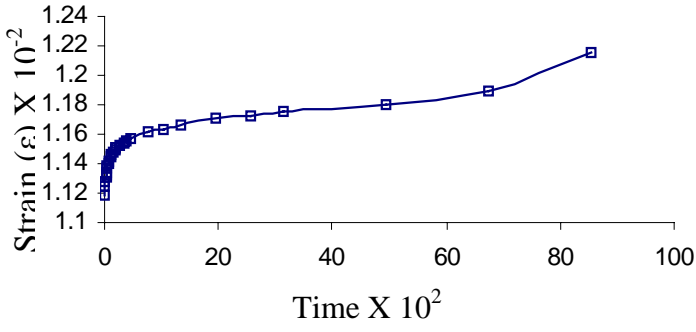


( - ) : (5)  
(PVC+G-F(S))

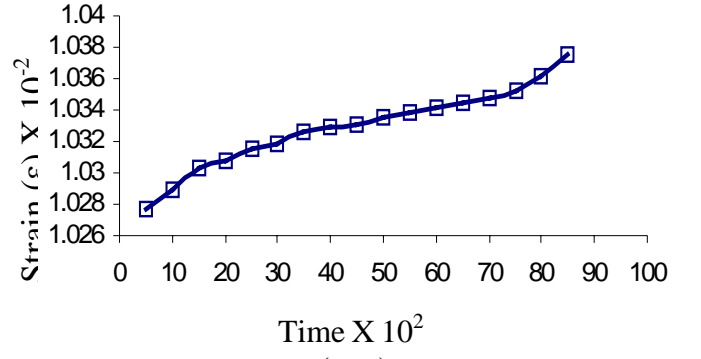


( - ) : (4)  
(PE+G-F(S))

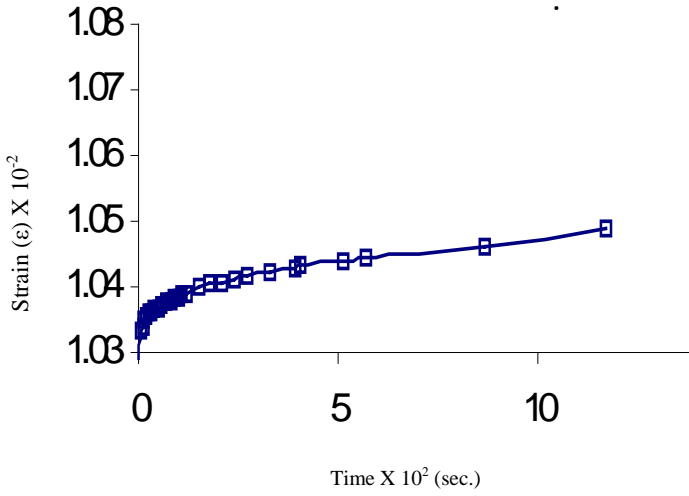




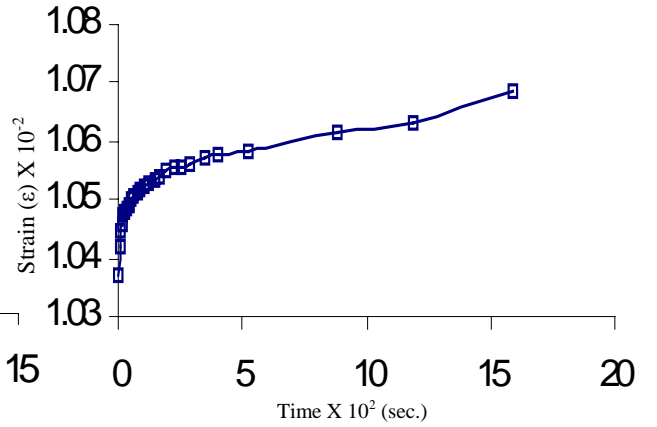
( - ) : (7)  
(PVC+G-F(W.R))



( - ) : (6)  
(PE+G-F(W.R))



( - ) : (9)  
(PVC+N-6(W.R))



( - ) : (8)  
(PE+N-6(W.R))

Meaning	معنى المختصر	المختصر
Glass fiber	ألياف الزجاج	G.F
Glass fiber ( Woven Roving)	ألياف زجاجية محاكاة بشكل حصيرة	G.F(W.R)
Nylon-6 fiber	ألياف النايلون-6	N-6
Polyethylene	بولي اثيلين	PE
Poly vinyl chloride	بولي كلوريد الفانيل	PVC
Polyethylene + Glass fiber ( short)	بولي اثيلين المدعم بألياف الزجاج القصيرة	PE+G.F(s)
Polyethylene + Glass fiber ( Woven roving)	بولي اثيلين المدعم بألياف الزجاج المحاكاة بشكل حصيرة	PE+G.F(W.R)
Polyethylene + Nylon-6 (woven roving )	بولي اثيلين المدعم بألياف النايلون-6 والمحاكاة بشكل حصيرة	PE+N-6(W.R)
Poly chloride vinily + Glass fiber ( short )	بولي كلوريد الفانيل المدعم بألياف الزجاج القصيرة	PVC+G.F(s)
Poly chloride vinily + Glass fiber ( Woven Roving)	بولي كلوريد الفانيل المدعم بألياف الزجاج المحاكاة بشكل حصيرة	PVC+G.F(W.R)
Poly chloride vinily+Nylon-6 ( Woven Roving)	بولي كلوريد الفانيل المدعم بألياف النايلون-6 والمحاكاة بشكل حصيرة	PVC+N-6(W.R)

## STUDYING THE EFFECT OF CREEP FOR SOME COMPOSITE POLYMERIC MATERIALS.

**GHASSAN ADNAN NAEEM**

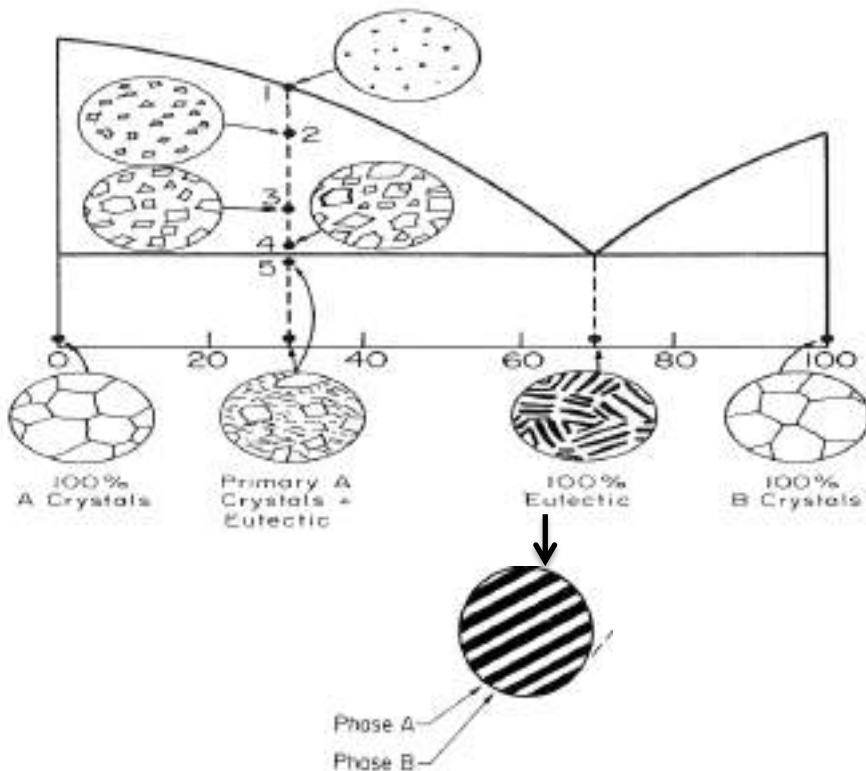
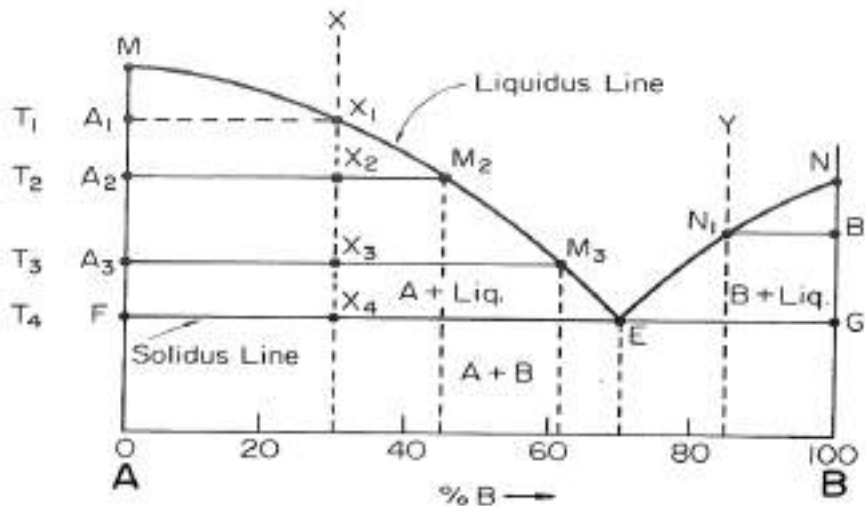
E.mail:[Ghassanadnan70@yahoo.com](mailto:Ghassanadnan70@yahoo.com)

### **Abstract:**

Six types of composite polymeric materials were prepared. Two types of the matrix matter were used (Low density(PE) polyethylene and (PVC) poly chloride vinily ) . Also three types of fibers were used (Short glass fiber, woven roving glass fiber and woven roving nylon-6) . We studied the effect of creep on the above composites which were prepared by hot press method with the same weight fraction (20 wt. %) the results showed that the strain ratio of composites material, which has the same matrix matter of (PE), is less than the strain ratio of the composites material that has the same matrix matter of (PVC),and the composites material [ PE + N-6(W.R)] displays the best characteristics of creep.

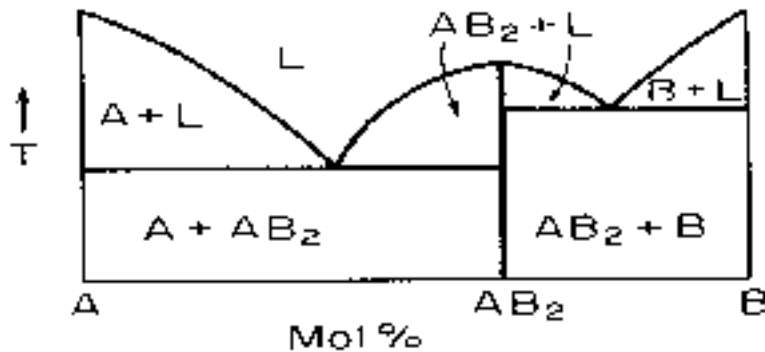
**The Binary Eutectic**

- 1- The reaction involving a liquid changing to two crystalline phases is called eutectic reaction.
- 2- In the figure below point E is the eutectic point at this point the reaction is  $L \longrightarrow A \text{ crystal} + B \text{ crystal}$
- 3- The microscope were arranged to melt X at various stage of crystalline might appear as shown in the figure below.



### Intermediate Component

- 1- Component composed of two or more component occur in the system referred to intermediate component.
- 2- In binary system these component are composed of various ratio of two component of the system.
- 3- The component  $AB_2$  in the figure below formed of the component A and B.

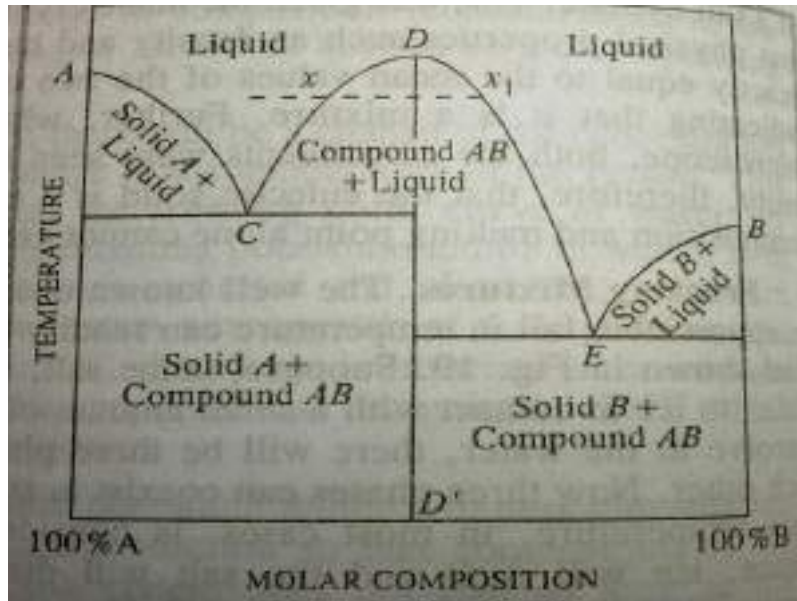


- 4- The component  $AB_2$  divided the system into two eutectic binary system A- $AB_2$  and B- $AB_2$ .

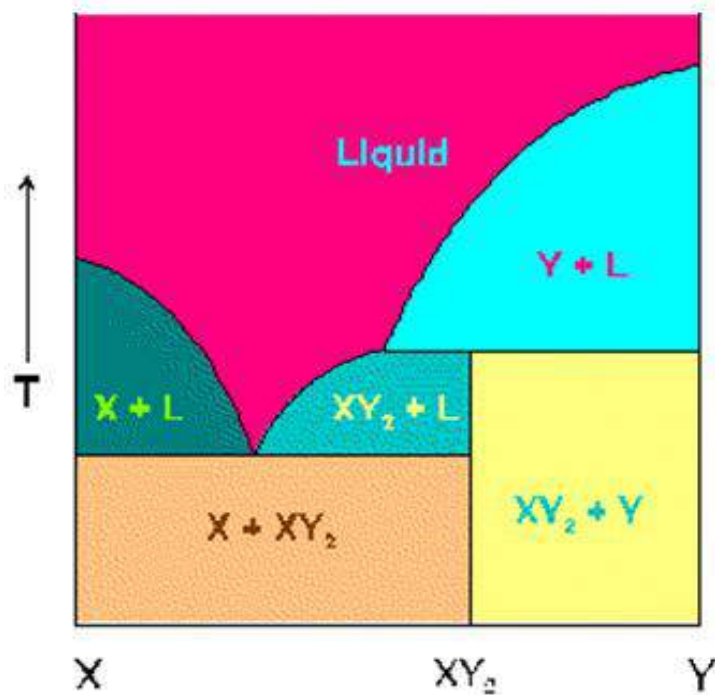
### Congruent melting & Incongruent melting

- **Congruent melting:** occurs during melting of a compound when the composition of the liquid that forms is the same as the composition of the solid. This generally happens in two-component systems.
- To take a general case, let A and B be the two components and AB a stable solid compound formed by their chemical combination. In the phase diagram, we can notice that the top point D of the phase diagram is the congruent melting point of the compound AB because the solid and liquid phases now have the same composition.
- Congruent melting point represents a definite temperature just like the melting points of pure components. In the phase diagram, the congruent melting point D of compound AB lies above the melting points of pure components A and B.

## Phase Diagram Of Ceramic Materials-----Lec 4



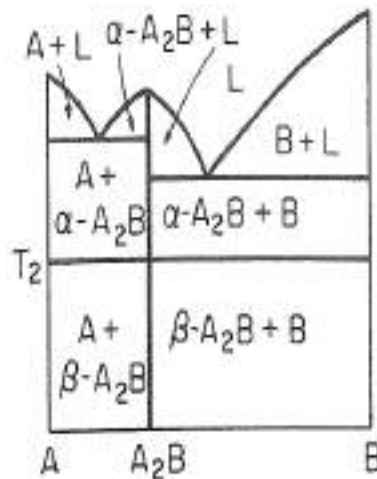
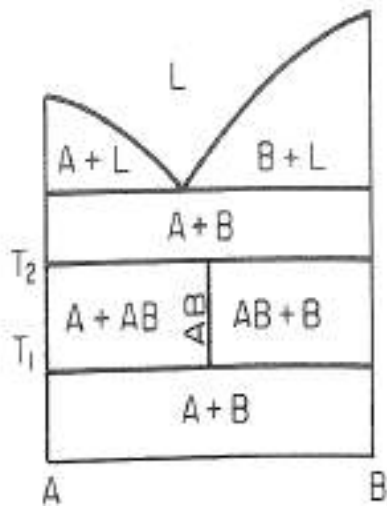
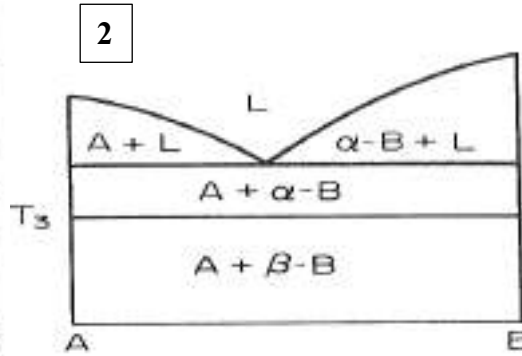
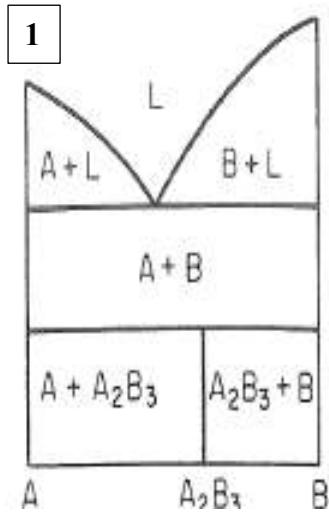
- **Incongruent melting:** occurs when a solid substance does not melt uniformly, decomposing into another solid and a liquid with different compositions.
- The intermediate compound in this diagram ( $XY_2$ ) however is incongruently melting.
- Incongruent melting temperature at which one solid phase transforms to another solid phase and a liquid phase both of different chemical compositions than the original composition.
- This can be seen in this diagram as  $XY_2$  melts to Y and liquid.



## Phase Diagram Of Ceramic Materials-----Lec 4

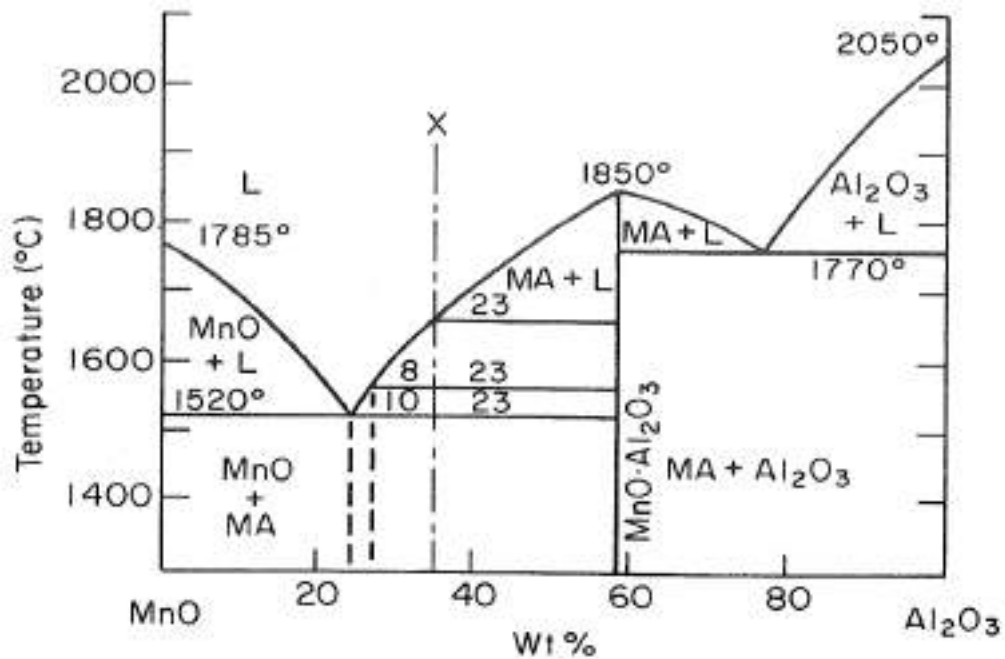
From the figures below determine the following :

- 1- Eutectic point & composition.
- 2- Intermediate component & the system resulting from its formation.
- 3- Type of melting with a reason.



In  $\text{MnO-Al}_2\text{O}_3$  system determine the isopleth study of point X composition is (35%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 65%  $\text{MnO}$ ) , on cooling to (1670 , 1560°C eutectic temperature ) .

## Phase Diagram Of Ceramic Materials-----Lec 4



The isopleth study in the MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system for composition (35% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- 65% MnO) .

Temperature (°C)	Proportion phases	% phases	Composition of phases
1670	23 melt crystal M A	100 ε	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =35 MnO =65 100
1560	23 melt crystal M A	74 26	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =27 MnO =73 100
1520 above	23 melt crystal M A	70 30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =75 MnO =25 100
1520 below	23 melt crystal M A	70 30	MnO =57.5 MnO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =42.5 100

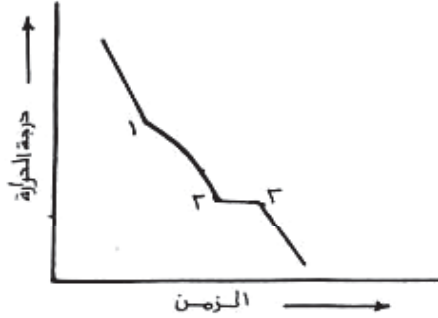
## *Phase Diagram Of Ceramic Materials-----Lec 4*

---

--	--	--	--



حيث تؤشر النقطة ( 1 ) بداية الانجماد والنقطة ( 2 ) نهايته . وفي درجات الحرارة بين (2,1) تكون السبيكة سائلة جزئياً وجامدة جزئياً، وتعتمد كمية كل من السائل والجامد على درجة الحرارة ، اما السبائك التي عناصرها تامة الذوبان في الحالة السائلة وعديمة الذوبان في الحالة الصلبة فيكون المنحنى كما في الشكل (3-4) .

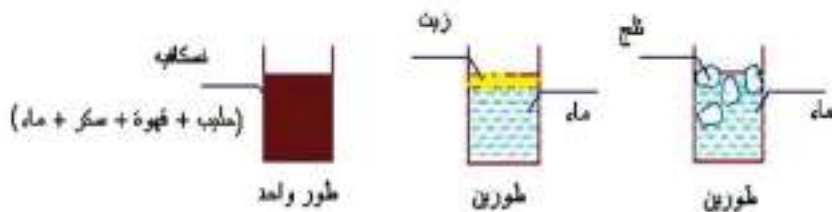


الشكل (3-4) منحنى التبريد في السبائك الثنائية تكون

حيث يلاحظ في هذا المنحنى ان الجزء المحصور ما بين النقطتين (2,1) يماثل منحنى التبريد للسبيكة الثنائية التي تكون مطولاً جامداً، والجزء المحصور بين (3,2) يماثل منحنى التبريد للمعادن النقية . في جميع السبائك من هذا النوع هناك سبيكة ذات تركيب محدد من المعدنين تبقى سائلة بشكل تام وفي درجة حرارة اقل من جميع التراكيب الاخرى لهذه السبيكة وتسمى بسبيكة اليوتكتك .

### ٣-٤ الطور

يعرف الطور بأنه جزء من المادة متجانس له خواصه الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية المميزة . مثال لذلك الثلج في الماء هما طوران لأنه يمكننا تمييز الماء عن الثلج رغم ان لهما نفس التركيب الكيميائي . الزيت والماء عند خلطهما والانتظار لفترة ليطفو الزيت فوق الماء ويمكن تمييزهما ولذلك فهما طوران . المثال الثالث هو النسكافيه ( القهوة بالحليب ) فهي طور واحد رغم احتوائها على عدة عناصر ( قهوة - سكر - حليب - ماء ) الا انها امتزجت مع بعضها بحيث لا يمكن تمييز هذه العناصر واصبحت طوراً اسمه نسكافيه . الشكل (3-5) يوضح هذه الامثلة .



الشكل (3-5) امثلة توضح مفهوم الطور

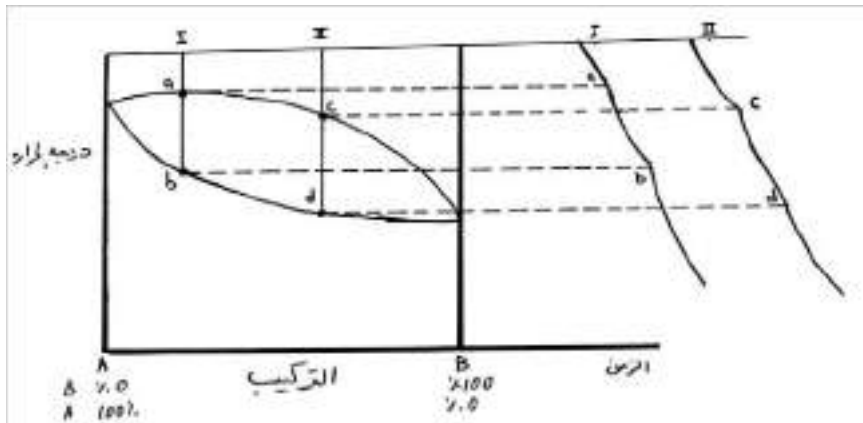
### ٣-٥ مخططات الاتزان الحراري

لدراسة السبائك دراسة علمية سليمة ، لا بد من دراسة ما يسمى بمخططات الاتزان الحراري وسوف نقتصر هنا على مخططات الاتزان الحراري للسبائك الثنائية .

يمكن تعريف مخطط الاتزان الحراري بأنه تمثيل تخطيطي للأطوار المستقرة عند درجات الحرارة المختلفة والتركيبات المختلفة للسبيكة وفي احيان قليلة يؤخذ الضغط في الاعتبار ولكنه في معظم الاحيان يهمل وفي دراستنا هنا سوف نهمل تأثير الضغط .

#### ٣-٥-١ منحنيات التبريد ومخطط الاتزان الحراري

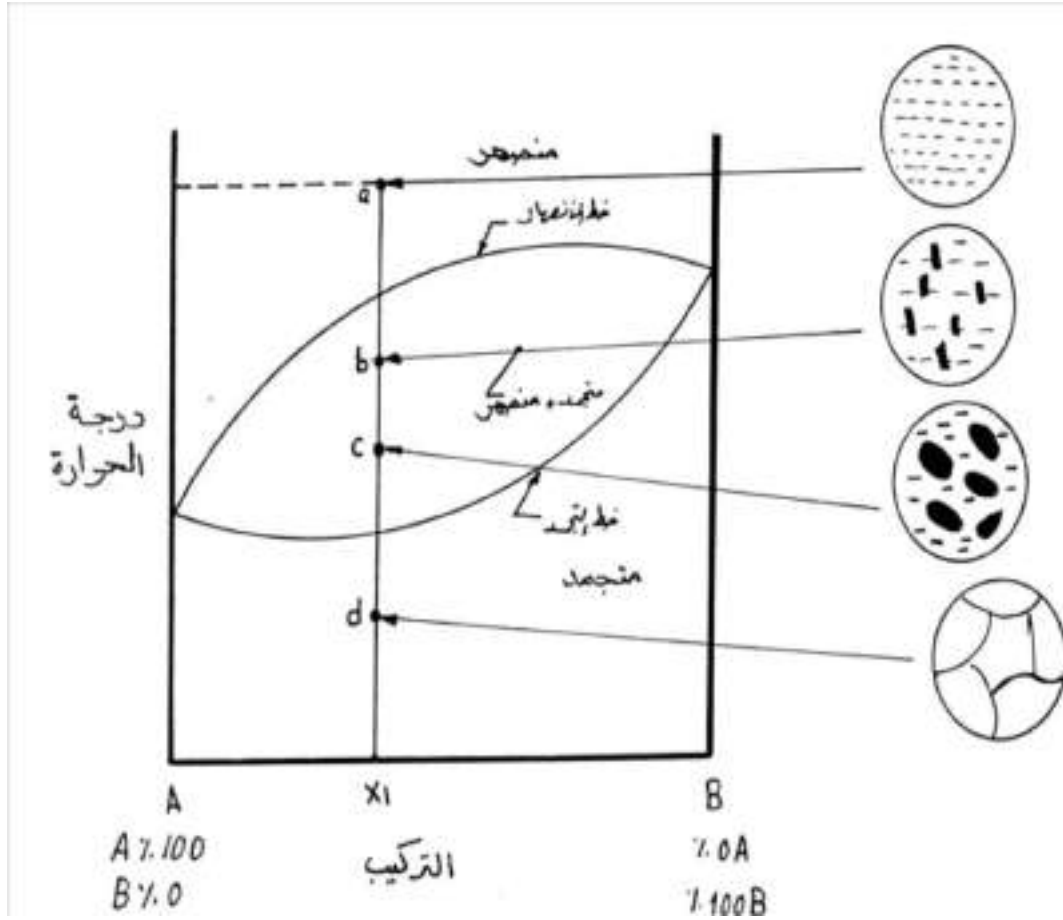
لرسم مخطط الاتزان الحراري لسبيكة ما فإنه لا بد من ايجاد منحنيات التبريد للسبيكة وهي ببساطة عمليات صهر للسبيكة بتركيبات مختلفة من عناصرها ثم تركها تبرد ببطء ورسوم منحنيات تغير الحرارة مع الزمن ( منحنيات التبريد ) للتركيبات المختلفة . عند وجود تغير في حالة السبيكة ( اطوارها ) يظهر ذلك على شكل تغير فجائي في معدل التبريد . تسجل درجات الحرارة التي حدث عندها التغيرات مع تركيب السبيكة . وتوضع هذه النقاط على محورين . المحور الافقي هو تركيب السبيكة والمحور الرأسي هو درجة الحرارة وبايصال هذه النقاط يمكن رسم مخطط الاتزان الحراري . الشكل (3-6) يوضح طريقة رسم مخطط الاتزان الحراري .



الشكل (3-6) مثال لطريقة رسم مخطط الاتزان الحراري من منحنيات التبريد

كلمة الاتزان الحراري هنا تعني ان المادة تصل الى حالة الاتزان عند درجة حرارة معينة أي انها تحدث كل التغيرات الواجب حدوثها وهذا يعطل عملية التبريد ببطء بالإضافة الى شكل مخطط التوازن الحراري ، فإنه يجب فحص عينات للبنية الدقيقة للأطوار المختلفة لكي تبقى دراسة السبائك متكاملة .

يمثل الشكل (7-3) مخطط الاتزان الحراري لمادتين تامتين الذوبان كالنيكل والنحاس مثلاً .

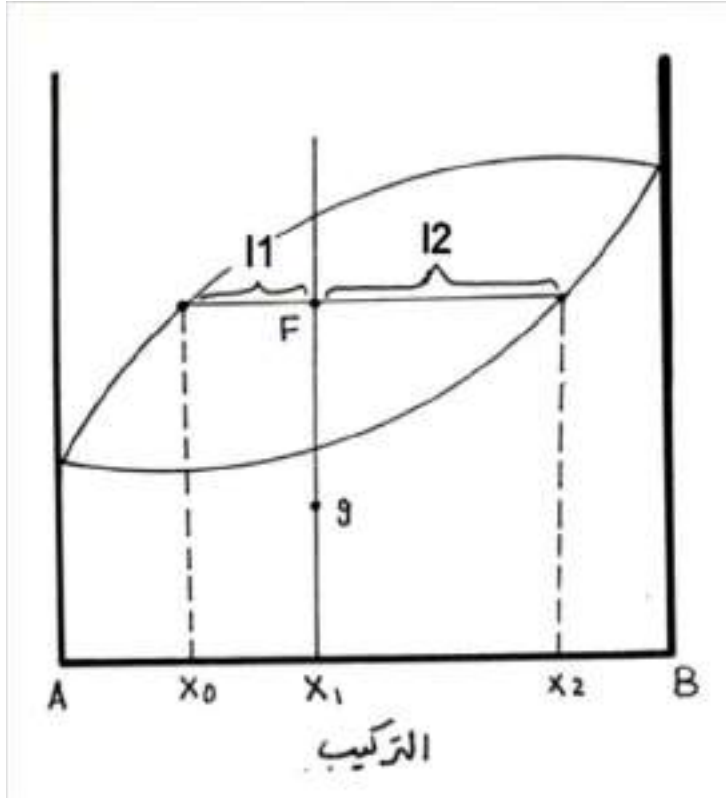


الشكل (7-3) مخطط الاتزان الحراري لمادتين تامتين الذوبان

هناك ما يسمى بخط الانصهار وهو الخط الذي اعلاه لا يوجد غير منصهر وخط التجمد وهو الخط الذي اسفله لا يوجد غير متجمد وما بينهما يكون خليط من منصهر ومتجمد . عند النقطة (a) تكون السبيكة كلها منصهرة وعند النقطة (b) يكون هناك بعض المتجمد والباقي منصهر . عند النقطة (c) تزيد نسبة المتجمد الى المنصهر . عند النقطة (d) تكون كل السبيكة متجمد .

### ٣-٥-٢ قاعدة العتلة

في الشكل (7-3) هناك طور واحد عند النقطة a ، d وهناك طوران عند النقاط b ، c . عند وجود طور واحد فإن نسبة الاطوار تكون 100% والتركييب للطور هو نفس تركييب السبيكة . عند وجود اكثر من طور فإن هناك نسبة من كل طور كما ان كل طور له تركييبه الخاص الذي يختلف عن تركييب السبيكة ولإيجاد ذلك نتبع قاعدة العتلة كما هو موضح بالشكل (8-3) .



الشكل (3-8) قاعدة العتلة ( الخط الافقي )

في هذا الشكل السبيكة مكونة من عنصرين A ، B . عند الطرف الايسر من المحور الافقي يكون تركيب السبيكة 100% A أي 0% B وبالتالي يكتب الحرف A وفي الطرف الايمن يكون التركيب 100% B أي 0% A وبالتالي يكتب الحرف B . ما بينهما هو خليط من الاثنين (X) . عند النقطة F ( تركيب  $x_1$  ) هناك طوران هما سائل ومتجمد . لإيجاد نسبة الاطوار وتركيب الاطوار ، نرسم من نقطة F خطاً أفقياً ليتقاطع مع خط المنصهر وخط المتجمد ويكون تركيب السائل هو  $x_0$  وتركيب المتجمد هو  $x_2$  والنسبة بينهما هي :-

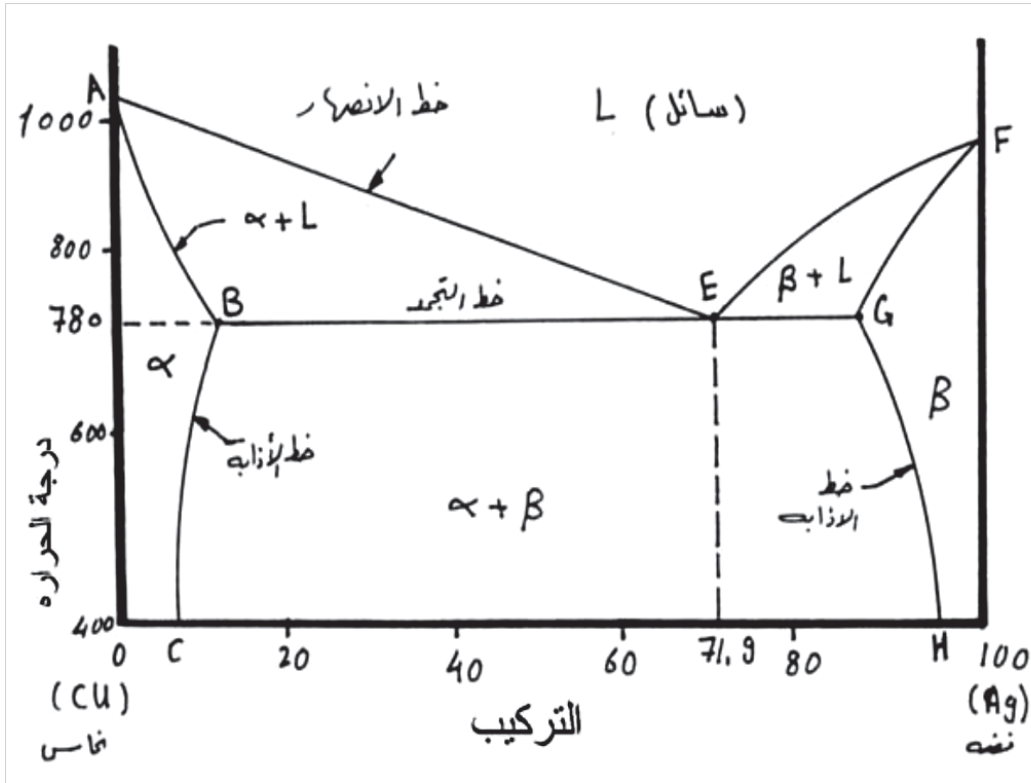
$$\frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0} = \frac{l_1}{l} = \text{نسبة المتجمد}$$

$$\frac{x_2 - x_1}{x_2 - x_0} = \frac{l_2}{l} = \text{نسبة السائل}$$

حيث ان  $l$  هي المسافة بين نقطتي تقاطع العتلة مع خط المنصهر وخط المتجمد ( $l = l_1 + l_2$ ) . تقسم هذه المسافة عند تركيب  $x_1$  الى مسافتين  $l_1$  القريبة من المتجمد و  $l_2$  المسافة القريبة من السائل أي ان نسبة السائل والمتجمد تحسب بالمسافات العكسية وهذه قاعدة عامة .

### ٣-٥-٣ مخطط اتزان حراري لمادتين تامتي الذوبان في الحالة السائلة ومحدوديتي الذوبان في الحالة المتجمدة

المثال هنا كما هو موضح بالشكل (8-3) وهو شكل تقريبي لمخطط الاتزان الحراري للنحاس والفضة .



الشكل (8-3) شكل تقريبي لمخطط الاتزان الحراري للنحاس والفضة

ويعرف هذا المخطط بالمخطط الثنائي اليوتكتيكي للاتزان الحراري . اما كلمة ثنائي فإنه يتكون من مركبين ( الفضة والنحاس ) وكلمة يوتكتيكي هذه لما يحدث عند نقطة E وهي ما تسمى بنقطة اليوتكتيك وهذا ما سنتناوله بالشرح لاحقاً . هناك عدة سمات لهذا المخطط وهي :-

١ . هناك ثلاثة اطوار موجودة في المخطط وهي السائل و  $\beta$  و  $\alpha$  . الطور  $\alpha$  هو محلول متجمد غني بالنحاس وهو يحتوي على نسبة من الفضة كمذاب في هذا المحلول . الطور  $\beta$  وهو غني بالفضة والنحاس مذاب فيه .

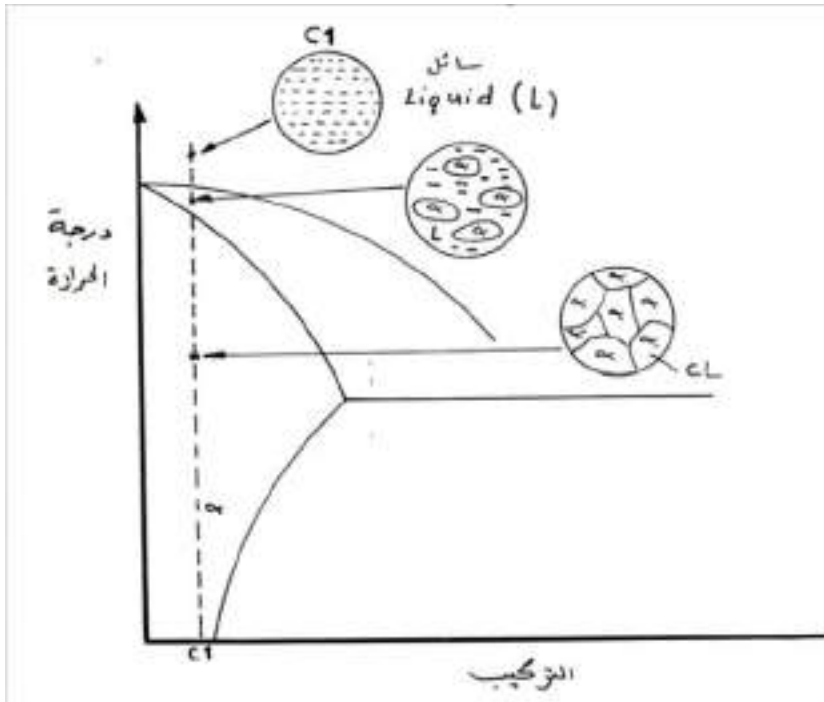
٢ . يمثل الخط CBA حدود اذابة الفضة في النحاس كما يمثل الخط HGF حدود اذابة النحاس في الفضة .

٣. تكون نسبة الاذابة ( سواء فضة في نحاس أو نحاس في فضة ) اقصاها على الخط الافقي . BEG

٤. تكون اقل درجة انصهار ( على نفس الخط BEG ) عند نقطة E . وهذا الخط الافقي هو جزء من خط التجمد .

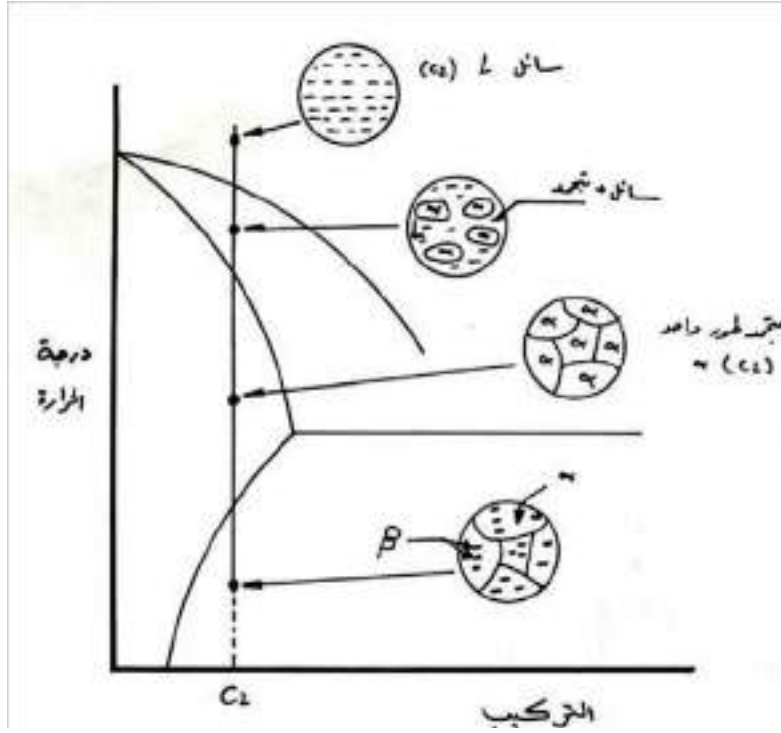
٥. هناك ثلاث مناطق حيث يوجد طوران فالمنطقة AEB بها  $\alpha + L$  والمنطقة EGF بها  $\beta + L$  والمنطقة تحت الخط CBEGH بها  $\alpha + \beta$  ويتم تعيين كمية كل طور وتكوينه بنفس قاعدة العتلة السابقة .

٦. النقطة E يلتقي عندها ثلاثة اطوار  $\alpha$  ،  $\beta$  ، L ويكون عندها اقل درجة انصهار وتسمى نقطة اليوتكتيك وفي هذه الحالة ( اي في هذا المخطط ) فإن هذه النقطة تحدث عند درجة حرارة  $780^{\circ}\text{C}$  وتركيب 71.9 % فضة واذا لاحظنا فإن هناك ثلاثة اطوار تتجمع عند هذه النقطة . يوضح الشكل (3-9) البنية الدقيقة عند تركيب  $C_1$  ( الذي ينتهي بطور واحد  $\alpha$  ) عند درجات الحرارة المختلفة .



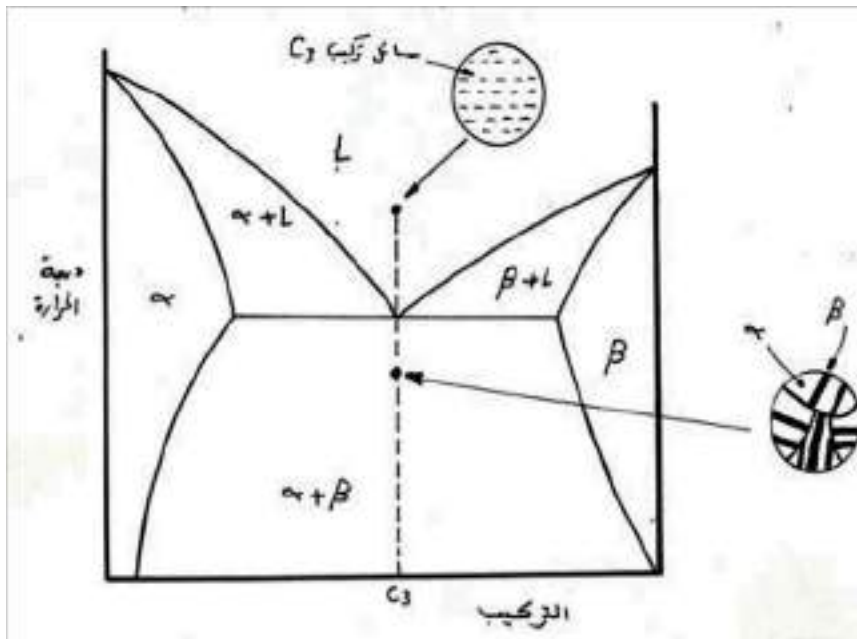
الشكل (3-9) البنية الدقيقة عند تركيب  $C_1$  الذي ينتهي بطور واحد

يوضح الشكل (3-10) البنية الدقيقة عند تركيب  $C_2$  الذي ينتهي بطورين  $\alpha$  ،  $\beta$  عند درجات الحرارة المختلفة .



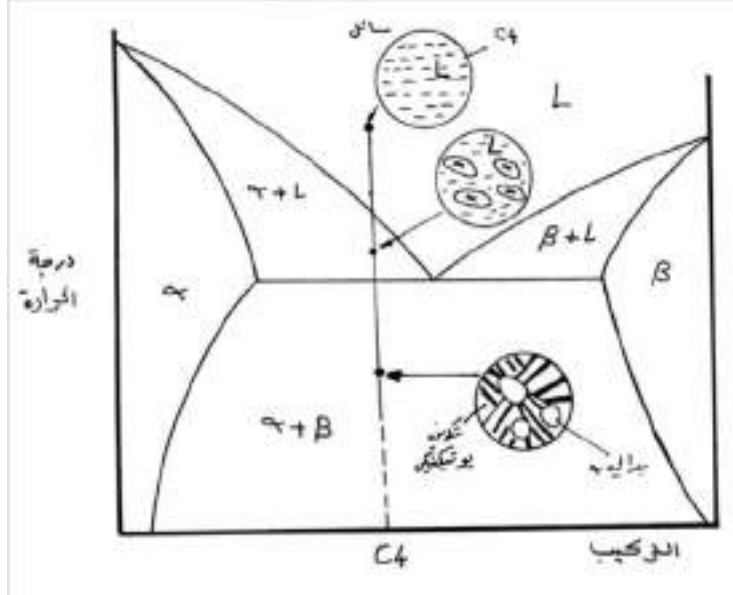
الشكل (10-3) البنية الدقيقة عند تركيب  $C_2$  الذي ينتهي بطورين

كما يوضح الشكل (11-3) البنية الدقيقة عند التركيب اليوتكتيكي عند درجات الحرارة المختلفة . عند درجات حرارة اقل من اليوتكتيك نجد ان البنية الدقيقة مميزة الشكل فهي على شكل مخطط وتسمى لاملاي (LAMELLAE) .



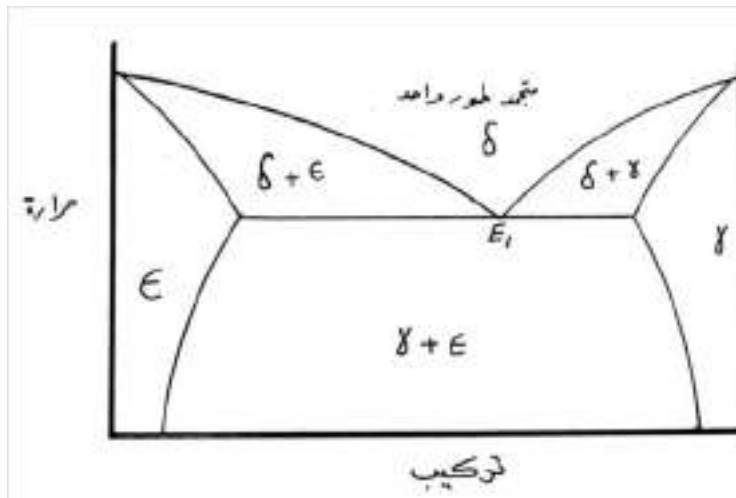
الشكل (11-3) البنية الدقيقة عند التركيب اليوتكتيكي

يوضح الشكل (3-12) البنية الدقيقة عند تركيب  $C_4$  (الذي ينتهي بطورين  $\alpha$  ،  $\beta$  ولا يمر بالطور  $\alpha$ ) عند درجات الحرارة المختلفة . عند درجات حرارة اقل من اليوتيكتيك نجد ان اللاملاي (LAMELLAE) موجودة بالاضافة الى  $\alpha$  ابتدائي . يمكن استنتاج البنية الدقيقة لباقي الخطط مع الاخذ في الاعتبار سيادة الطور  $\beta$  بدلاً من  $\alpha$  .



الشكل (3-12) البنية الدقيقة عند تركيب  $C_4$  الذي ينتهي بطورين ولا يمر بالطور  $\alpha$

كما انه يوجد تركيب يوتيكتيكي ( نقطة بها ثلاثة اطوار ) . هناك مخططات اتزان حرارية ثنائية اخرى فيها نقاط ذات ثلاثة اطوار مثل :-  
 ١. التركيب اليوتيكتيكي كما هو موضح بالشكل (3-13) والفرق عن التركيب اليوتيكتيكي هو ان جميع اطواره متجمدة .

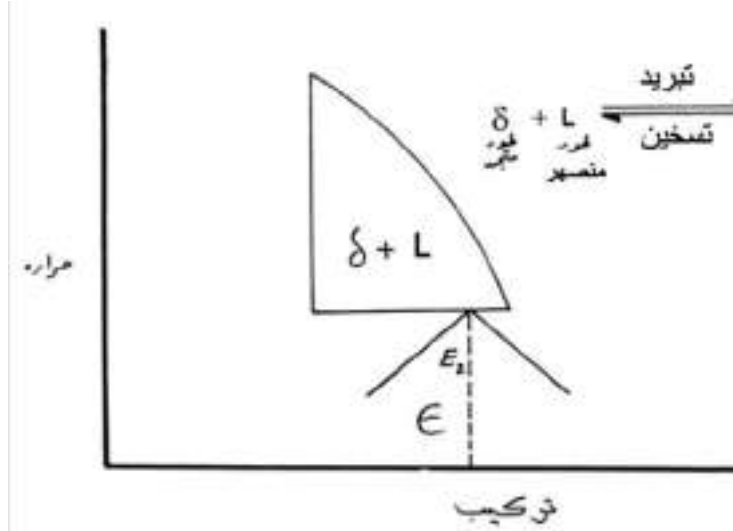


الشكل (3-13) التركيب اليوتيكتيكي



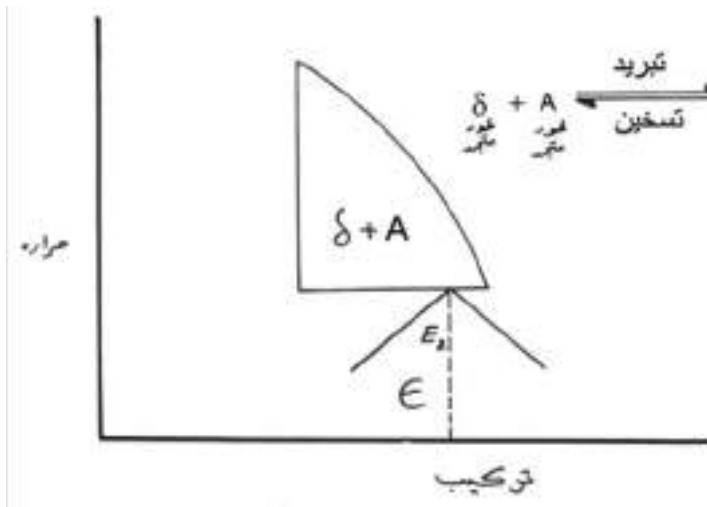
فالتركيب اليوتيكتيكي يكون سائلاً فوق حرارة اليوتيكتيك ويكون طورين متجمدين تحت درجة حرارة اليوتيكتيك . اما التركيب اليوتيكتويدي فيكون طوراً واحداً متجمداً فوق حرارة اليوتيكتويد ويتحول الى طورين متجمدين تحت اليوتيكتويد .

٢. التركيب البريتيكتيكي كما هو موضح بالشكل (3-14) فهو عبارة عن طورين احدهما سائل فوق درجة حرارة البريتيكتيك وطور واحد متجمد تحت درجة حرارة البريتيكتيك .



الشكل (3-14) التركيب البريتيكتيكي

٣. التركيب البريتكتويدي كما هو موضح بالشكل (3-15) فهو عبارة عن طورين متجمدين في درجة حرارة فوق البريتيكتويد وطور واحد في درجة حرارة اقل من البريتيكتويد .

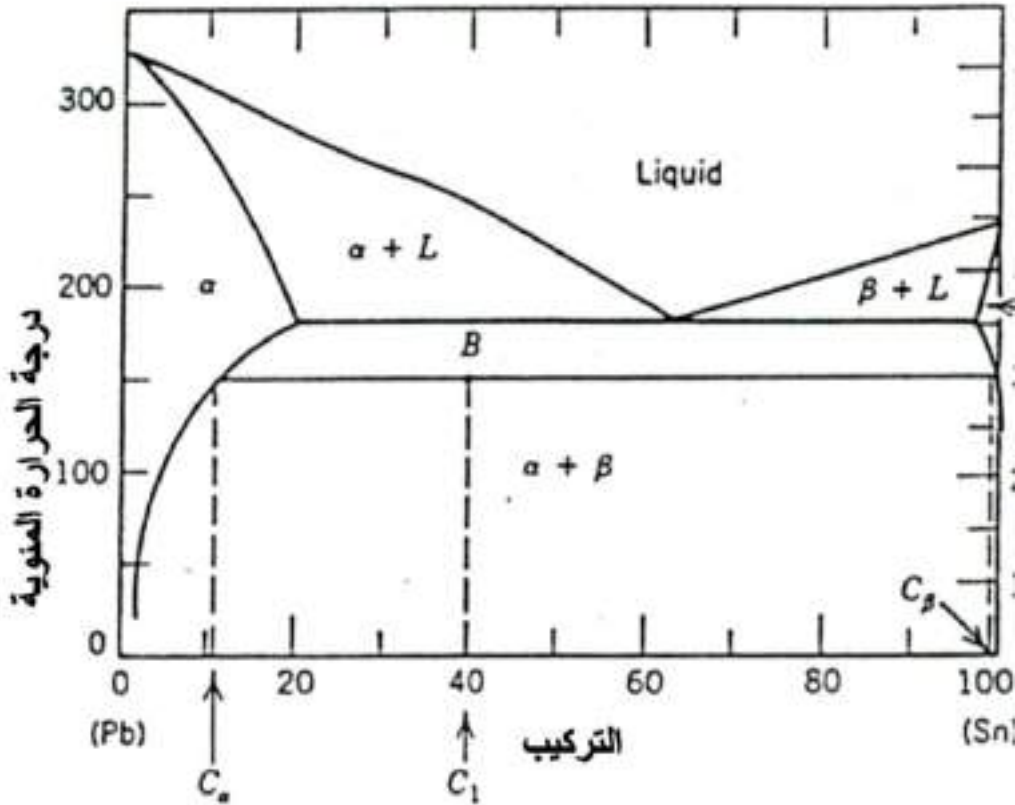


الشكل (3-15) التركيب البريتكتويدي

## مثال

في منحني الرصاص Pb والقصدير Sn المبين بالشكل (3-16) عند تركيب 40% Sn ودرجة حرارة 150°C اوجد :-

1. تركيب كل من الطورين  $\alpha$  و  $\beta$  .
2. نسبة اوزان كل طور .



الشكل (3-16) مخطط الاتزان الحراري للرصاص والقصدير

## الحل

كما هو موضح بالشكل (3-16) وبتطبيق قاعدة العتلة المذكور سابقاً اذن :

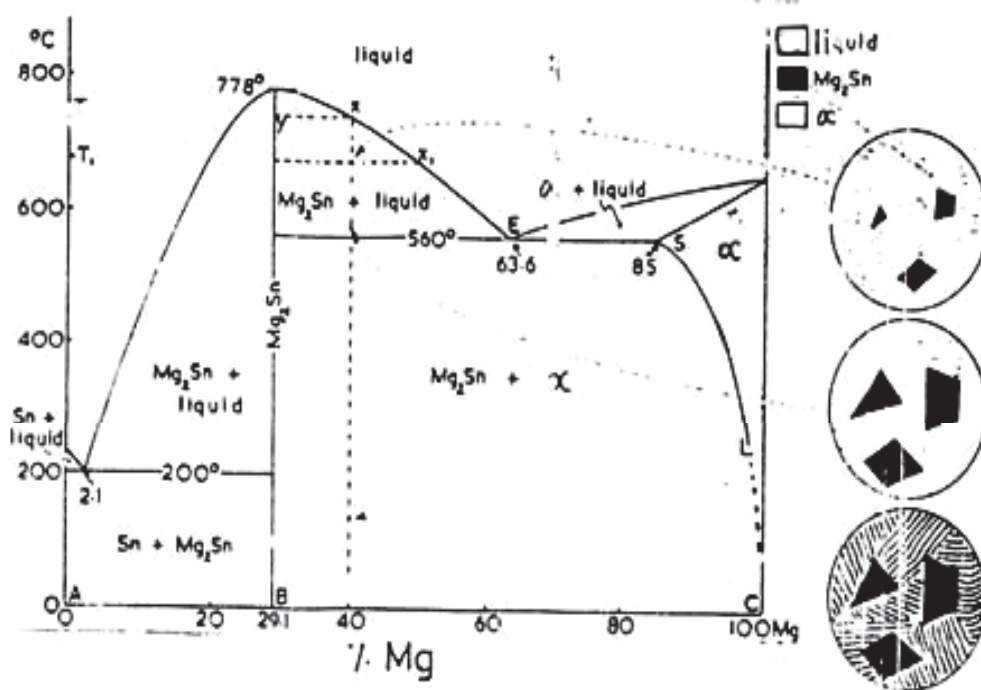
تركيب  $\alpha$  ( 89% Pb ، 11% Sn )

تركيب  $\beta$  ( 1% Pb ، 99% Sn )

نسبة الطور  $\alpha$  =  $99 - 11 / 99 - 40 = 0.67$

نسبة الطور  $\beta$  =  $40 - 11 / 99 - 11 = 0.33$

لا تشكل المكونات في العديد من السبائك مركباً واحداً فقط وإنما قد تشكل مركبين أو ثلاثة أو أكثر . وتتمتع هذه المركبات بدرجات إنصهار مختلفة عن درجات إنصهار مكوناتها (عناصرها) ويمثل الشكل (3-17) مخطط حالة سبيكة مغنيسيوم - قصدير التي يشكل فيها هذان العنصران مركباً الذي يحوي المغنيسيوم بنسبة 29.1% وزناً و يوافق الصيغة  $Mg_2Sn$  .



الشكل (3-17) مخطط التوازن الحراري لسبيكة Mg-Sn

ينصهر هذا المركب عند درجة  $778^{\circ}C$  أي عند درجة اعلى من درجة إنصهار كل من المغنيسيوم النقي  $650^{\circ}C$  والقصدير النقي  $232^{\circ}C$  وتشكل في هذه السبيكة أيضاً محاليل صلبة ل  $Mg_2Sn$  في المغنيسيوم الطور  $\alpha$  . ويظهر مخطط التوازن الحراري لهذه السبيكة وكأنه مؤلف من قسمين:-

١. مخطط السبيكة Mg-Mg<sub>2</sub>Sn ويحتوي على نقطة يوتيكتيك توافق التراكيب 63.6% مغنيسيوم ودرجة حرارة  $560^{\circ}C$  .

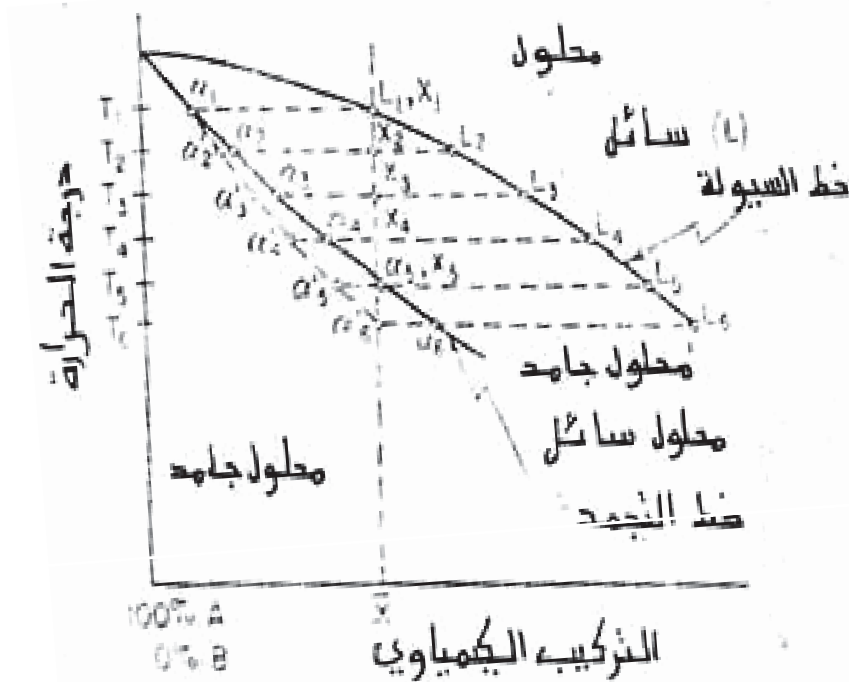
٢. مخطط السبيكة Sn-Mg<sub>2</sub>Sn ويحتوي على نقطة يوتيكتيك توافق التراكيب 2.1% مغنيسيوم ودرجة حرارة  $200^{\circ}C$  .

ويتلخص الاختلاف الاساسي بين هاتين السبيكتين في ان اطوار السبيكة الحاوية على اكثر من 29.1% Mg لا توجد فيها بلورات من القصدير وانما تتألف من الطور  $\alpha$  ( وهو محلول جامد من

القصدير والمغنيسيوم ) مع بلورات المركب  $Mg_2Sn$  . بينما لا توجد في الاطوار للسبيكة الحاوية على اقل من 29.1% Mg الطور  $\alpha$  بل تتألف من بلورات القصدير وبلورات المركب  $Mg_2Sn$  نفسه . وبصورة تامة يمكن اعتبار هذا المخطط مكوناً من مخططين من النوع الثاني والنوع الثالث ويتميز بوجود نهاية عظمى مكشوفة .

### ٦-٣ تأثير معدل التبريد

لا يمكن المحافظة على حالة التوازن بين الطورين الجامد والسائل في اثناء انجماد السبيكة في الظروف الاعتيادية ، ويعزى ذلك الى قلة الزمن الكافي للانتشار في الطور الجامد الامر الذي يؤدي الى تكوين الانعزال الشجري ، ففي الشكل (3-18) يظهر قسم من النظام المتماثل ، وعندما يبرد سائل يمثل تركيبه الكلي بنقطة  $\bar{X}$  الى درجة حرارة  $T_1$  ، يبدأ الانجماد بتكوين بلورات  $\alpha_1$  لا تتوفر له الفرصة لتعديل التركيب الى  $\alpha_2$  .



الشكل (3-18) جزء من مخطط الاطوار لتوضيح منشأ العزل المجهرى اثناء

التبريد اللامتوازن للمعدن المنصهر

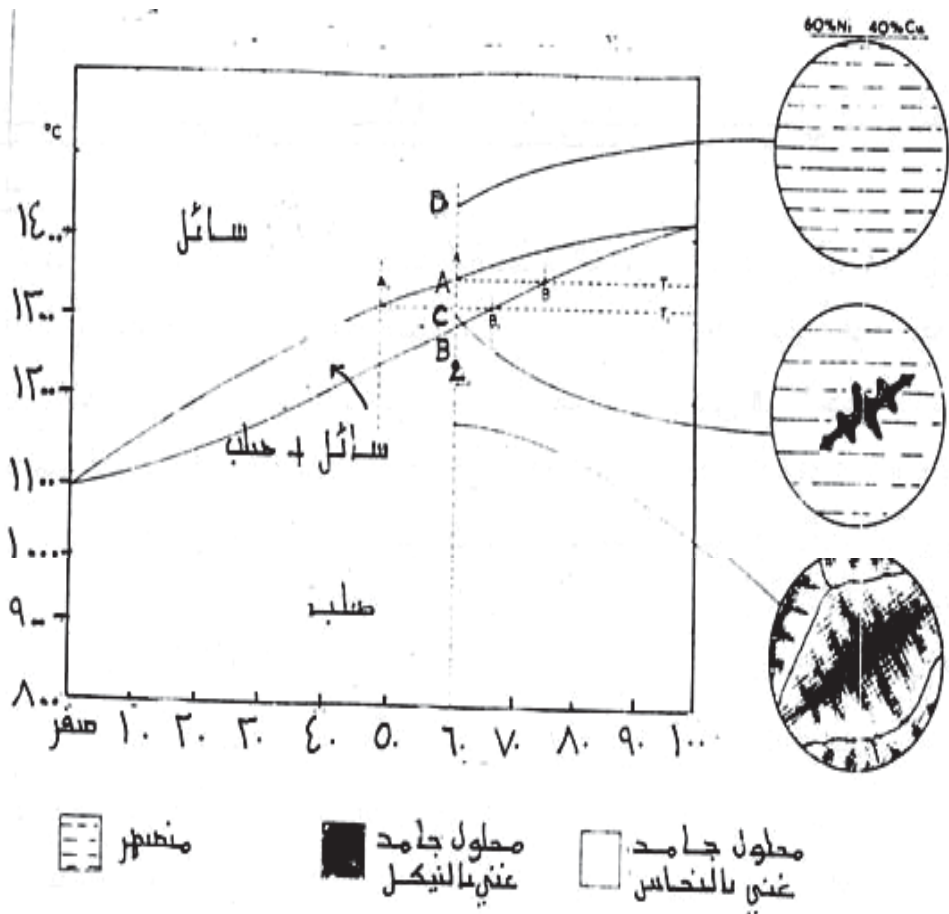
وعلى اي حال فإن  $\alpha_1$  لا تتوفر له الفرصة لتعديل التركيب الى  $\alpha_2$  بسبب عدم توفر الزمن الكافي للانتشار وحصول التوازن ، لذلك يكون معدل تركيب الطور الجامد ما بين  $\alpha_1$  ،  $\alpha_2$  ولنقول  $\alpha_2$  ، وهذا

يعني انه عندما يحدث الانجماد السريع ستتكون بلورات فيها محلول جامد قليل بالمقارنة مع البلورات المتكونة في اثناء الانجماد البطيء . يتبع معدل التركيب للطور الصلب الخط المنقط في اثناء تقدم الانجماد ويكون دائماً الى يسار منحنى توازن الجامد في المخطط الميكن .

ويتوقع في درجة حرارة  $T_5$  ان يكون النظام كامل التجمد في ظروف الانجماد المتوازن ، وفي الواقع يمكن ملاحظة بعض قطرات من السائل لا زالت موجودة ، وحتى بلوغ درجة الحرارة  $T_6$  فإن تركيب طور الجامد ليس التركيب الاول للسائل ، ويمون الانجماد قد انتهى في درجة الحرارة هذه . وتنتج عملية الانجماد بما يعرف بالعزل المجهري .

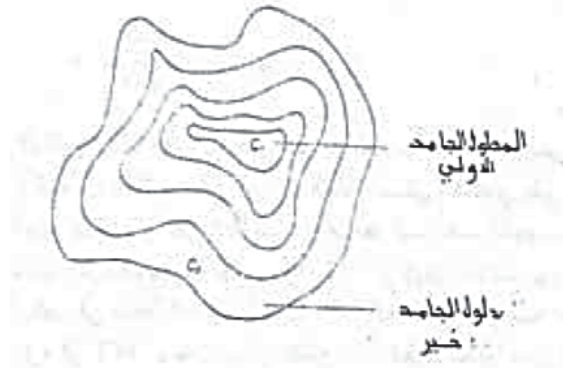
### ٧-٣ العزل المجهري

يتضح من التبريد السريع لسبيكة النحاس - نيكل في الشكل (3-19) ، ان البلورات الاولى التي تكونت في درجة  $1350^{\circ}\text{C}$  كانت غنية بالنيكل (Cu 25% - Ni 75%) .



الشكل (3-19) مخطط الاتزان الحراري لسبيكة النحاس - نيكل

بينما كان المنصهر فقيراً بالنيكل وغنياً بالنحاس الشكل (3-20) .



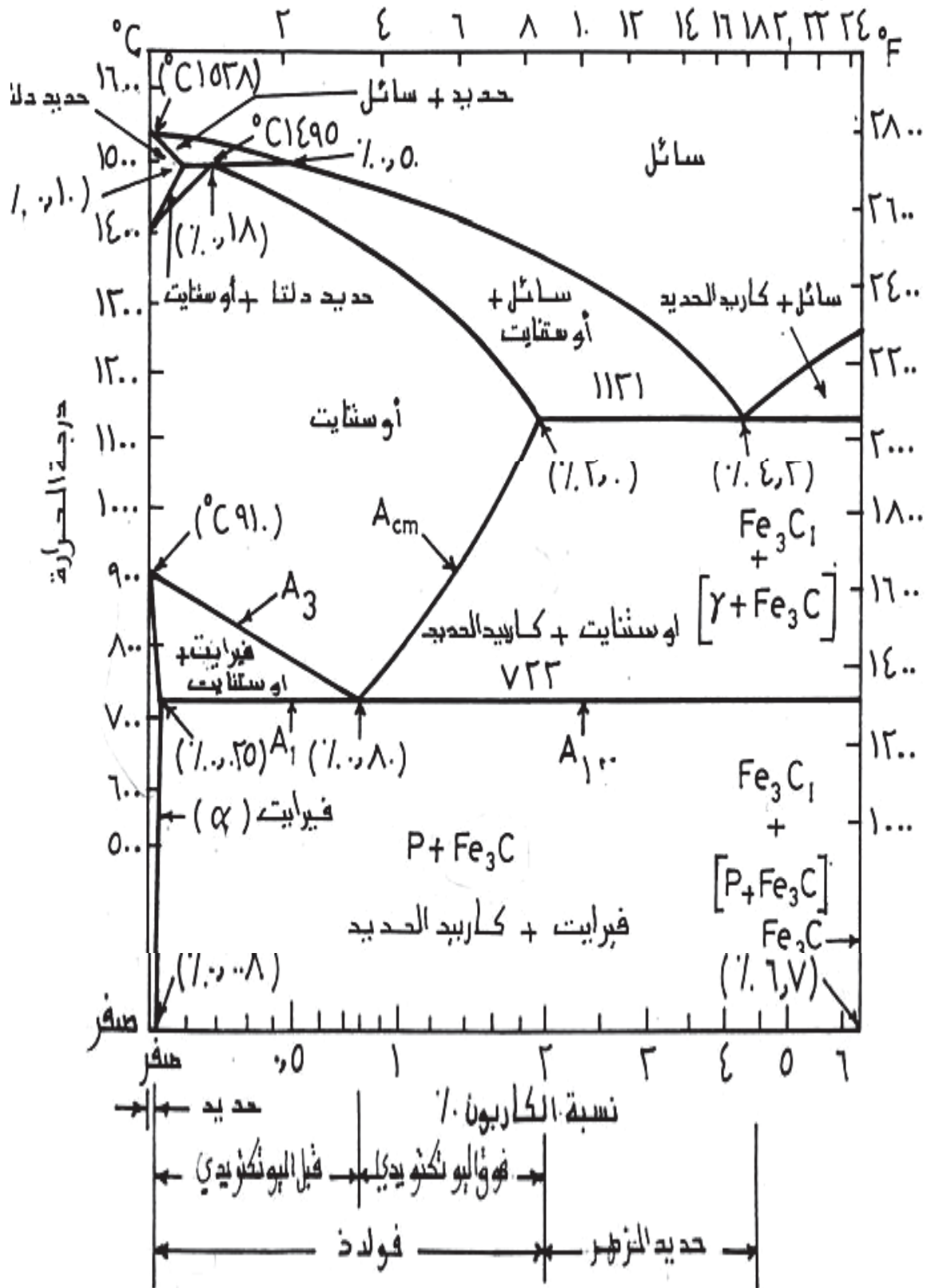
الشكل (3-20) العزل المجهري المتغير من  $C_1$  الذي تركيبه  $Cu\ 25\% - Ni\ 75\%$  الى  $C_2$  الذي تركيبه  $Cu\ 40\% - Ni\ 60\%$

وبهبوط درجة الحرارة الى  $1300^\circ C$  تزداد اعداد البلورات المتجمدة على حساب المنصهر كما يتغير تركيب البلورات المتجمدة من  $Ni\ 75\%$  الى  $Ni\ 68\%$  ، وتحيط البلورات الجديدة بالبلورات القديمة علاوة على تكون بلورات منفردة جديدة في التركيب الجديد ، وبهبوط درجة الحرارة الى  $1280^\circ C$  يصبح تركيب البلورات ( $Cu\ 40\% - Ni\ 60\%$ ) التركيب الاساسي للسبيكة ، وفي كل الحالات السابقة تحيط البلورات الجديدة بالبلورات الاقدم منها ، وهذا يعني ان مركز الحبيبة يكون غنياً بالنيكل في حين يكون طرف الحبيبة فقيراً بالنيكل غنياً بالنحاس الامر الذي يؤدي الى عدم تجانس مكونات السبيكة وهذا ما يسمى "العزل المجهري" فلو تمت عملية التبريد بشكل بطيء ومتوازن فإن الوقت سيصبح كافياً ليتم الانتشار بين ذرات البلورات الاولية وذرات البلورات المحيطة بها ليتجانس تركيبها في جميع المناطق .

ويمكن التقليل من العزل المجهري بتسخين السبائك بعد تجمدها لفترات طويلة عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً بحيث تكون كافية لحدوث عمليات الانتشار ، وتدعى هذه العملية التلدين الانتشاري (Diffusion Annealing) حيث تختفي البنية غير المتجانسة للمسبوكات المعدنية وتظهر بدلاً منها بنية مكونة من بلورات متجانسة من المحلول الجامد وبذلك تتحسن الخواص العامة للمسبوكة .

### ٣-٨ مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون

يبين الشكل (3-21) مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون .



الشكل (3-21) مخطط الاتزان الحراري للحديد

في هذا الشكل نلاحظ ما يأتي :-

١. عند درجة حرارة الغرفة هناك طوران هما  $\alpha$  ويسمى فرايت (Ferrite) اما الطور الاخر فهو  $(Fe_3C)$  وهو غني بالكربون ويسمى سمنايت (Cementite) او في بعض الاحيان يسمى كريد (Carbide) ونسبة الكربون فيه 6.7% وهي اقصى نسبة كربون يمكن اذابتها في الحديد .
٢. طور الفريت به نسبة قليلة جداً من الكربون وتركيبه البلوري ( الخلية الوحيدة له ) هو B.C.C. وعند تسخينه يحدث له تغير الى الطور  $\gamma$  ويسمى الاوستنايت (Austenite) . واذا اعتبرنا الحديد النقي ، فإن هذا التغير يحدث عند درجة حرارة  $912^{\circ}C$  وهذا الطور  $\gamma$  له تركيب بلوري F.C.C. .
٣. يتحول الحديد النقي مرة ثانية من  $\gamma$  الى طور يسمى  $\delta$  فريت عند درجة حرارة  $1394^{\circ}C$  ويعود هذا الطور مرة اخرى الى التركيب البلوري B.C.C. . تسمى هذه العملية بالبولي مورفيسم (Polymorphism) . يعرف البولوي مورفيسم بأنه قابلية المادة بالتواجد بأكثر من تركيب بلوري .
٤. الكربون يعتبر كمذاب في الحديد وهو كذرة غريبة مقحمة ( شوائب ) . الاماكن التي تجدها ذرات الكربون كذرات مقحمة في الـ F.C.C. اكثر من الـ B.C.C. ( رغم ان معامل الاكتظاظ في الـ F.C.C. اكثر من الـ B.C.C. ) وهذا يعلل ان نسبة الكربون في  $\gamma$  الاوستنايت (F.C.C.) اكبر من نسبة الكربون في  $\alpha$  او  $\delta$  فريت (B.C.C.) .
٥. لان الطور  $\delta$  فريت هو طور مستقر عند درجات حرارة عالية جداً لذلك فإنه ليست له قيمة عملية .
٦. من ناحية الخواص الميكانيكية فالسمنايت ( كريد ) صلب جداً وقصيف جداً وتحسن خواص الصلب بإضافة نسب منه .
٧. في الشكل (3-21) نلاحظ ان هناك ثلاث نقاط ثلاثية الاطوار :-  
 (أ) نقطة يوتيكتيك عند تركيب 4.3% كربون ودرجة حرارة  $1148^{\circ}C$  .  
 (ب) نقطة يوتيكتويد عند تركيب 0.77% ودرجة حرارة  $727^{\circ}C$  .  
 (ج) نقطة بريكتيك عند تركيب 0.2% ودرجة حرارة  $1538^{\circ}C$  .



### ٣-٩ سبائك الحديد والكربون

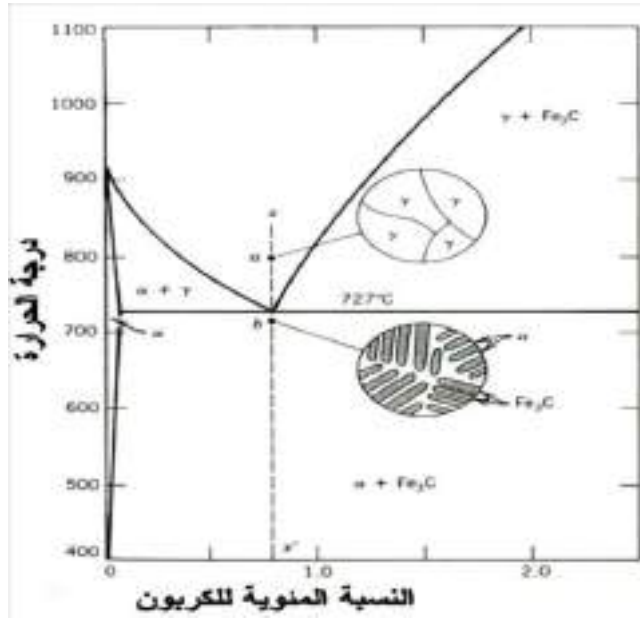
هناك ثلاثة مسميات لسبائك الحديد والكربون :-

١. حديد (Iron) وهو الذي يحتوي على نسبة كربون اقل من 0.008% .
  ٢. الصلب (Steel) وهو الذي يحتوي على نسبة كربون بين 0.008% - 2.11% وعادة في الحياة العملية فإنه قليلاً ما تجد صلباً تزيد فيه نسبة الكربون عن 1% .
  ٣. الحديد الزهر (Cast Iron) وهو الذي تتراوح نسبة الكربون فيه من 2.11% - 6.7% وعادة ما تكون نسبة الكربون في الحديد الزهر حوالي 4.5% .
- في الواقع فإن الصلب هو اهم سبائك الحديد والكربون واكثرهما استخداماً وفي كثير من الاحيان يضاف عناصر اخرى للصلب . بالنسبة للصلب اقل من 1% من وزن الكربون ، وهو الاكثر شيوعاً ، فإن معهد الحديد والصلب الامريكي (American Iron and Steel Institute) (AISI) ، والجمعية الامريكية للاختبار والمواد (American Society for Testing and Materials) (ASTM) قد وضعوا اعداداً نمطية متعارفاً عليها لكي نستطيع التعرف على السبائك وبالتالي التعرف على خواصها هذه الاعداد تتكون من اربعة ارقام صحيحة اول رقمين من اليسار الى اليمين يشيران الى العناصر الاخرى في السبيكة بالاضافة للحديد والكربون والرقمان الاخران يشيران الى نسبة الكربون .
- مثلاً صلب 1040 اخر رقمان هما 40 ومعنى ذلك ان نسبة الكربون 0.4% اما اول رقمين (وهما 10) يعنيان انه لا يوجد اي عنصر اخر سوى الكربون والحديد . صلب 9280 نسبة الكربون 0.8% ومن جداول خاصة فإن السبيكة تحتوي على سيليكون (2.2% - 1.8%) . صلب 4025 يحتوي على نسبة كربون 0.25% والسبيكة تحتوي على موليبيدينوم (Mo) بنسبة (0.3% - 0.2%) .
- عموماً اذا كان اول رقمين من اليسار 10 فهذا يعني انه لا يوجد اي عنصر اضافي واي ارقام اخرى معناها عناصر اضافية يمكن الحصول عليها من جداول خاصة . الرقمان الاخران يشيران الى النسبة المئوية للكربون وتوضع علامة عشرية قبلهما .

### ٣-١٠ البنية الدقيقة للصلب

#### ٣-١٠-١ التركيب اليوتيكتويدي

يوضح الشكل (3-22) البنية الدقيقة للتركيب اليوتيكتويدي عند المرور من الطور  $\gamma$  (الاستنايت) عند نقطة a الى  $\alpha$  (فرايت) +  $Fe_3C$  (سمنتايت) عند نقطة b .



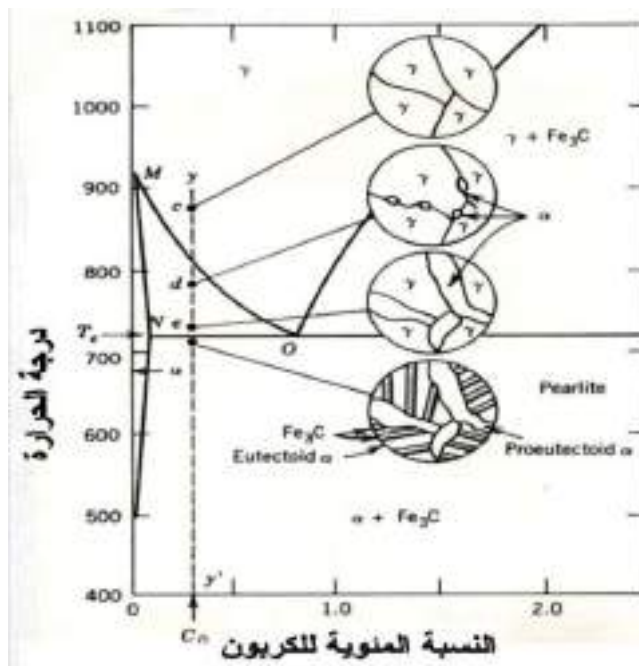
الشكل (3-22) البنية الدقيقة للصلب للتركيب اليوتكتويدي

تسمى البنية الدقيقة عند نقطة b بالبيرلايت (Pearlite).

### ٣-١٠-٢ التركيب تحت اليوتكتويدي

يوضح الشكل (3-23) البنية الدقيقة للصلب عندما تكون نسبة الكربون اقل من التركيب

اليوتكتويدي (0.77% من وزن الكربون).

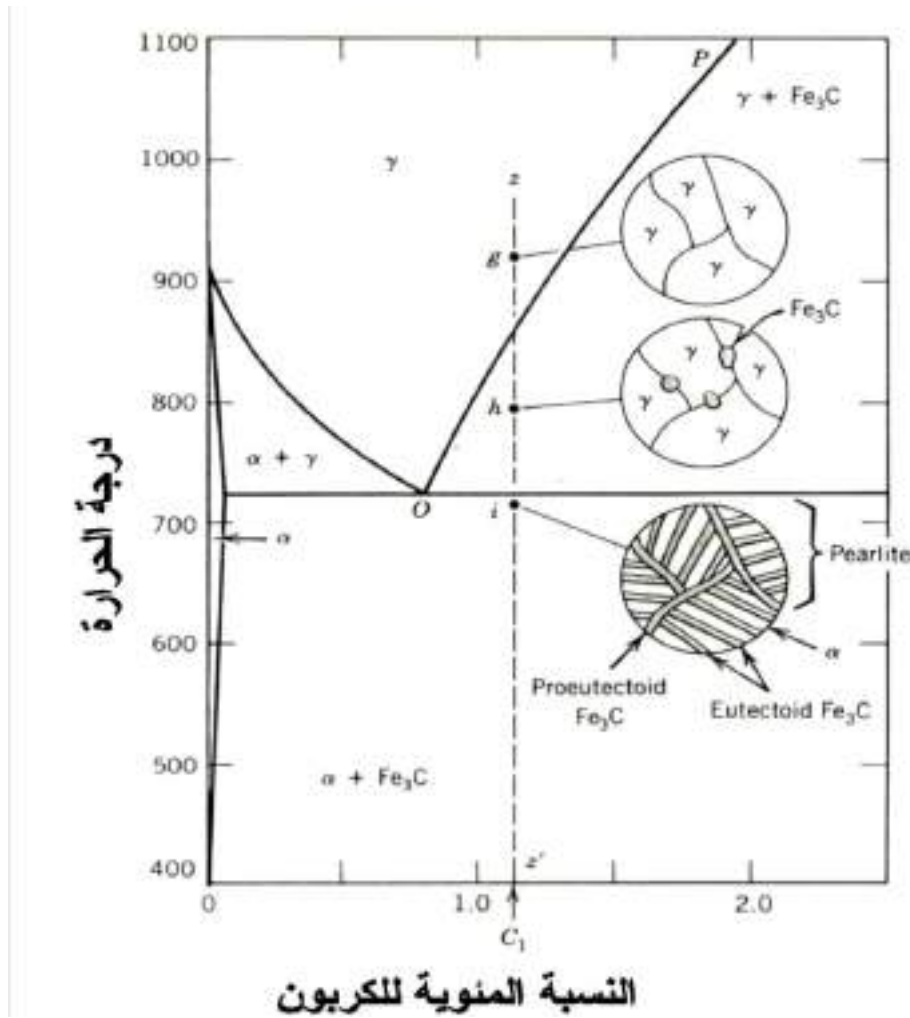


الشكل (3-23) البنية الدقيقة للصلب للتركيب تحت اليوتكتويدي

كما هو موضح بالشكل (3-23) ، عند نقطة c يكون هناك طور واحد وهو  $\gamma$  وعند النقاط d ، e ، يبدأ الطور  $\alpha$  في التكون عند حدود الحبيبات وعند درجة حرارة اقل من  $727^{\circ}\text{C}$  يكون التركيب من  $\alpha$  (فرايت) + برليت ( $\alpha$ +سمينتايت) .

### 3-10-3 التركيب فوق اليوتكتويدي

يوضح الشكل (3-24) البنية الدقيقة للصلب عندما تكون نسبة الكربون اكبر من التركيب اليوتكتويدي (0.77% من وزن الكربون) .



الشكل (3-24) البنية الدقيقة للصلب للتركيب فوق اليوتكتويدي

كما هو موضح بالشكل ، عند نقطة g يكون هناك طور واحد وهو  $\gamma$  وعند النقاط h يبدأ السيمينتيت في التكون عند حدود الحبيبات وعند نقطة i ( اقل من  $727^{\circ}\text{C}$  ) يكون التركيب هو سمنتايت + بيرلايت (سمنتايت + فرايت) .

## مثال

من مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون ، اذا كان هناك صلب تركيبه 99.65% حديد و 0.35% كربون في درجة حرارة اقل قليلاً من اليوتيكرويد ، اوجد نسبة الفرايت والسمنتايت وتركيب كل منها .

## الحل

من مخطط الحديد والكربون نجد ان :-

تركيب الفرايت 0.022% كربون والباقي حديد أو 99.98% حديد .

تركيب السمنتايت 6.7% كربون و 93.3% حديد بتطبيق قاعدة العتلة للنسب نجد ان :

$$0.95 = 6.7 - 0.022 = 6.7 - 0.35 = \alpha$$

$$0.05 = 6.7 - 0.022 = 0.35 - 0.022 = \text{نسبة السيمينتيت}$$

## مثال

اوجد كمية كل من  $\gamma$  و  $\alpha$  في (3 kg) من حديد يحتوي على نسبة كربون 0.4% عند درجات الحرارة التالية 850°C و 728°C و 726°C .

## الحل

عند درجة 850 : 3 كيلوغرام  $\gamma$  و لا يوجد  $\alpha$  .

عند درجة 728 : 1.46 كيلوغرام  $\gamma$  و 1.54 كيلوغرام  $\alpha$  .

عند درجة 726 : لا يوجد  $\gamma$  و 2.83 كيلوغرام  $\alpha$  .

## مثال

فولاذ قبل اليوتيكرويد يحتوي على 0.3% كربون وتتركب بنيته من  $\alpha$  والخليط اليوتيكرويدي  $[\alpha + Fe_3C]$  ، المطلوب تحديد كمية  $\alpha$  والخليط اليوتيكرويدي لهذا الفولاذ .  
(يمكن اهمال احتواء الفيرايت على الكربون بنسبة 0.025% في الحسابات العملية) .

## الحل

بالاستعانة بالشكل (3-25) وبتطبيق قاعدة الذراع نحصل على :

# الجزء الاول من محاضرات (هندسة المعادن ) المرحلة الثانية/ قسم هندسة المواد /الجامعة التكنولوجية د. صاحب الصفار 2009-2010

## المصادر العربية

1. د. احمد علي سالم الصباغ-الميتالورجيا الفيزيائية-القاهرة 1968.
2. د. حسين باقر رحمة الله-مبادئ هندسة المعادن والمواد-جامعة البصرة-1985.
3. د. جعفر طاهر الحيدري والسيد عدنان نعمة-المعادن بنيتها وخواصها ومعاملاتها الحرارية-الجامعة التكنولوجية-1989.
4. د. جعفر طاهر الحيدري-المواد الهندسية ، مدخل لخواصها وتطبيقاتها-الجامعة التكنولوجية-1990.
5. د. شاكر السامرائي و د. قحطان الخزرجي-اسس هندسة المعادن-جامعة بغداد-1984.
6. د. صالح امين كركجي و د. وليد محمد صالح و د. طالب حسين الشريفي-خواص المواد الهندسية-جامعة الموصل-1979.
7. د. عبد الرزاق اسماعيل خضر-فيزياء المعادن-الجامعة التكنولوجية-1983.
8. د. عارف ابو صفية-الميتالورجيا الفيزيائية الهندسية-الجامعة التكنولوجية-1982.
9. د. عبد المجيد عامر و د. محمد الفيصل الرفاعي-الفلزات تحت المجهر-دار شبر نجر فيرلاج للنشر-برلين-1979.
10. يولاختين-علم المعادن والمعاملات الحرارية للمعادن-دار مير للنشر-1983.
11. أ. نوفيكوف, م. زاخاروف , المعاملة الحرارية للمعادن والسبائك , دار مير للنشر 1972
12. د. المهندس محمد صلاح الدين عباس حامد ، د. المهندس ابراهيم موسى ابراهيم تكنولوجيا الإنتاج والتصنيع المجلد الأول ، الطبعة الثالثة دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع 2000

## المصادر الانكليزية

1. D.F.Baddley, J.A. Cannon-progressive Engineering Material-Hodder & stoughton-London-1988.
2. C.A. Chadwick, D.A. Smith-Grain Boundary structure and properties, Academic press London-1976.
3. F. Haessner-Recrystallization of metallic materials, Dr. Riederer Veriag Gmph. Stuttgart-1978.
4. S.K. Hajra choudhury-Materials science and processes, Indian book distributing Co.-1985.
5. R.A. Higgins-Engineerings Metallurgy, The English University press.LTD, fourth edition-1973.
6. R.W.K. Honey Combe-the plastic deformation of Metals, edward Arnold-1985.
7. D. Hull-Introduction of dislocation, pergamon press-1979.
8. R.S. Khurmi & R.S. Sedha- Materials science, S. Chand & Company (Pvt) LTD-1987.
9. L. Kovacs, L. Zsoldos-dislocations and plastic deformation pregamon press-1973.

10. W.C Leslie – the physical Metallurgy of steel – Mc Graw – Hill International book Company-1982.
11. D.A. portor, K.E. Easterling-phase Transformation in Metals and Alloys Van Nostrand Reinhold (Uk) Co. LTD-1982.
12. V. Raghavan- Materials Science and Engineering-Prentice-Hall of India private Limited-1985.
13. W.T. Read. Jr- Dislocation in crystals Mc Graw- Hill book company Inc.- 1953.
14. R.E. Reed-Hill-Physical Metallurgy principles Van Nostrand-1973.
15. E.C. Rollason- Metallurgy for Engineers Edward Arnold fourth edition-1980.
16. S.D. Sehgal, R.A. Lindberg-Materials, their Nature properties&fabrication S. Chand & company (pvt) LTD-1975.
17. R.E. Smallman-Modern Physical Metallurgy Butter Worth London- 4<sup>th</sup> edition-1985.
18. Thornton- -Fundamentals of Engineering Materials.
19. L.H. Van Vlack-Materials science for Engineers Addison-Weseley. Pub.Co. Inc-1973.
20. J. wecrtman-Elementary dislocation theory-The Macmillan Company-NewYork-1975.
21. W.A. Wood- The Study of metal structures and their mechanical property-pregamon Unified Engineering series-1971.
22. E.D Hondrros , M.P. seah, S.hofmann , and P.Lejcek , inphysical Metallurgy , edited by R.W. Cahn and P.haassen , 3<sup>rd</sup> ed.(north-holland , Amsterdam,1996 ) , Vol.1.1.
23. A.P sutton and R.W. Balluffi , Interfaces in Crystallin solids (Oxford University press , New york , 1995)
24. Encyclopedia of Applied physics , edited by G.L. Trigg (VCM publishers , New york ,1992),Vol.3.
25. j.p. Hirth and j.lothe: theory of Dislocations , (McGRAW-HILL Book company , New york , 1982) .
26. A.sutton and R.Balluffi , Interfaces in Crystallina Materials clarendon oxfoed , 1995).
27. M.Furtkamp , G.Gottstein . D.A Molodov, V.N. Semenov and L.s. shvinderman : Acta Mater , Vol.46 (1998) P.4103
28. G.Gottstein and L.S. shvindlerman : Grain boundary migration in metals : thermodynamics , Kinetics , application (CRC press 1999)
29. G: Gottstein , U.Czubayko , D.A. Molodov , L.S Shvindlerman and W. Wunderlich : mater . Sci . forum Vol.204-206 (1996) Pp.99-108
30. MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING AN IN TRODUCTION fith Edition john willey & sons Inc 1999
31. Mikell P.Groover.
32. FUN DAMENTALS of Modern MANU FAC TURING ( Materials processes and Systems ) Johnwiley & sons Ins 1996
33. American Society for Metals (1987), "**Alloy Phase Diagrams**". Vol. 3, 2<sup>nd</sup> edition.
34. American Society for Metals (1987), "**Heat Treatment**". Vol. 4, 2<sup>nd</sup> edition.

## (( السبائك ))

### 1-2 تكوين السبائك :-

تمتاز المعادن النقية بصفات خاصة ثابتة تنفرد بها دون غيرها من العناصر المعدنية وشبه المعدنية، ومن هذه المميزات القابلية على السحب والطرق والتشي والتوصيل الجيد للحرارة والكهربائية وغيرها من المميزات. وعند خلط معدنيين أو أكثر وتسخين الخليط إلى درجة انصهاره ثم إعادة تبريده يمكن الحصول على مادة جديدة لها صفات معدنية تختلف عن تلك التي تكونت منها ويطلق على هذه المواد الجديدة بالسبائك Alloys.

### 2-2 المركبات ( Compounds ) :-

يمكن تقسيم المركبات السبائكية إلى نوعين:

أ. **مركبات معدنية تتبع قانون التكافؤ العادي وتسمى Intermetallic Compounds** وهي بتركيب معين ولها نقطة انصهار محددة وتخضع لقانون التكافؤ المعتاد مثل  $Mg_2Sn$ ,  $Mg_2Si$ .

ب. **مركبات إلكترونية Electronic Compounds** وهي مركبات معدنية لا تخضع إلى قانون التكافؤ وتكون على ثلاثة أنواع اعتماداً على النسبة بين مجموع إلكترونات التكافؤ (في المدار الخارجي) إلى عدد الذرات الكلي في الجزيئات المكونة للمركب ويسمى النوع الأول صنف  $\beta$  وهو بنسبة  $\frac{3}{2}$  ويسمى النوع الثاني بصنف  $\gamma$  وهو بنسبة  $\frac{13}{21}$  ويسمى النوع الثالث صنف  $\epsilon$  وهو بنسبة  $\frac{4}{7}$ ، ومن الأمثلة على ذلك المركب CuZn حيث يكون تكافؤ النحاس 1 وتكافؤ الزنك 2 ومجموع التكافؤ 3 وعدد الذرات 2، فالنسبة إذاً هي  $\frac{2}{3}$  (الصنف  $\beta$ ). أما المركب  $Cu_{31}Sn_8$  حيث يكون تكافؤ النحاس 1 وتكافؤ القصدير 4 أي أن مجموع التكافؤ 63، عدد الذرات  $39=8+31$ ، فالنسبة إذاً هي  $\frac{21}{39} = \frac{63}{13}$  (صنف  $\gamma$ ).

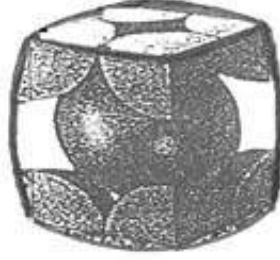
ومن المركبات السبائكية المهمة التي توجد في السبائك المستخدمة صناعياً الكربيدات التي تتميز بصلادة عالية ومقاومة عالية للاحتكاك الميكانيكي ومثال على ذلك  $Cr_3C$ ,  $Mn_3C$ ,  $Fe_3C$  وغيرها.

### 3-2 المحاليل الجامدة ( Solid Solution ) :-

في الحالة المنصهرة تقبل معظم المعادن الذوبان بعضها ببعض طالما كانت أوزانها النوعية متساوية أو متقاربة، أما إذا اختلفت فان ذراتها قد تنفصل فيترسب الثقيل في القاع وتطفو ذرات المعدن ذو الوزن النوعي المنخفض، وقد تبقى هذه الحالة قائمة حتى في حالة الأنجماد دون أي اختلاط أو ذوبان فيما بينها. وإذا حدث ذوبان تام فيما بينها في الحالة الصلبة فان السبيكة ستكون مكونة من طور واحد، وتدعى مثل هذه السبائك بالمحاليل الجامدة مثل الذهب والفضة، النحاس والنيكل، وهي سبائك تامة الذوبان بعضها ببعض وبجميع النسب، وتكون حبيبات السبيكة الناتجة متشابهة بالمظهر مع حبيبات المعادن النقية المكونة لها، كما أن البنية البلورية للسبيكة تمثل البنية البلورية للمعدن المذيب [ يقصد بالمعدن المذيب المعدن الموجود بنسبة أعلى في السبيكة ] بينما تكون ذرات المعدن المذاب [ المعدن الموجود بنسبة أقل ] موزعة في تلك البنية عن طريقين هما:

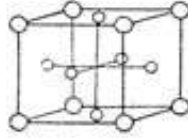
## 1 المحلول الجامد الإحلالي (Substitutional Solid Solution) :-

هو المحلول الذي تحتل ذرات المذاب فيه أماكن ذرات المذيب في نقاط تقاطع الشبكة البلورية، وكما موضح في الشكل ( 1-2 ) فان الشبكة البلورية للمذيب قد تعرضت للتشويه نتيجة لاستيعاب المذيب لعدد من ذرات المذاب، ويصاحب هذا التشويه زيادة في صلادة المعدن المذيب ومقاومته، ويلاحظ كذلك ان الأبعاد الذرية ستزداد اذا كانت أقطار ذرات المذاب اكبر من أقطار ذرات المذيب في حين تنقلص هذه المسافة عندما تكون أقطار ذرات المذاب اصغر من أقطار ذرات المذيب.



الشكل ( 1-2 ) المحلول الجامد الإحلالي

اما الشبكة البلورية المثالية Super Lattice فهي نوع خاص من المحلول الجامد الإحلالي الذي يمثل توزيعاً منتظماً جداً لذرات المذيب والمذاب بخلاف التوزيع العشوائي الاعتيادي، وتحتل ذرات المذاب في المحلول الجامد المثالي مواقع محددة في الشبكة البلورية كما موضح في الشكل ( 2-2 ) الذي يمثل سبيكة النحاس والذهب حيث تكون نسبة ذرات النحاس  $1/3$  وتحتل ذرات النحاس بعد التنظيم نقاط متوسط أوجه الشبكة البلورية. بينما تحتل ذرات الذهب زوايا وحدة الخلايا.



الشكل ( 2-2 ) محلول جامد احلالي مثالي لسبيكة النحاس والذهب،  
الدوائر الصغيرة تمثل ذرات النحاس والدوائر الكبيرة ذرات الذهب

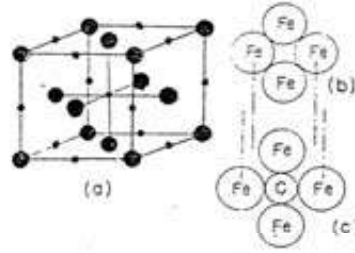
## 2-المحلول الجامد البيني (Interstitial Solid Solution) :-

وهو المحلول الذي تحتل فيه ذرات المذاب مواقع بينية بين ذرات المذيب عندما تكون أنصاف أقطار ذرات المذاب اقل من أنصاف أقطار ذرات المذيب مما يؤدي الى حدوث تشوه بسيط وزيادة في صلادة البنية البلورية.

ويمكن كذلك ان يزداد هذا التشوه كما هو واضح في الشكل ( 2-3 ) الذي يمثل محلول جامد بيني للكربون في الحديد  $\gamma$  (F.C.C) حيث يمكن للحيز الموجود بين ذرات الحديد ان يحتضن ذرة من الكربون ، ويمكن ملاحظة ذلك اذا اعتبرت ذرات الحديد الواقعة في مركز الوجه هي اصل وحدة الخلية بدلاً من الزوايا، ويلاحظ ايضاً ان ذرات الكربون توجد باعداد كبيرة نسبياً مادامت درجة الحرارة مرتفعة بينما تكون القابلية



على استيعاب ذرات الكربون في الحديد محدودة في درجات الحرارة المنخفضة، لذا نرى ان كمية قليلة جداً من ذرات الكربون توجد في حديد  $\alpha$  ( B.C.C ).



الشكل ( 2-3 ) يمثل محلول جامد بيني للكربون في الحديد  $\gamma$  ( F.C.C ) حيث يمكن للحيز الموجود بين ذرات الحديد ان يحتضن ذرة من الكربون محدثاً تشوهاً في الشبكة البلورية كما في c , b

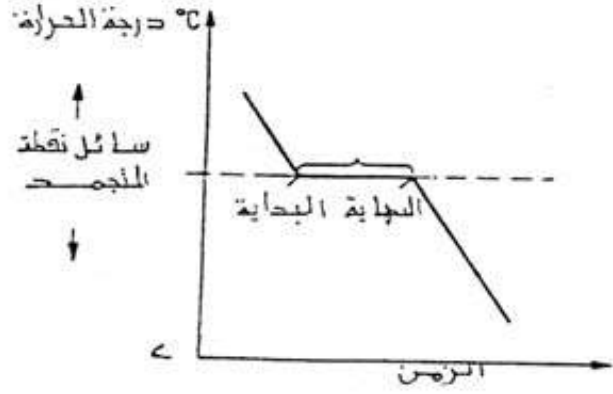
#### 4-2 العوامل المؤثرة في قابلية الذوبان في الحالة الصلبة :-

- تتوقف قابلية الذوبان التام بين المعادن في الحالة الصلبة على عدة عوامل أهمها:
1. تشابه نوع الشبكة الحيزية Space Lattice للبنية البلورية للمذاب والمذيب.
  2. الأقطار الذرية النسبية للمذاب والمذيب.
  3. التشابه الكيميائي بين المذيب والمذاب.
  4. تردد [ عدد الاهتزازات في الثانية ] لذرات المذيب والمذاب.
  5. التكافؤ الكيميائي للمذيب والمذاب.
  6. شحنة ذرات المذيب والمذاب.

#### 5-2 منحنيات التسخين والتبريد :-

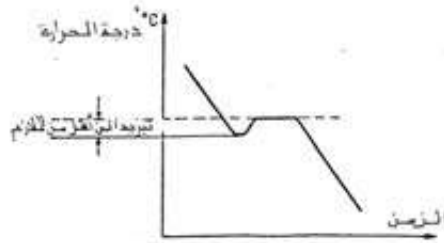
في بداية تسخين المعادن النقية يحصل في أبعادها قليل من التمدد وتبقى المادة على حالها من حيث الصلابة، بينما ترتفع درجة الحرارة بشكل مستمر حتى تصل الى درجة معينة تحصل عندها ظاهرتان جديدتان مرتبطتان مع بعضهما، اذ يبدأ المعدن بالانصهار ويتوقف الارتفاع في درجة الحرارة الى ان يتحول كل المعدن الى سائل. ان المواد المتبلورة كافة ومنها المعادن تتميز بوجود درجات انصهار معينة لكل منها، فالألومنيوم ينصهر في درجة 660 م° والنحاس في درجة 1084 م° والحديد في درجة 1539 م°. وكما معلوم، فان ذرات المعادن في كل بلورة منها تؤلف نسقاً منتظماً وتتذبذب بذبذبات صغيرة جداً بالقرب من أماكنها الوسطى، وكلما زادت درجة تسخين الجسم زادت سرعة ذبذبة الذرات مع زيادة سعة الذبذبات، وهذه الزيادة في سرعة حركة الذرات بزيادة درجة الحرارة تؤلف أحد القوانين الأساسية للطبيعة الذي ينطبق على المادة في حالاتها الثلاث.

وفي حالة تبريد المنصهر نجد ان كل الظواهر التي تم شرحها آنفاً تحدث بصورة معكوسة تماماً كما في الشكل ( 2-4 ). وعندما تنخفض درجة الحرارة الى مستوى كبير تصبح سرعة حركة الذرات بطيئة جداً بحيث تبدأ بعض هذه الذرات وبتأثير قوة الجاذبية بالانضمام بعضها الى بعض مكونة بذلك نويات بلورية، وتنمو هذه النويات على هيئة بلورات متعددة السطوح، لكن هذا النمو الطليق لا يستمر مدة زمنية طويلة لان البلورات الصغيرة تتصادم بعضها مع بعض في اثناء



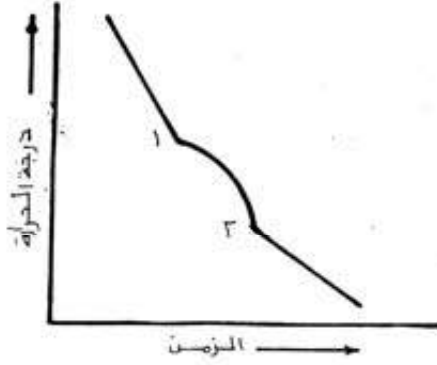
الشكل ( 4-2 ) منحنى تبريد معدن نقي

عملية نموها، ويتوقف النمو في اماكن تصادمها، ويكتسب الجسم بنية حبيبية، ان الذرات لا تستطيع ان تكوّن نويات التبلور في الوقت المناسب، فتتخفف درجة الحرارة الى اقل من درجة حرارة التجمد، عندها يحدث التبلور فجأة بسبب حركة صغيرة، وتستمر عملية التبلور بسرعة لكي تعوض الزمن الضائع، وتفقد الذرات التي ترتب نفسها في بلورات كمية كبيرة من الحرارة لدرجة بحيث ان درجة الحرارة التي انخفضت عند درجة التجمد ترتفع مرة أخرى حتى درجة حرارة التجمد ويستمر ما تبقى من عملية التجمد بشكله الطبيعي شكل ( 2-2 ) .( 5 )



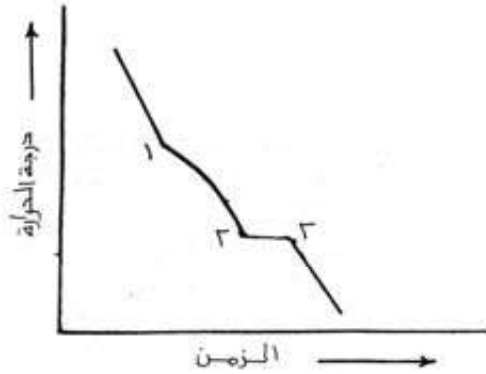
الشكل ( 5-2 ) منحنى تبريد فيه تبريد منخفض الى أقل من درجة حرارة التجميد بقليل، ترتفع درجة الحرارة مرة أخرى حتى درجة حرارة التجميد

اما منحنيات التبريد في السبائك الثنائية فانها تختلف عن منحنيات المعادن النقية، ففي السبائك التي عناصرها تامة الذوبان في الحالة السائلة والصلبة والتي تكون محاليل جامدة، فان نطاق درجة الحرارة التي يحدث فيها الانجماد يكون بين النقطتين (1،2) كما في الشكل ( 2-7 ) .( 7-2 )



الشكل (7-2) منحنى تبريد في السبائك الثنائية تكون محلول جامد

حيث تؤشر النقطة ( 1 ) بداية الأنجماد والنقطة ( 2 ) نهايته. وفي درجات الحرارة بين (1،2) تكون السبيكة سائلة جزئياً وجامدة جزئياً، وتعتمد كمية كل من السائل والجامد على درجة الحرارة، أما السبائك التي عناصرها تامة الذوبان في الحالة السائلة وعديمة الذوبان في الحالة الصلبة فيكون المنحنى كما في الشكل ( 2-8 ) ،



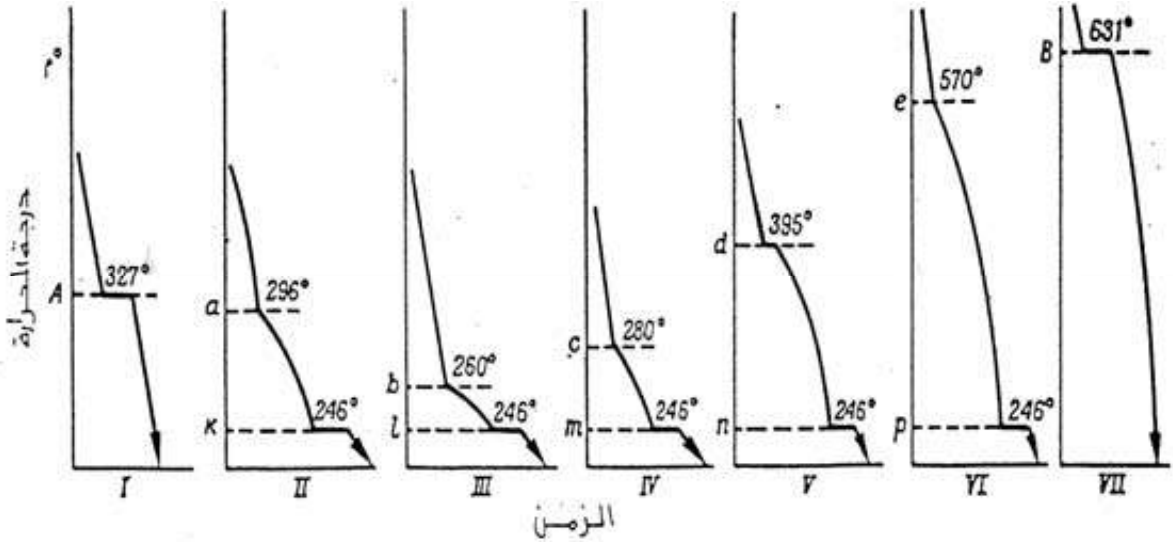
الشكل (8-2) منحنى تبريد في السبائك الثنائية تكون اليوتكتك

حيث يلاحظ في هذا المنحنى ان الجزء المحصور مابين النقطتين (1،2) يماثل منحنى التبريد للسبيكة الثنائية التي تكون محلولاً جامداً، والجزء المحصور بين (2،3) يماثل منحنى التبريد للمعادن النقية. في جميع السبائك من هذا النوع هناك سبيكة ذات تركيب محدد من المعدنين تبقى سائلة بشكل تام وفي درجة حرارة اقل من جميع التراكيب الاخرى لهذه السبيكة وتسمى بسبيكة اليوتكتك.

## 9-2 مخططات التوازن الاطوار ( Phase equilibrium diagrams ) :-

نظراً لاعتماد خواص كثير من السبائك على خواص الأطوار وعلى الطريقة التي تكون بها بنية تجميعية يقتضي وجود طريقة ما لتعيين العلاقات المتداخلة بين الأطوار المختلفة، كما يجب أيضاً التعرف على الأطوار الموجودة في حالة اتزان في درجات الحرارة المختلفة والتعرف كذلك على تركيب كل طور بصورة منفصلة، وهذا كله يمكن توضيحه عن

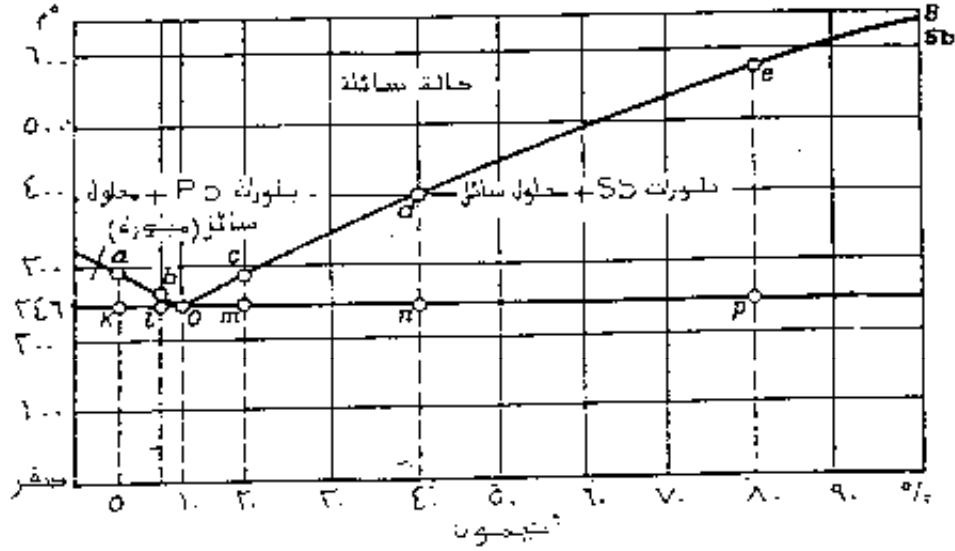
طريق رسوم تسمى مخططات التوازن للأطوار، وتعرف هذه المخططات بانها رسوم توضح العلاقة بين التركيب ودرجة حرارة السبائك في حالة الاتزان. ولغرض إنشاء مخطط الاتزان نأخذ على سبيل المثال سبيكة من الرصاص والأنتيمون ( pb-Sb ) ذات تراكيب مختلفة. وكما هو موضح في الشكل (2-11).



Pb % ١٠٠ و Sb % ٠	I - المكون النقي
Pb % ٩٥ و Sb % ٥	II - السبيكة المحتوية على
Pb % ٩٠ و Sb % ١٠	III - السبيكة المحتوية على
Pb % ٨٠ و Sb % ٢٠	IV - السبيكة المحتوية على
Pb % ٦٠ و Sb % ٤٠	V - السبيكة المحتوية على
Pb % ٢٠ و Sb % ٨٠	VI - السبيكة المحتوية على
Pb % ٠ و Sb % ١٠٠	VII - السبيكة المحتوية على

الشكل (2-11) منحنيات تبريد سبائك الرصاص والأنتيمون

وتبين هذه المنحنيات ان للسبائك نقطتين حرجتان بعكس المعادن النقية، وهاتان النقطتان هما درجة حرارة بدء التجمد ودرجة حرارة انتهاء التجمد، ولإنشاء الرسم البياني المطلوب، يرسم على المحور الافقي تركيب (تركيز) السبائك (5، 10، 20، 40، 80) % (أنتيمون) وتؤخذ على المحور الرأسي درجات الحرارة، وقد يرمز للنقاط الحرجة العليا بالحروف A-a-b-c-d-e-B، وللنقاط الحرجة السفلى بالحروف K-l-m-n-P وهذه النقاط تقابل درجة حرارة واحدة هي 246°م، ولهذا السبب توصل هذه النقاط بمستقيم يمتد حتى يقابل الأحداثيين الرأسيين للمعدنيين النقيين شكل (2-12).

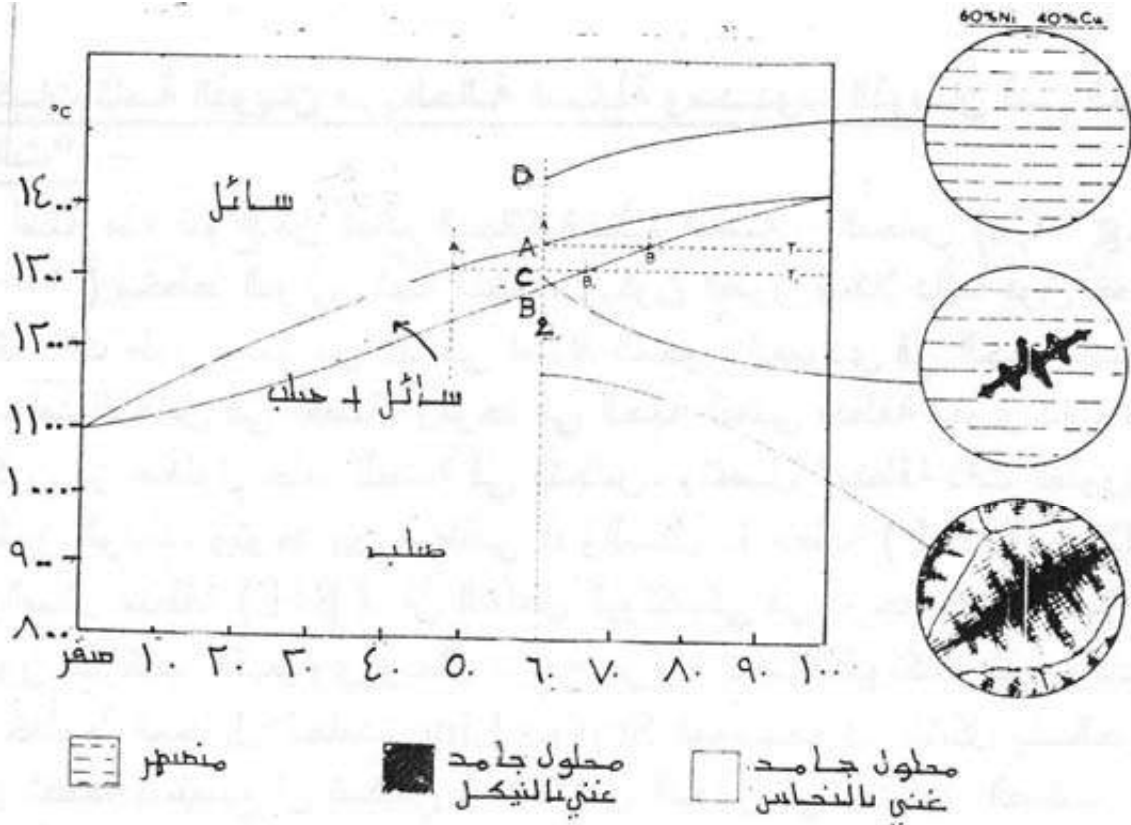


المشكل ( 2 - 13 ) إنشاء بياني حالة النظام بواسطة النقط الحرجة المحددة من منحنيات تبريد سبائك الرصاص والنيكل كيميون .

وبتوصيل النقاط الحرجة العليا التي تدل على بدء تجمد السبائك بمنحنيين  $A a b, B e d c$  فانهما يتقاطعان في النقطة ( 0 ) الواقعة على الخط الأفقي  $K l m n p$  وبذلك نحصل على منحنى توازن الأطوار للمجموعة  $pb-Sb$  .  
ومن الرسم البياني نرى ان التجمد يبدأ في جميع السبائك عند درجة حرارة تقع على الخط  $A a b c d e B$  يسمى خط السيولة ( Liquidus ) . اما انتهاء التجمد لجميع سبائك هذه المجموعة فانه يحدث عند درجة حرارة واحدة تقع على المستقيم  $k l m n p$  الذي يسمى خط التجمد ( Solidus ) وتكون السبائك فوق خط السيولة في حالة سائلة بينما تكون في حالة صلبة تحت خط التجمد، اما بين الخطين فإنها تكون مزدوجة الحالة (متجمدة وسائلة) وتختلف منحنيات توازن الأطوار لأي مجموعة ثنائية حسب نوع المكونات، فهي كما ذكرنا تعتمد على نوع السبائك الناتجة ان كانت خليطاً ميكانيكياً او محلولاً جامداً او مركباً كيميائياً. ويمكن تصنيف مخططات توازن الأطوار وفقاً لطبيعة المكونات في كل من الحالة السائلة والصلبة، وتعد مخططات التوازن، التي تكون فيها المكونات تامة الذوبان في الحالة السائلة من اكثر الأنواع شيوعاً في السبائك.

## 2-9-1 مركبات تامة الذوبان في الحالة السائلة والجامدة ... " النوع الاول " :-

أن أحد أبسط أنواع مخططات التوازن الحراري للسبائك نظام السبائك تامة الذوبان في الحالتين الجامدة والسائلة. وافضل مثال لهذا النوع سبيكة النحاس-النيكل شكل (2-13) . ويلاحظ ان كافة التراكيب الكيميائية تكون في حالة سائلة في المنطقة الواقعة فوق خط السيولة، وفي الحالة الصلبة في المنطقة الواقعة تحت خط الأنجماد. اما في المنطقة الواقعة بين خطي السيولة والأنجماد فان النظام يتكون من الطورين السائل والجامد أي من بلورات من المحلول الجامد مع المحلول السائل. ولشرح مخطط التوازن لهذا النوع من السبائك، نأخذ التركيب الحاوي على 60% نيكل، فعند النقطة  $D$  التي تمثل نقطة التقاطع الحاصلة بين المحور الأفقي ( التركيب الكيميائي 60% نيكل ) والمحور العمودي



الشكل (2-13) مخطط الاتزان الحراري لسبيكة النحاس-النكل

(درجة الحرارة 1400 م°)، يكون النظام في حالة سائلة ولا يحدث أي تغيير عند التبريد حتى تصل درجة حرارة النظام إلى 1350 م°. حيث نصل النقطة A وهي على خط السيولة، وهذا يعني دخولنا منطقة ذات طورين حيث يتوقع أن يبدأ تكون بعض من المادة الجامدة الأولية وبتركيب كيميائي B الحاوي على (25% نحاس - 75% نكل)، ويمكن الحصول على بقية الأرقام وذلك بمد خط درجة الحرارة من النقطة A إلى النقطة B على خط التجمد. وعندما يتجمد جزء من الصلب الحاوي على 25% نحاس من منصهر يحتوي على 40% نحاس يتضح أن محتوى النحاس في المحلول السائل المتبقي يكون أعلى من السائل الأصلي، ويدل انحدار خط السيولة على أن درجة الحرارة التي يتجمد فيها السائل المتبقي يجب أن تقع تحت درجة حرارة 1350 م° وعليه يجب أن تهبط درجة الحرارة إذا أريد للانجماد أن يستمر. وعند بلوغ درجة الحرارة إلى 1300 م° سنصل إلى النقطة C التي تقع ضمن منطقة ذات طورين لهما تراكيب كيميائية تمثل بالنقاط  $B_1, A_1$  حيث يمثل الخط  $A_1C$  كمية المحلول الجامد بتركيب النقطة  $B_1$  [68% نكل]، والخط  $CB_1$  كمية المحلول السائل بتركيب النقطة  $A_1$  [50% نكل].

وعند النقطة  $B_2$  في درجة الحرارة 1280 م° تتجمد آخر قطرات من المحلول السائل المتبقي الذي يحتوي على 40% نكل (تركيب النقطة  $A_2$ )، بينما يحتوي المحلول الجامد على 60% نكل والذي يمثل نفس التركيب الكيميائي الأساسي للسائل (للمنصهر)، ولا يحدث أي تغيير لاحق تحت هذه الدرجة.

ومما تقدم، فإنه بالإمكان استنباط أربعة قوانين بسيطة تساعد على إيجاد كل من كمية المحلول الجامد، والسائل وتركيب المحلول الجامد والسائل التي توجد في حالة اتزان عند أي درجة حرارة معطاة وكما يأتي:

1. يمكن تحديد كمية المحلول الجامد من الخط الواصل بين الخط الذي يمثل تركيب السبيكة والنقطة المقابلة له على خط السيولة.
2. يمكن تحديد كمية المحلول السائل من الخط الواصل بين الخط الذي يمثل تركيب السبيكة والنقطة المقابلة له على خط التجمد.
3. يمكن تمثيل تركيب المحلول الجامد بالنقطة الواقعة على خط التجمد.
4. يمكن تمثيل تركيب المحلول السائل بالنقطة الواقعة على خط السيولة.

### 2-9-1-1 قاعدة العتلة (Lever Principle) :-

تستخدم القوانين الأنفة الذكر لمعرفة نسب الأطوار المختلفة التي يمكن ان توجد معاً في حالة توازن عند درجة حرارة معينة. ففي الشكل ( 2-13 ) يمكن إيجاد نسب الطورين الموجودين في السبيكة الحاوية على 40% نحاس و 60% نيكل في درجة 1350 °م وذلك بتعيين اطوال لقطعتين لخط الوصل  $A_1C$  الذي يمثل كمية المحلول الصلب و  $CB_1$  الذي يمثل

$$\frac{A_1C}{A_1B_1} = (A_1B_1) \text{ كمية السبيكة}$$

$$\%55.6 = \%100 \times \frac{50-60}{50-68}$$

$$\frac{CB_1}{A_1B_1} = \text{نسبة المحلول السائل الى كمية السبيكة}$$

$$\%44.4 = \%100 \times \frac{60-68}{50-68}$$

ويظهر من قياسات الاطوال الحقيقية لهذين الخطين المستقيمين ان 55.6 % من النظام محلول جامد بينما 44.4 % منه محلول سائل، ولما كانت النسب المئوية تمثل أبعاداً متساوية فإنه يمكن حساب الأطوال باصطلاح النسب المئوية ولا حاجة لقياس الأطوال الحقيقية. وتأتي تسمية ( قاعدة الذراع ) من اعتبار خط الوصل ذراعاً نقطة ارتكازه واقعة في نقطة التركيب الكلي ( 60% نيكل )، وتحمل ذراعيه أوزاناً تتناسب عكسياً مع أطوالها. وأساس هذه الطريقة الافتراض ان الكمية الأجمالية لسبيكة معينة معروفة، وعليه فإنه بالإمكان احتساب كمية كل طور يوجد في حالة توازن في درجة حرارة معينة، ويتم ذلك بالعلاقة بين تركيبها الكيمياوي مع التراكييب الكيمياوية للسبيكة ككل، لان الوزن الأجمالي لأي من المعدنين الموجودين في السبيكة يجب ان يقسم بين الطورين ويمكن شرح ذلك بالمعادلة الآتية:

$$\text{وزن المعدن الأول في السبيكة} \times [\text{التركيب الكيمياوي للسبيكة ( نسبة المعدن الأول فيها )}] = \text{وزن المعدن الأول في السبيكة} \times [\text{التركيب الكيمياوي للطور السائل}] + \text{وزن المعدن الأول في السبيكة} \times [\text{التركيب الكيمياوي للطور الجامد}]$$

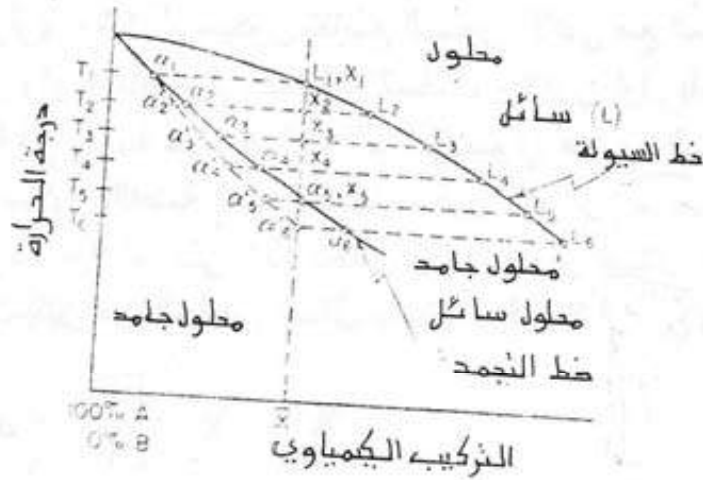
$$W * C \% = W_l + C_l + W_s * C_s \%$$

وبما ان وزن السبيكة  $W$  عبارة عن مجموع وزني الطورين السائل والجامد  
 (  $W_L + W_S$  ) فان العلاقة السابقة ستكون:

$$\frac{W_S}{W} = \frac{C - C_L}{C_L - C_S}$$

### 2-1-9-2 تأثير معدل التبريد (Effect of cooling rate) :-

لا يمكن المحافظة على حالة التوازن بين الطورين الجامد والسائل في أثناء إنجماد  
 السبيكة في الظروف الاعتيادية، ويعزى ذلك الى قلة الزمن الكافي للانتشار في الطور الجامد  
 الأمر الذي يؤدي الى تكوين الانعزال الشجري، ففي الشكل ( 2-14 )



الشكل ( 2-14 ) جزء من مخطط الأطوار لنوع ضيق منشأ العزل المجهري  
 أثناء التبريد الد متوازن للمعدن المنعطر .

يظهر قسم من النظام المتماثل، وعندما يبرد سائل يمثل تركيبه الكلي بنقطة  $\bar{X}$  الى  
 درجة حرارة  $T_1$ ، يبدأ الانجماد بتكوين بلورات  $\alpha_1$  بتغيير تركيب السائل الى  $L_2$  وعند هبوط  
 درجة الحرارة الى  $T_2$  تتكون بلورات  $\alpha_2$ . وعلى اي حال فان  $\alpha_1$  لا تتوفر له الفرصة لتعديل  
 التركيب الى  $\alpha_2$  بسبب عدم توفر الزمن الكافي للانتشار وحصول التوازن، لذلك يكون معدل  
 تركيب الطور الجامد ما بين  $\alpha_1$  ،  $\alpha_2$  ولنقول  $\alpha'_2$  ، وهذا يعني انه عندما يحدث الانجماد  
 السريع ستتكون بلورات فيها محلول جامد قليل بالمقارنة مع البلورات المتكونة في أثناء  
 الانجماد البطيء. يتبع معدل التركيب للطور الصلب الخط المنقط في أثناء تقدم الانجماد  
 ويكون دائماً الى يسار منحنى توازن الجامد في المخطط المبين. ويتوقع في درجة  
 حرارة  $T_5$  ان يكون النظام كامل التجمد في ظروف الانجماد المتوازن، وفي الواقع يمكن  
 ملاحظة بعض قطرات من السائل لازالت موجودة، وحتى بلوغ درجة الحرارة  $T_6$  فان  
 تركيب طور الجامد ليس التركيب الاول للسائل، ويكون الانجماد قد انتهى في درجة الحرارة  
 هذه. وتنتج عملية الانجماد بما يعرف بالعزل المجهري.



### 2-9-1-3 العزل المجهرى (Coring) :-

يتضح من التبريد السريع لسبيكة النحاس - النيكل في الشكل ( 2-13 )، ان البلورات الأولية التي تكونت في درجة 1350 °م كانت غنية بالنيكل ( Ni%75 - Cu%25 ) بينما كان المنصهر فقيراً بالنيكل وغنياً بالنحاس شكل ( 2-15 ).



الشكل ( 2-15 ) العزل المجهرى المنغير من C الذي تركيبة Ni 7.70 - Cu 7.20 إلى Cs الذي تركيبة Ni 7.60 - Cu 7.60 .

وبهبوط درجة الحرارة الى 1300 °م تزداد أعداد البلورات المتجمدة على حساب المنصهر كما يتغير تركيب البلورات المتجمدة من Ni %75 الى Ni %68، وتحيط البلورات الجديدة بالبلورات القديمة علاوةً على تكون بلورات منفردة جديدة في التركيب الجديد، وبهبوط درجة الحرارة الى 1280 °م يصبح تركيب البلورات ( Ni %60 - Cu %40 ) التركيب الأساسي للسبيكة، وفي كل الحالات السابقة تحيط البلورات الجديدة بالبلورات الأقدم منها، وهذا يعني ان مركز الحبيبة يكون غنياً بالنيكل في حين يكون طرف الحبيبة فقيراً بالنيكل غنياً بالنحاس الامر الذي يؤدي الى عدم تجانس مكونات السبيكة وهذا ما يسمى " العزل المجهرى"، فلو تمت عملية التبريد بشكل بطيء ومتوازن فان الوقت سيصبح كافياً ليتم الانتشار بين ذرات البلورات الأولية وذرات البلورات المحيطة بها ليتجانس تركيبها في جميع المناطق. ويمكن التقليل من تأثير العزل المجهرى بتسخين السبائك بعد تجمدها لفترات طويلة عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً بحيث تكون كافية لحدوث عمليات الانتشار، وتدعى هذه العملية التلدين الانتشاري Diffusion annealing حيث تختفي البنية غير المتجانسة للمسبوكات المعدنية وتظهر بدلاً منها بنية مكونة من بلورات متجانسة من المحلول الجامد وبذلك تتحسن الخواص العامة للمسبوكة.

### 2-9-2 مركبات تامة الذوبان في الحالة السائلة وعديمة الذوبان في الحالة الجامدة " النوع الثاني" :-

يمكن تمثيل هذا النوع من السبائك بالنظام السبائك للبرموث - كادميوم Bi - Cd شكل ( 2-16 ). ويمكن تطبيق قانون راؤول الذي ينص على ان إضافة إي عنصر نقي الى عنصر نقي آخر ستؤدي الى انخفاض درجة تجمد الاول، ويستمر هذا الانخفاض كلما أضيفت مقادير أخرى من العنصر الثاني، ويتناسب مقدار الانخفاض في درجة التجمد هذه مع الأوزان الجزيئية للعنصرين. ويلاحظ في الشكل ( 2-16 ) انحدار خط السيولة من كلا الطرفين مما يدل على انخفاض درجة بدء التجمد لكلا العنصرين،

وباستمرار إضافة العنصر سيلتقي الخطان عند تركيب معين هو الحد الأدنى لمدى الانخفاض في درجة التجمد حتى يتجمد العنصران في وقت واحد وفي درجة حرارة واحدة وثبات حراري، وتسمى هذه النقطة التي تتم عندها مثل هذه التحولات بنقطة " اليوتكتك " وسنأتي على شرحها لاحقاً. اذا تتبعنا السبيكة الحاوية على 80% كادميوم سنلاحظ ما يأتي:

1. بالتبريد الى درجة حرارة 260 °م، ومد الخط الأفقي الذي يلتقي مع المحور الرأسي من اليمين ( خط التجمد ) ستفصل بلورات من معدن الكادميوم النقي ( تركيز 100% ) مما يجعل المعدن المنصهر الباقي فقيراً بالكادميوم غنياً بالبيزموث، وبالتالي يتغير تركيز المنصهر قليلاً الى ناحية اليسار في مجال المحلول السائل.

2. وبالتبريد الى درجة 240 °م ومد الخط الأفقي ( ه ن ) ستفصل بلورات اخرى من معدن الكادميوم النقي ( قيمة النقطة ه ) وسيصبح تركيز المحلول السائل النقطة ن.

3. يمكن تعيين الكميات النسبية لكل من المحلول الجامد الى المحلول السائل عند درجة حرارة 260 °م وفقاً لقاعدة الذراع.

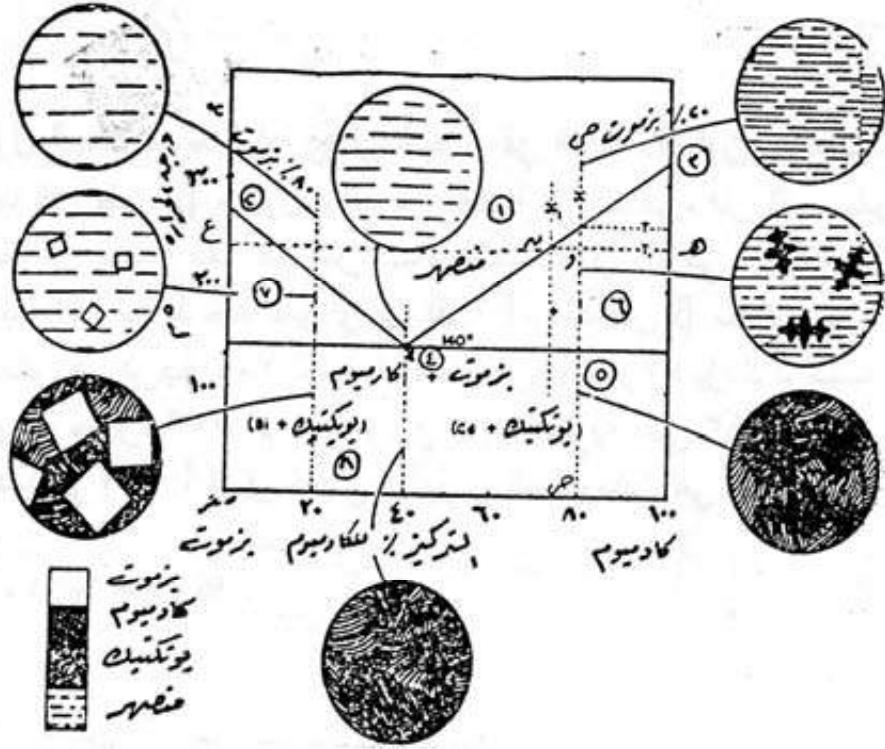
$$\frac{75-80}{80-100} = \frac{\text{ون (ه)}}{\text{هو (ن)}} = \frac{\text{كمية المحلول الجامد (وتركيبه)}}{\text{كمية المحلول السائل (وتركيبه)}}$$

وعند درجة الحرارة 140 °م تصبح:

$$\%100 \times \frac{40-80}{40-100} = \text{Cd النسبة المئوية للكادميوم}$$

$$\%100 \times \frac{80-100}{40-100} = \text{النسبة المئوية للبيوتكتيك}$$

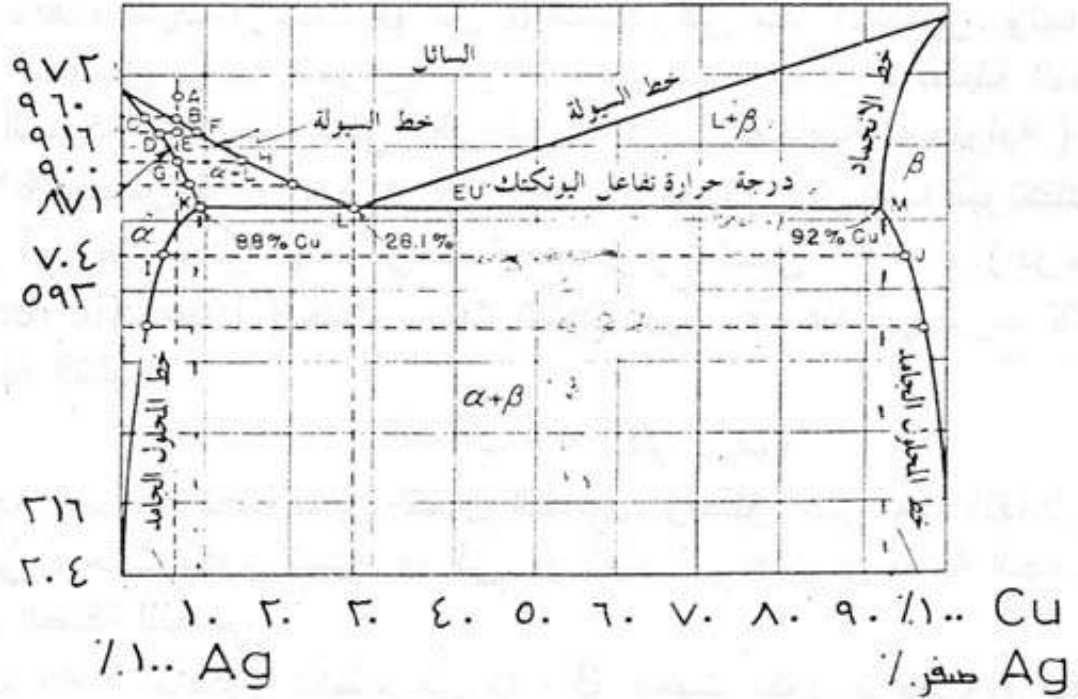
اما السبيكة الخاصة 40% كادميوم ( سبيكة اليوتكتك ) فعند تطبيق قاعدة الذراع مرة أخرى عند درجة الحرارة 140 °م. فنمد الخط الأفقي حتى يلتقي مع المحورين الرأسيين الى اليمين والى اليسار، أي ستترسب عند هذه النقطة بلورات من المعدن Bi النقية، وفي نفس الوقت بلورات من المعدن Cd النقية. عند تطبيق قاعدة الذراع عند درجة حرارة اليوتكتيك نجد ان هناك ثلاثة أطوار في حالة اتزان هذه الأطوار هي ( محلول سائل، جامد من الكادميوم النقي، جامد من البيزموث النقي ) وفي هذه المجموعة المكونة من مركبتين، فاننا نجد عند هذه النقطة ان عدد درجات الحرية يساوي صفراً ( F=2-3+1=0 ) وتصبح المجموعة عندها عديمة التغيير، وبطبيعة الحال فان هذا الشرط لا يوجد الا عند درجة حرارة معينة وتركيب معين.



الشكل ( 2 - 16 ) مخطط الاتزان الحراري لسبائك الكارميوم والهزموت (النوع الثاني)

### 3-9-2 مركبات تامة الذوبان في الحالة السائلة ومحدودة الذوبان في الحالة الصلبة " النوع الثالث " :-

من أمثلة هذه النوع من النظم السبائكية نظام الفضة - النحاس (Ag - Cu) ، ويمثل الشكل ( 2-17 ) مخطط التوازن لهذا النظام. ويكون الطور سائلاً دائماً فوق خطوط السيولة، وتوجد منطقة ذات طور واحد من  $\alpha$  على امتداد المحور العمودي في الجهة اليسرى يتكون من محلول جامد للنحاس في الفضة، وتوجد في الجهة اليمنى منطقة اخرى ذات طور واحد من  $\beta$  تتكون من محلول جامد للفضة في النحاس، وتفصل المنطقة ذات الطورين ( $\alpha + \beta$ ) ، منطقتا الطور الواحد، وتوجد بين منطقتي  $\alpha$  والسائل L منطقة ( $\alpha + L$ ) ، وكذلك توجد بين طور  $\beta$  والسائل منطقة ( $\beta + L$ ). ان التفاعل اليوتكتيكي في درجة حرارة ثابتة هو خط موازي لمحور التركيب الكيماوي ويمثل درجة حرارة انجماد اليوتكتك الذي يعادل 779 °م. اما خطوط المحاليل الجامدة Solvus Line الموضحة في الشكل بالحروف ( KI ) تدل على ان الفضة تستطيع ان تستبقي 8.8% من النحاس في المحلول الصلب في درجة حرارة 704 °م، بينما تستطيع ايضاً وفي درجة حرارة 316 °م ان تستبقي 1% نحاس في المحلول الجامد. ويمثل منحنى المحلول الجامد الآخر ( MJ ) قابلية ذوبان الفضة في النحاس التي تتغير من 8% في درجة 779 °م الى اقل من 1% في درجة حرارة 316 °م. ولغرض دراسة هذا النوع من النظام نأخذ سبيكة تحتوي على 7% نحاس و 93% فضة، فعند درجة الحرارة 960 °م سيكون تقاطع المحور الافقي مع المحور العمودي في نقطة A مما يؤدي الى وقوع النظام في المنطقة السائلة، وتتكون اول بلورات من المحلول



الشكل (٢-١٧) مخطط التوازن الحراري لسبائك النحاس - فضة  
(النوع الثالث)

الجامد  $\alpha$  في النقطة B في درجة حرارة 916 م° ، ويحتوي هذا المحلول على 2.5% نحاس و 97.5% فضة، أي ستكون الفضة المذيب بينما سيكون النحاس المذاب. ويحتوي المحلول الجامد في درجة حرارة 900 م° على 5% نحاس بينما يحتوي السائل على 90% نحاس. ويمكن إيجاد نسبتي الكميّتين من الجامد والسائل باستخدام قاعدة الذراع وكما يأتي:

$$\%100 \times \frac{EF}{DF} = \text{كمية المحلول الجامد } \alpha$$

$$\%50 = \%100 \times \frac{5-7}{5-9} =$$

$$\%100 \times \frac{DE}{DF} = \text{كمية المحلول السائل}$$

$$\%50 = \%100 \times \frac{7-9}{5-9} =$$

ويصبح السائل والجامد اغنى بالنحاس عند هبوط درجة الحرارة، واخيراً وفي درجة حرارة 852 م° (النقطة G) تتجمد آخر قطرات السائل المتبقي والحاوي على 14% نحاس ليكون المحلول الجامد  $\alpha$  الحاوي على 7% نحاس وهذا هو التركيب الكيميائي الاساسي للمنصهر، وتحت هذه الدرجة وحتى درجة حرارة 746 م° لا يحدث تقاطع بين خطوط درجة الحرارة وخط التركيب في منطقة المحلول الجامد، لذلك لا يحدث تغير في بنية السبيكة حتى

تصل درجة الحرارة الى 746 م° حيث يدخل منطقة ثنائية الطور ليظهر طور  $\beta'$  ، ويوضح خط المحلول الجامد هبوط قابلية ذوبان النحاس في الفضة، لتتكون جسيمات  $\beta'$  من النحاس الزائد. ولما كان طور  $\beta'$  محلولاً جامداً من الفضة في النحاس، فإن النحاس الزائد يأخذ في الواقع قسماً من الفضة معه عند الترسيب. ويتحدد طور  $\beta'$  في درجة حرارة 704 م° بتكوين خط الربط II واسقاط خط عمودي من نقطة J، لذلك فإن  $\beta'$  ستتكون من 5% فضة مذابة في 95% نحاس في درجة حرارة 704 م°، وانخفاض درجة الحرارة يزداد ترسيب  $\beta'$  من  $\alpha$  ، وسنحصل في درجة حرارة 593 م° على توازن بين  $\alpha$  حاوية على 3% نحاس و  $\beta'$  حاوية على 2% فضة جدول ( 2-1-أ ). ان كميتي الطورين الموجودتين هي :

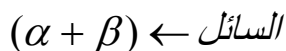
$$\%96 = \%100 \times \frac{7-98}{3-98} = \alpha$$

$$\%4 = \%100 \times \frac{3-7}{3-98} = \beta$$

وفي اثناء التبريد الحقيقي غير المتوازن لهذه السبيكة سيحدث فيها تغير ضئيل في البنية تحت درجة الحرارة هذه بسبب ترسيب  $\beta'$  من  $\alpha$  استناداً الى مبدأ الانتشار، ولما كان الانتشار يجري ببطء عند انخفاض درجة الحرارة فإن الترسيب سيتم بصورة بطيئة الامر الذي يؤدي الى تغيير خواص السبيكة وهذا ما سنأتي على شرحه في ( المعاملة المحلولية ).  
**جدول (2-1-أ) لسبيكة تحتوي على 7% نحاس - 93% فضة**

التركيب المجهري	الوزن الكلي لكل طور	تركيب الاطوار	الاطوار المتواجدة	درجة الحرارة م°
منصهر متجانس	100% سائل	7% نحاس	سائل	954
سائل + محلول جامد $\alpha$	100% سائل	7% نحاس	سائل	916
	قليل من $\alpha$	2.5% نحاس	جامد	
سائل + محلول جامد $\alpha$	50% سائل	9% نحاس	سائل	900
	50% $\alpha$	5% نحاس	جامد $\alpha$	
سائل + كمية كبيرة من المحلول الجامد $\alpha$ على الحدود الحبيبية	قليل من السائل	14% نحاس	سائل	852
	100% $\alpha$	7% نحاس	جامد $\alpha$	
كمية كبيرة من المحلول الجامد $\alpha$ مع ترسيب رقيق من المحلول الجامد $\beta$	98% $\alpha$	5% نحاس	جامد $\alpha$	704
	2% $\beta$	95% نحاس	جامد $\beta$	
كمية كبيرة من المحلول الجامد $\alpha$ مع ترسيب رقيق من المحلول الجامد $\beta$	96% $\alpha$	3% نحاس	جامد $\alpha$	593
	4% $\beta$	98% نحاس	جامد $\beta$	

اما السبيكة الحاوية على 28.1% نحاس في درجة حرارة 900 م° فسيكون تركيب اليوتكتك سائلاً عند هذه الدرجة وبدون أي تغير حتى تهبط درجة الحرارة الى 779 م° ( درجة التفاعل اليوتكتيكي Eutectic reaction ) حيث يحدث تفاعل فيزيائي عند أي تبريد لاحق، ويمثل هذا التفاعل بالمعادلة الآتية:



وتبقى درجة الحرارة ثابتة لحين اكمال التفاعل، ويطلق على هذا التفاعل كما ذكرنا ( التفاعل اليوتكتيكي ) حيث تكون نسبة  $\alpha$  الى  $\beta$  ثابتة في حين ان نسبة الجامد الى السائل تعتمد على محتوى الطاقة للنظام.

وفي درجة الحرارة 779 م° يكون النظام من  $\alpha$  ،  $\beta$  بحيث يكون تركيب  $\alpha$  النقطة K وهو 8.8% نحاس في حين يكون تركيب  $\beta$  النقطة M وهو 92% نحاس (8% فضة) وعليه تكون الكميات النسبية من  $\alpha$  ،  $\beta$  كما في الجدول ( 2-1 ب ).

**جدول (2-1-ب) لسبيكة تحتوي على 28.1% نحاس - 71.9% فضة**

التركيب المجهرية	الوزن الكلي لكل طور	تركيب الاطوار	الاطوار المتواجدة	درجة الحرارة م°
منصهر متجانس	100% سائل	28.1% نحاس	سائل	871
منصهر متجانس	100% سائل	28.1% نحاس	سائل	779
يتواجد $\beta$ كطبقات متتالية في اليوتكتك	$\alpha$ 77%	8.8% نحاس	جامد $\alpha$	اقل من 779
	$\beta$ 23%	92% نحاس	جامد $\beta$	

$$77\% = 100\% \times \frac{28.1-92}{8.8-92} = \alpha$$

$$23\% = 100\% \times \frac{8.8-28.1}{8.8-92} = \beta$$

وفي درجات حرارة اقل من 779 م° تترسب  $\alpha$  من محلول الجامد  $\beta$  لمزيج اليوتكتك وتترسب  $\beta$  من المحلول الجامد  $\alpha$  بحيث يصبح تركيب  $\alpha$  حاوياً على 1% نحاس في حين يكون  $\beta$  حاوياً على اقل من 1% فضة في درجة حرارة 316 م° ، بينما يصبح كل من  $\alpha$  و  $\beta$  معادن نقية عند درجة حرارة المختبر.

اما السبيكة الحاوية على 20% نحاس الذي هو سائل في درجة حرارة 871 م° فيتكون اولاً عند التبريد الى درجة حرارة 815 م° محلول جامد  $\alpha$  يحتوي على حوالي 7.5% نحاس، وفي درجة حرارة 801 م° يحتوي الجامد المتوازن على 8% نحاس والسائل على 23% نحاس. ونحصل في درجة حرارة اعلى بقليل من درجة حرارة اليوتكتك على سائل يحتوي على 28.1% نحاس ( بمعنى تركيب اليوتكتك ) في توازن مع المحلول الجامد  $\alpha$  الذي يحتوي على 8.8% نحاس ومقدار هذين الطورين هو:

$$\%58 = \%100 \times \frac{11.2}{19.3} = \text{السائل}$$

$$\%42 = \%100 \times \frac{8.8}{19.3} = \alpha$$

ويستمر انجماد سائل اليوتكتك في درجة حرارة اليوتكتك وكما ذكرنا سابقاً. وتتألف تحت درجة حرارة اليوتكتك البنية المجهرية من بلورات المحلول الجامد  $\alpha$  ، المعروفة بالبلورات الأولية التي تكونت قبل انجماد سائل اليوتكتك ، محاطة بخليط يوتكتك من محلولين جامدين  $(\alpha + \beta)$  .

ان النسبة المئوية لخليط اليوتكتك الجامد تحت درجة الحرارة  $779^\circ \text{م}$  هي نفسها للسائل الذي كان في درجة حرارة اعلى بقليل من  $779^\circ \text{م}$  والمساوية الى  $\%58$ . وعند هبوط درجة الحرارة تحت درجة حرارة اليوتكتك يترسب طور  $\beta$  من طور  $\alpha$  ويترسب طور  $\alpha$  من طور  $\beta$  كما ذكرنا سابقاً جدول ( 1-2 ج ) اما السبائك التي تحتوي على اكثر من  $\%28.1$  فان شرحها يشابه تلك التي تحتوي على نسب اقل من  $\%28.1$ .

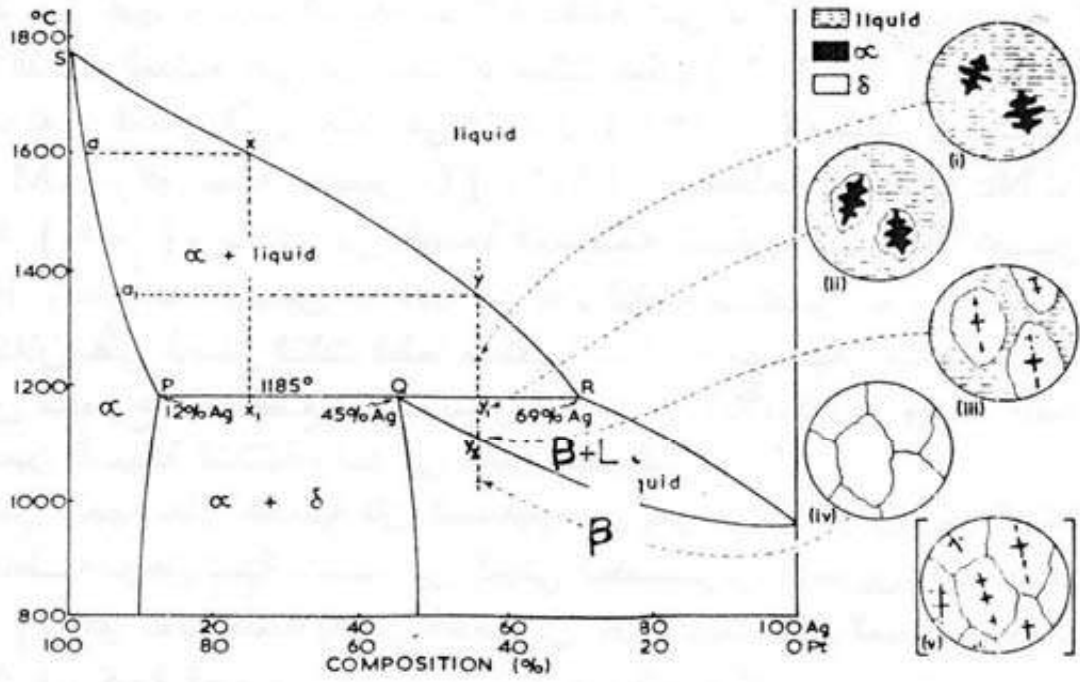
**جدول (ج-1-2) لسبيكة تحتوي على  $\%20$  نحاس -  $\%80$  فضة**

التركيب المجهرية	الوزن الكلي لكل طور	تركيب الاطوار	الاطوار المتواجدة	درجة الحرارة $^\circ \text{م}$
منصهر متجانس	$\%100$ سائل	$\%20$ نحاس	سائل	871
$\alpha$ سائل + محلول جامد $\alpha$	$\%20$ $\alpha$	$\%8$ نحاس	جامد $\alpha$	801
	$\%80$ $\beta$	$\%23$ نحاس	سائل	
$\alpha$ سائل + محلول جامد $\alpha$	$\%42$ $\alpha$	$\%8.8$ نحاس	جامد $\alpha$	779 قليل من اليوتكتك
	$\%58$ سائل	$\%28.1$ نحاس	سائل	

#### **4-9-2 مركبات تامة الذوبان في الحالة السائلة ومحددة الذوبان في الحالة الجامدة مع تفاعل حولي (بريتكتيكي) " النوع الرابع " :-**

يمكن اعتبار النظام الحولي نظام يوتكتك مقلوب كما واضح في الشكل ( 2-20 ) الذي يمثل نظام حولي لعنصري الفضة والبلاطين حيث تتكون بلورات  $\alpha$  وحولها بلورات  $\beta$  [ الناتجة من التفاعل بين  $\alpha$  والمنصهر عند درجة حرارة  $1185^\circ \text{م}$  ] ولكون  $\beta$  تحيط بالبلورات  $\alpha$  فقد سميت حولية. ولتفسير هذا المخطط نتبع مثلاً تبريد سبيكة X فعند الوصول الى درجة حرارة  $1600^\circ \text{م}$  تبدأ بلورات  $\alpha$  بتركيز (a) [ عنصر الفضة ذائب في عنصر البلاطين ] بالانفصال من المنصهر وتتجمد. وعند الوصول الى درجة الحرارة  $1350^\circ \text{م}$  سيتغير تركيب البلورات

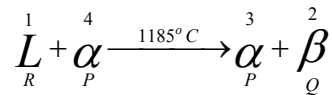
من a الى  $a_1$  وستكون نسبة المنصهر الى المتجمد  $\frac{X_o a_1}{X_o y}$  وتزداد عند هذه



الشكل ( ٢ \_ ٢ ) مخطط الاتزان الحراري Pt-Ag (النوع الرابع) .

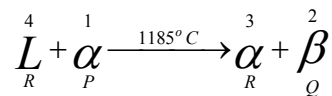
الدرجة درجة ذوبان الفضة في البلاتين حتى تصل الى اقصاها عند درجة حرارة 1185°م

( بمقدار 12% Ag ) النقطة p ، حيث يبدأ جزء من بلورات α المتجمدة فعلاً في التفاعل مع المنصهر الباقي الذي تركيبه النقطة R ( 69% Ag ) لتكوين بلورات جديدة تامة الذوبان من β ولكن بتركيب النقطة Q ( 45% Ag ) وحسب المعادلة الآتية:



ويستمر هذا التفاعل حتى يستهلك كل المنصهر تماماً. اما السبيكة y فان لها مسلك آخر، فعند الوصول الى درجة الحرارة 1850°م ستفصل بلورات α بتركيز ( a<sub>1</sub> ) ، وعند الوصول الى درجة حرارة التفاعل الحولي 1185°م سنجد ان التفاعل سيأخذ صورة اخرى بسبب ازدياد كمية المنصهر بتركيز R ( بعكس السبيكة السابقة X ) بالنسبة لكمية بلورات α

بتركيز  $\frac{y_1 a_1}{y_1 R} = P$  . ويبدأ التفاعل بين المنصهر والمتجمد حسب المعادلة الآتية:



حيث نجد ان البلورات α المتجمدة تستهلك كلها بسبب ضآلة كميتها نسبة للمنصهر وتتحول الى بلورات متجمدة من β بتركيب النقطة Q ( 45% Ag ) وعند الهبوط بدرجة الحرارة تدخل المجال RFQ ، حيث يقل المنصهر ويتحول الى β بينما تزداد بلورات β

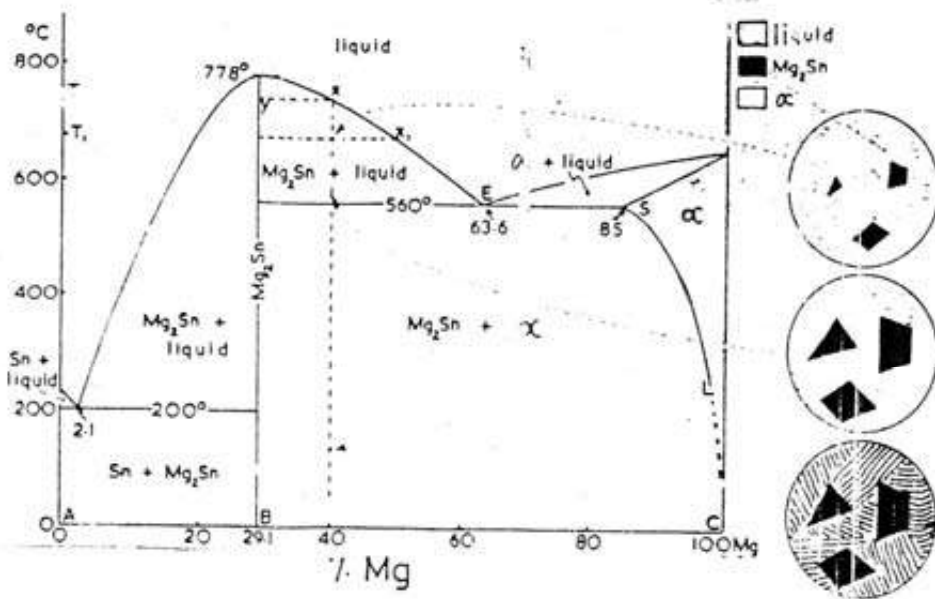


الأولية حتى نصل إلى نقطة  $y_2$  التي تتحول عندها كل السبيكة إلى بلورات  $\beta$  فقط والتي تستمر بعد ذلك على نوعها دون تغيير مع انخفاض درجة الحرارة حتى تصل إلى درجة حرارة الغرفة.

وإذا حدث تقاطع مع خط المحلول الجامد (HQ) مثل السبيكة الحاوية على (46% Ag)، ستبدأ بلورات جديدة  $\alpha$  بالترسيب من  $\beta$  وتزداد كميتها بالتدرج كلما انخفضت درجة الحرارة. ويجدر بالإشارة هنا إلى أنه توجد على خط التفاعل الحولي ثلاثة أطوار في وقت واحد ولذلك تكون درجة الحرية (الطلاقة) مساوية إلى الصفر حسب قاعدة الأطوار التي سبق شرحها.

## 5-9-2 مركبات تامة الذوبان في الحالة السائلة وتكون مركبات معدنية في الحالة الجامدة "النوع الخامس":

لا تشكل المكونات في العديد من السبائك مركباً واحداً فقط وإنما قد تشكل مركبتين أو ثلاثة أو أكثر. وتتمتع هذه المركبات بدرجات إنصهار مختلفة عن درجات إنصهار مكوناتها (عناصرها). ويمثل الشكل (2-21) مخطط حالة سبيكة مغنيسيوم - قصدير التي يشكل فيها هذان العنصران مركباً الذي يحوي المغنيسيوم بنسبة 29.1% وزناً ويوافق الصيغة  $Mg_2Sn$ .



الشكل (2-21) مخطط التوازن الحراري لسبيكة Mg-Sn (النوع الخامس)

ينصهر هذا المركب عند درجة 778 °م أي عند درجة أعلى من درجة إنصهار كل من المغنيسيوم النقي ( 650 °م ) والقصدير النقي ( 232 °م )، وتتشكل في هذه السبيكة أيضاً محاليل صلبة لـ  $Mg_2Sn$  في المغنيسيوم (الطور  $\alpha$ ). ويظهر مخطط التوازن الحراري لهذه السبيكة وكأنه مؤلف من قسمين:

أ. مخطط السبيكة Mg-Mg<sub>2</sub>Sn ويحتوي على نقطة يوتكتك توافق التراكيب 63.6% مغنيسيوم ودرجة حرارة 560 °م.

ب. مخطط السبيكة Sn-Mg<sub>2</sub>Sn ويحتوي على نقطة يوتكتك توافق التركيب 2.1% مغنيسيوم ودرجة حرارة 200°م.

ويتلخص الأختلاف الأساسي بين هاتين السبيكتين في أن أطوار السبيكة الحاوية على أكثر من 29.1% Mg لا توجد فيها بلورات من القصدير وإنما تتألف من الطور  $\alpha$  (وهو محلول جامد من القصدير والمغنيسيوم) مع بلورات المركب Mg<sub>2</sub>Sn. بينما لا يوجد في الأطوار للسبيكة الحاوية على أقل من 29.1% Mg الطور  $\alpha$  بل تتألف من بلورات القصدير وبلورات المركب Mg<sub>2</sub>Sn نفسه. وبصورة تامة يمكن اعتبار هذا المخطط مكوناً من مخططين من النوع الثاني والنوع الثالث ويتميز بوجود نهاية عظمى مكشوفة.

## 7-9-2 مخطط التوازن الحراري للحديد - الكربون :-

يمثل الشكل ( 2-24 ) مخطط التوازن الحراري بين عنصري الحديد والكربون لغاية 6.67% كربون وهي النسبة العملية لهذه السبيكة حيث يتكون الكربون الحر (الكرافيت) أو المركب الكيميائي كربيد الحديد Fe<sub>3</sub>C. ولغرض تسهيل دراسة هذا المخطط سنجزئه الى ثلاثة أجزاء وحسب درجات الحرارة.

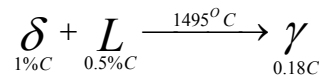
### 1. الجزء الخاص بالتفاعل الحولي :-

ويتكون هذا الجزء عند درجة حرارة 1495°م كما موضح في الشكل ( 2-24 ) فإذا أخذنا سبيكة تحتوي على 0.18% كربون سيحدث التجمد عند درجات الحرارة ما بين ( 1518 - 1497 )°م حيث يتكون الطور  $\delta$  ، وعند درجة 1443°م يوجد هذا الطور والسائل بالمقادير الآتية:

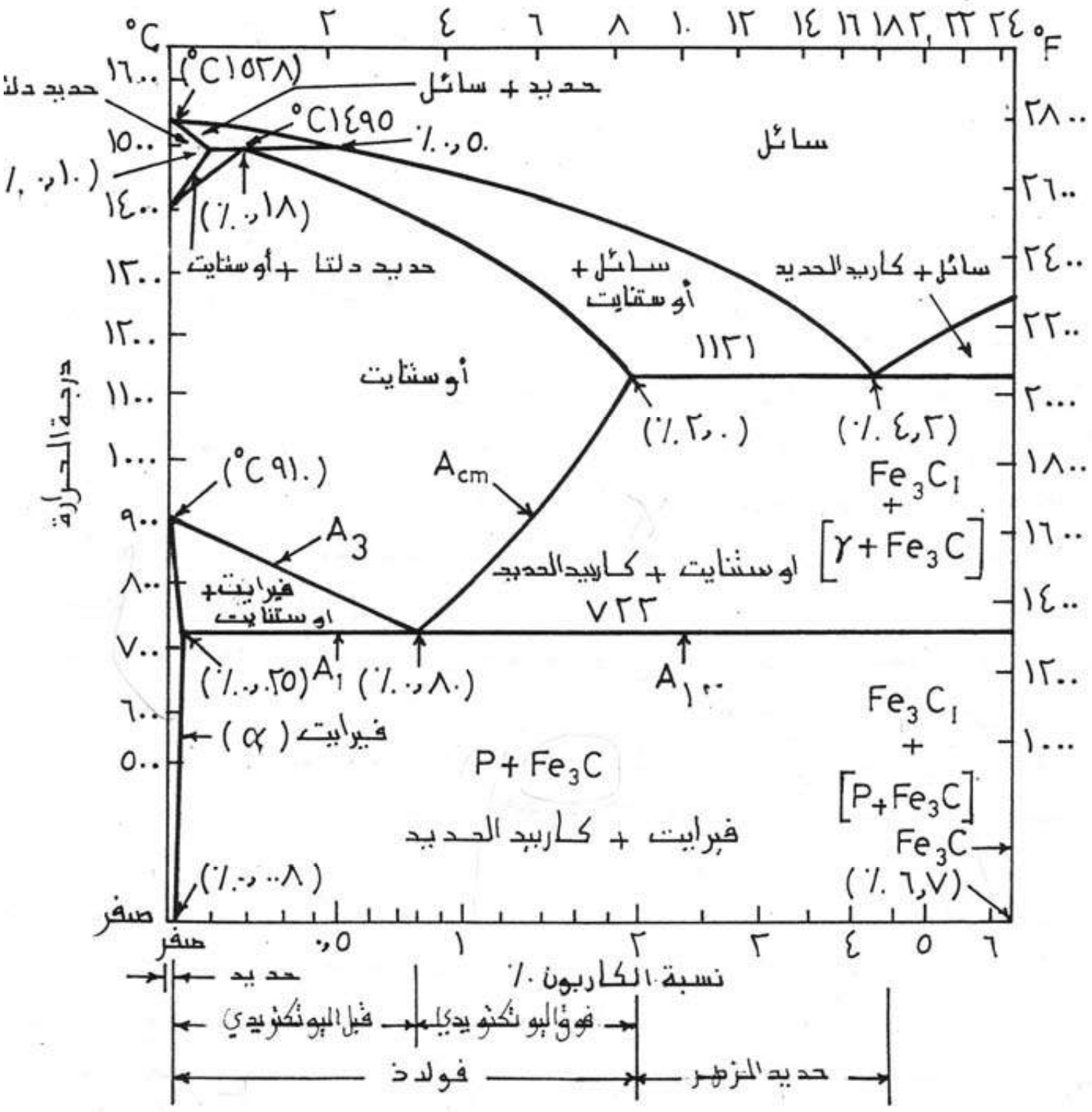
$$\text{الطور } \delta = \frac{0.18-0.5}{0.1-0.5} \times 100\% = 80\% \text{ محلول جامد}$$

$$\text{الطور السائل} = \frac{0.1-0.18}{0.1-0.5} \times 100\% = 20\% \text{ محلول سائل}$$

ويحدث التفاعل الحولي في درجة حرارة 1495°م وحسب المعادلة الآتية:



أي سنحصل على الطور الجديد ( $\gamma$ ) بتركيب 0.18% كربون من تفاعل السائل الذي يحتوي على 0.5% كربون مع الطور  $\delta$  الحاوي على 0.1% كربون.



الشكل (٢ - ٢٤) التوازن الحراري للحديد - كربون

اما السبيكة الحاوية على 0.14% كاربون فاننا سنحصل على (  $\delta$  ) عند التبريد البطيء من الحالة السائلة الى درجة حرارة 1496 °م ، ويحتوي النظام على 10% سائل تركيبه 0.5% كاربون و 90% محلول جامد من (  $\delta$  ) بتركيب 0.1% كاربون. ويتفاعل جميع السائل مع جزء من  $\delta$  لنحصل على الطور (  $\gamma$  ) في درجة حرارة التفاعل الحولي 1495 °م في ظروف التبريد المتوازن. ويتكون الناتج عند درجة حرارة مباشرة تحت 1495 °م من الطور (  $\delta$  ) بتركيب 0.1% كاربون مع الطور (  $\gamma$  ) بتركيب 0.18% كاربون، وعند الهبوط بدرجة الحرارة فإن الطور (  $\delta$  ) سيختفي ليظهر بدلاً منه الطور (  $\gamma$  ).

اما السبيكة الحاوية على 0.34% كاربون فانها تتألف من الطور (  $\delta$  ) والسائل عند درجة 1497 °م ويكون 60% منه سائلاً والباقي من طور (  $\delta$  ) الجامد. وعند درجة الحرارة 1495 °م يتفاعل جزء من السائل مع كل من الطور (  $\delta$  ) لإنتاج طور (  $\gamma$  ) بتركيب 0.18% وذلك عندما يكون التبريد متزنًا، ويتكون الناتج عند درجة حرارة دون 1495 °م بقليل من نصفين نصف من الطور السائل ونصف من الطور (  $\gamma$  )، ثم يختفي الطور السائل ليظهر بدلاً منه الطور (  $\gamma$  ) عندما تهبط درجة الحرارة.

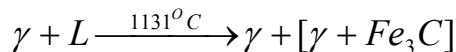
لقد لاحظنا بصورة عامة أن الطور (  $\delta$  ) وهو محلول جامد من الحديد والكاربون، ونسبة الكاربون فيه لا تتعدى 0.1% وقد تكون في درجات حرارية ما بين 1538 °م - 1401 °م.

$$[\delta = \text{Fe (c)}, \text{C} \leq 0.1\%, \text{T}^{\circ} (1401-1538)]$$

## 2. الجزء الخاص بالتفاعل اليوتكتيكي :-

### أ. سبيكة قبل اليوتكتك :

إذا تأملنا سبيكة تحتوي على 3% كاربون بردت من درجة 1370 °م فسنلاحظ حسب الشكل ( 2-24 ) أن الطور (  $\gamma$  ) يبدأ بالتجمد عند درجة 1300 °م ويستمر بالتجمد حتى تصل درجة الحرارة الى 1131 °م . وعند هذه الدرجة يكون تركيب السبيكة 50% طور صلب من (  $\gamma$  ) و 50% طور ذو تركيب يوتكتك [  $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$  ] الذي ندعوه بالليديبيوريت ( Led ).

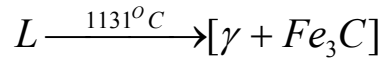


ونجد هذا واضحاً في مخطط الشكل ( 2-24 ) ويتكون هنا الطور (  $\gamma$  ) قبل أن يتكون اليوتكتك، وهو طور يحتوي على 2% كاربون، وعندما تنخفض درجة الحرارة وبتبطيء من 1131 °م فان قابلية ذوبان الكاربون في (  $\gamma$  ) ستقل وحسب الخط AcM بحيث تصبح النسبة 0.8% كاربون عند درجة الحرارة 723 °م تقريباً،

وعليه فان البنية عند هذه الدرجة تتكون من 85.1% من الطور ( $\gamma$ ) ذو التركيب اليوتكتويدي ( 0.8% كربون ) و 14.9% من السمنتايت  $Fe_3C$ .  
ان الطور ( $\gamma$ ) ذا التركيب اليوتكتويدي سرعان ما يتحول الى الخليط اليوتكتويدي عند درجة 723 م° مكوناً بنية من الطور ألفا ( $\alpha$ ) والسمنتايت  $Fe_3C$  وبنسب 88% و 12% على التوالي.

### ب. سبيكة اليوتكتك :

اذا تأملنا اليوتكتك الحاوية على 4.3% كربون عند درجة حرارة 1131 م° فنلاحظ أن هذه السبيكة ستتحول الى خليط يوتكتيكي فيه 47.7% من الطور ( $\gamma$ ) اليوتكتيكي و 52.3% من السمنتايت وحسب المعادلة

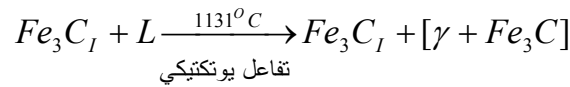


ويحتوي طور ( $\gamma$ ) اليوتكتيكي على 2% كربون عند هذه الدرجة ولكن سرعان ما تقل هذه النسبة عند هبوط درجة الحرارة لتصبح 0.8% كربون عند درجة 723 م° تقريباً.

وسرعان ما يتحول الطور ( $\gamma$ ) ذو التركيب اليوتكتويدي ( 0.8% كربون ) عند درجة 723 م° الى الخليط اليوتكتويدي مكوناً بنية من الطور ألفا ( $\alpha$ ) والسمنتايت  $[Fe_3C + \alpha]$  والذي ندعوه بالبيرلايت p

### ج. سبيكة فوق اليوتكتك :-

عند تبريد السبائك المحتوية على نسب بين 4.3%-6.67% من الكربون فان بنيتها ستتكون من سمنتايت أولي  $Fe_3C_I$  وسائل عند درجات حرارة أعلى من 1131 م° ، أما عند هذه الدرجة فان البنية ستتكون من السمنتايت الأولي وخليط يوتكتيكي اللديبيوريت  $[Fe_3C + \gamma]$



فالسبيكة الحاوية على 5% كربون مثلاً ستتكون بعد التجمد عند درجة 1131 م° من خليط يوتكتيكي بنسبة :

$$\%70.46 = \%100 \times \frac{5-6.67}{4.3-6.67}$$

ومن السمنتايت الأولي بنسبة :

$$\%29.54 = \%100 \times \frac{4.3-5}{4.7-6.67}$$

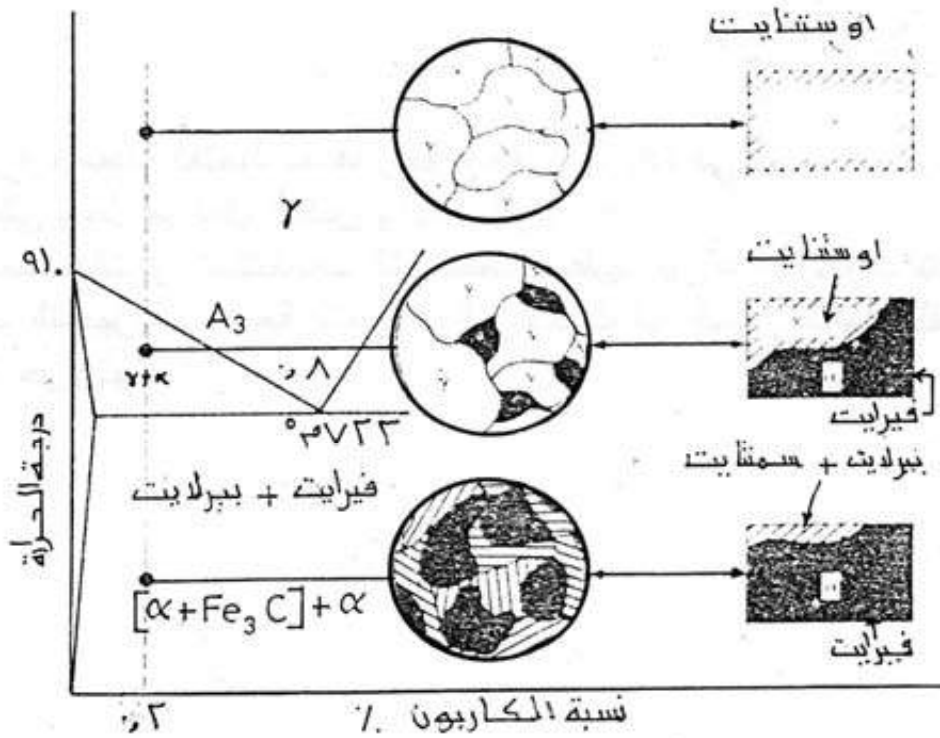
أما عند درجة 723 م° فإن بنية السبيكة ستتكون من  $Fe_3C_I$  الأولي وخليط يوتكتويدي من  $[α + Fe_3C]$ . لقد لاحظنا في الجزء الخاص بالتفاعل اليوتكتيكي ظهور المركب الكيميائي  $Fe_3C_I$  وهو مركب صلد يتكون من اتحاد الحديد مع الكربون، ويوجد أما بصورة منفصلة على شكل شبكة في مناطق حدود الحبيبات أو ان يدخل في تركيب الخليط اليوتكتويدي ( البيرلايت ). ولاحظنا كذلك ظهور الطور ( $\gamma$ ) وهو محلول جامد من الحديد والكربون تكون نسبة الكربون فيه لا تتعدى 2% ويظهر في درجات حرارية مابين 1400 – 910 م° ، وقد اتفق على تسميته حديد كاما أو حديد الاوستنايت نسبة للعالم روبرت أوستن.

### 3. الجزء الخاص بالتفاعل اليوتكتويدي :-

يعرف اليوتكتويد بأنه مزيج ميكانيكي متلاحم يتكون من طورين أو أكثر وله تركيب معين ودرجة حرارة تحول معينة في الحالة الصلبة. واليوتكتويد الخاص بنظام الحديد – الكربون يتكون عندما تكون نسبة الكربون 0.8%، ويتكون أثناء التبريد في ظروف الاتزان وعند درجة 723 م°، ويتكون من مزيج ميكانيكي متعاشق من الفيريت والسمنتيت على شكل شرائح ويظهر تحت المجهر على شكل يشبه اللؤلؤ لذا أطلق عليه الشكل اللؤلؤي ( بيرلايت ) شكل ( 2-25 )، فالسبائك التي تحتوي على نسبة من الكربون أقل من 0.8% ( سبائك قبل اليوتكتويدي ) تتجمد على النمط الذي ذكرناه في الجزء الخاص بالتفاعل الحولي من مخطط الحديد – الكربون، حيث يتكون الطور ( $\gamma$ ) عند درجة حرارة 1400 م° تقريباً. وباستمرار التبريد فإنه لا يلاحظ تغيير طوري حتى نصل إلى الخط  $A_3$  وعنده تظهر منطقة ذات طورين هما الطور  $\alpha$  والطور  $\gamma$ ، وعليه فإن  $\alpha$  يبدأ بالتكون عند درجة الحرارة المناظرة لهذا الخط، ويستمر بالتكون حتى تصل درجة الحرارة إلى 723 م° حيث يتحول الطور ( $\gamma$ ) المتبقي الذي يحتوي على 0.8% كربون إلى خليط يوتكتويدي من  $[α + Fe_3C]$  الذي ندعوه البيرلايت، وإذا استمرت عملية التبريد فلن يكون هناك تحول آخر باستثناء احتمال انفصال بعض من السمنتايت الثالث  $Fe_3C_{III}$  من الفيريت  $\alpha$  لأن ذوبان الكربون في الفيريت يتناقص من 0.025% كربون إلى 0.0025% كربون في درجة حرارة المختبر وعليه فإن البنية المتكونة لهذه السبائك هي عبارة عن فيرايت + بيرلايت كما موضح في الشكل ( 2-25 ).

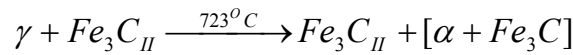
أما السبائك الحاوية على أكثر من 0.8% كربون كما في الشكل ( 2-25 ب ) ( سبائك فوق اليوتكتويدي ) فإنها ستتجمد حسب النمط الآتي:

تتفصل بلورات من الطور ( $\gamma$ ) أولاً عند بلوغ الحرارة المناظرة لخط السيولة، وعند بلوغ درجة الحرارة المناظرة لخط الانجماد يستكمل بقية المنصهر تجمده مكوناً المحلول الجامد من الطور ( $\gamma$ ) الاوستنايت، وباستمرار عملية التبريد فإنه لا يلاحظ حدوث أي تغيير طوري حتى تصل درجة الحرارة إلى الخط  $A_{cm}$  وعنده تظهر

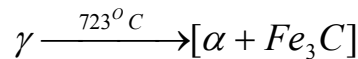


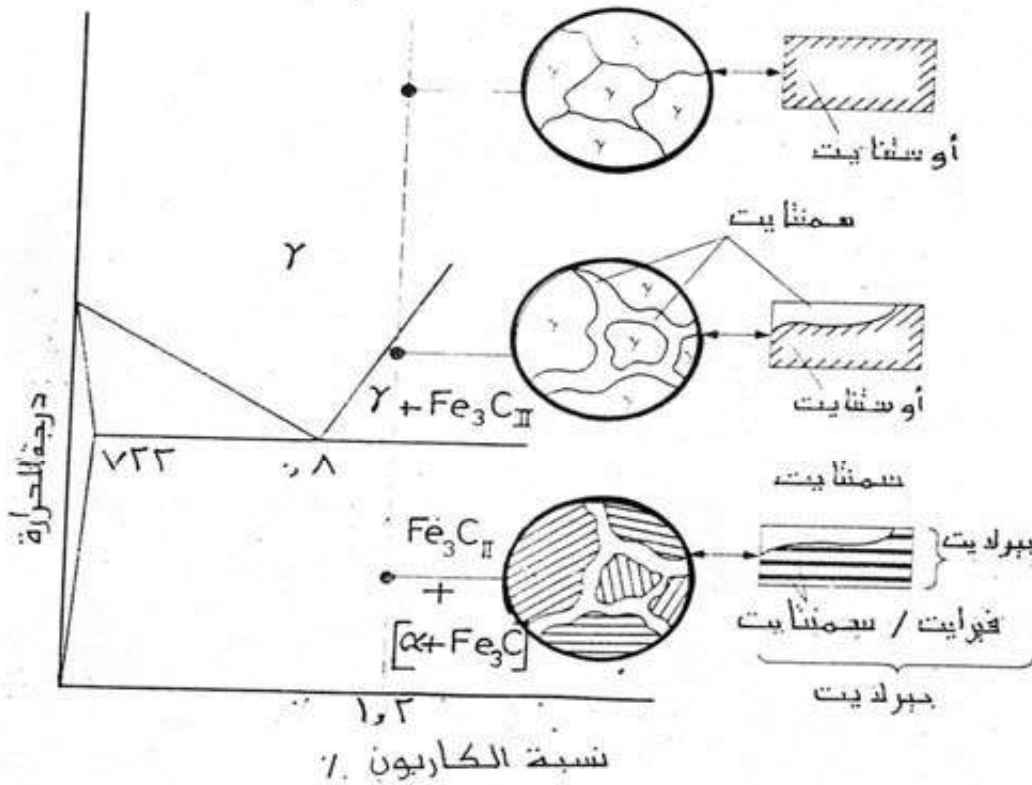
الشكل ( 2-25 ) مخطط الحديد - الكربون لسبيكة تحتوي على 0,3% كربون

منطقة تحتوي على السمنتايت الثانوي  $Fe_3C_{II}$  والطور  $(\gamma)$  شكل ( 2-25 ب ) ومع انخفاض درجة الحرارة  $723^\circ C$  فإن المتبقي من الطور  $(\gamma)$  الذي يحتوي على 0.8% من الكربون سوف يتحول الى الخليط اليوتكتويدي  $[\alpha + Fe_3C]$  وحسب المعادلة الآتية:



ان الطور  $\alpha$  الذي ظهر في هذا الجزء من المخطط هو سبيكة من الحديد والكربون لا تتعدى فيه نسبة الكربون 0.025% ويظهر في درجات حرارية أقل من  $910^\circ C$  ، وقد اتفق على تسميته الطور الفا او بحديد الفيررايت نسبة للعالم فيري. اما البيرلايت فهو بنية يوتكتويدية تحتوي على طبقات رقائقية متعاقبة من الفيررايت  $(\alpha)$  والسمنتايت  $Fe_3C$  ، ويحتوي البيرلايت على نسبة من الكربون مقدارها 0.8% ، وهو يتكون من تحول الاوستنايت  $(\gamma)$  الى فيرايت وسمنتايت حسب المعادلة الآتية:





الشكل ( 25-2 ب ) مخطط الحديد - الكربون لسبيكة تحتوي على 1,2% كربون

مثال (1) :-

فولاذ قبل البينوكتويدي يحتوي على 0.3% كربون وتتركب بنيته من α والخليط البينوكتويدي [α + Fe<sub>3</sub>C] ، المطلوب تحديد كمية α والخليط البينوكتويدي لهذا الفولاذ. [ يمكن اهمال احتواء الفيررايت على الكربون بنسبة 0.025% في الحسابات العملية].

الحل :-

بالاستعانة بالشكل ( 25-2 أ ) وتطبيق قاعدة الذراع نحصل على :

$$\alpha = \frac{0.3 - 0.8}{0.6 - 0.8} \times 100\% = 62.5\%$$

$$[\alpha + \text{Fe}_3\text{C}] = \frac{0.3 - 0}{0.8 - 0} \times 100\% = 37.5\%$$

مثال (2) :-

تتركب بنية الفولاذ فوق البينوكتويدي المحتوي على 1.2% كربون من [α + Fe<sub>3</sub>C] والسمنتايت الثانوي المطلوب تحديد كمية [α + Fe<sub>3</sub>C] وكمية السمنتايت الثانوي .



**الحل :-**

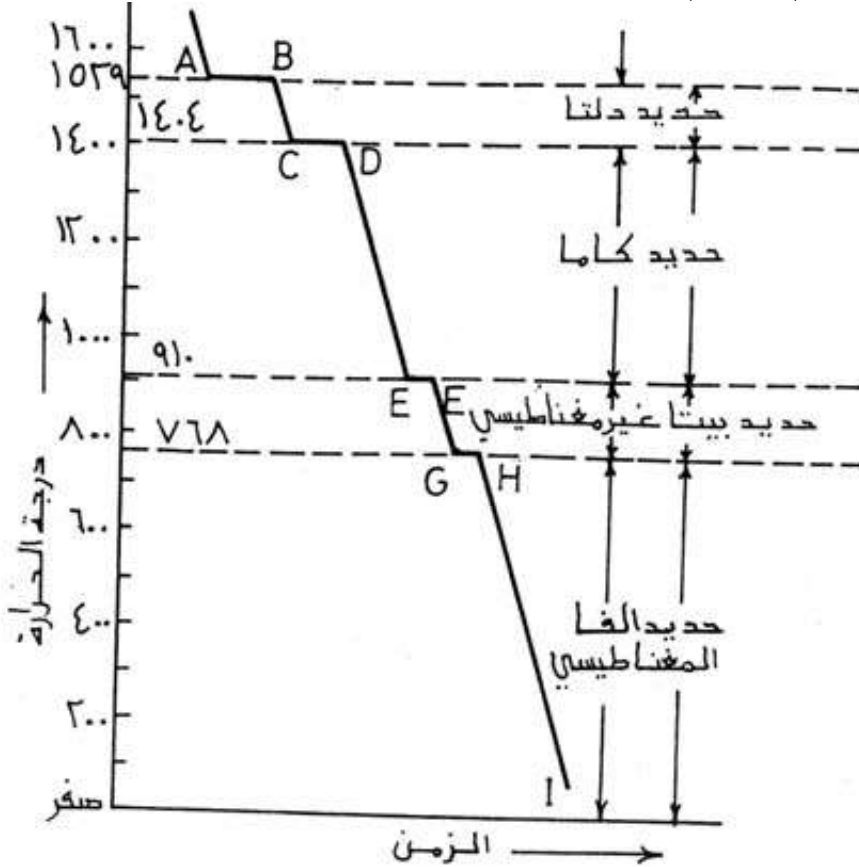
بالاستعانة بالرسم ( 2-25 ب ) وتطبيق قاعدة الذراع نجد ان :

$$\%93.18 = \%100 \times \frac{1.2-6.67}{0.8-6.67} = [ \alpha + Fe_3C ]$$

$$\%6.82 = \%100 \times \frac{0.8-1.2}{0.8-6.67} = Fe_3C$$

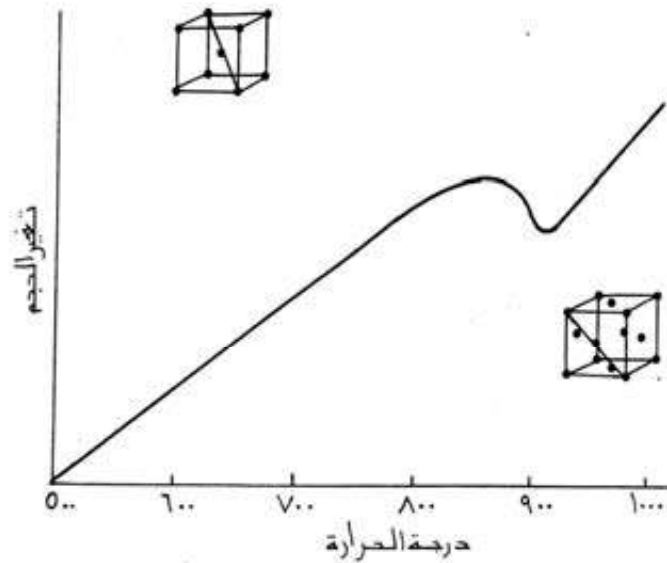
### **1-7-9-2 تأصل الأطوار في الحديد :-**

تتغير الشبكة البلورية للمعدن مع تغير درجات الحرارة، وتحدث هذه الظاهرة لبعض المعادن مثل الحديد. ويتخذ الحديد شكل شبكة بلورية من نوع B.C.C ( متركز الجسم ) في درجة حرارة المرتفعة وحتى درجة 1400 °م حيث يعيد بناء نظامه الداخلي ويعدله الى شبكة بلورية نوع F.C.C (متركز الوجه )، ويستمر كذلك حتى درجة حرارة 910 °م حيث نجده يغير هذا النظام مرة اخرى ويعود الى الشبكة البلورية B.C.C، ويبقى هذا النسق حتى درجة حرارة المختبر شكل ( 2-26 ).



الشكل ( 2-26 ) منحنى التبريد للحديد النقي

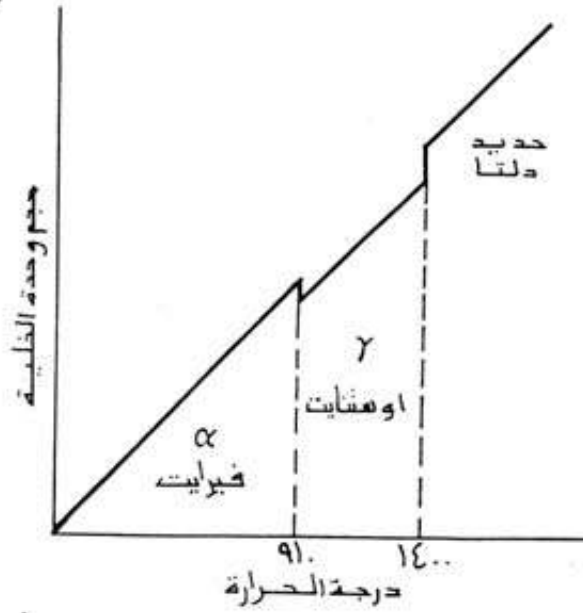
إذا سخنا قطعة من الفولاذ قبل اليوتكتويدي التي تحتوي على نسبة 0.15% كربون ستحدث زيادة في حجمها، وتستمر هذه الزيادة مع ارتفاع درجة الحرارة حتى نصل الى درجة 910 م° حيث نفاجاً بظاهرة غير متوقعة، فعلى الرغم من الاستمرار في تسخين قطعة الفولاذ فانها ستعرض الى تقلص لحظي شكل ( 27-2 ) كما ان درجة حرارة القطعة ستنبت هي الاخرى ولا ترتفع لفترة ملحوظة، وبمعنى آخر سيحدث تقلص مفاجيء في الحجم Contraction مع ثبوت درجة الحرارة على الرغم من استمرار انتقال الطاقة الحرارية، وبعد حصول قدر معين من التقلص تعود قطعة الفولاذ و توصل الزيادة في الحجم بالمعدل نفسه مع ارتفاع درجة الحرارة، وتستمر هذه الحالة حتى يصل الفولاذ الى درجة 1400 م° حيث نلاحظ حصول تمدد لحظي وان درجة حرارة القطعة ستنبت ولا ترتفع في تلك اللحظة شكل ( 28-2 )



الشكل ( 27-2 ) تغير الحجم مع درجة الحرارة للفولاذ 0.15% كربون

وبعد حصول قدر معين من التمدد، تعود قطعة الفولاذ وتستمر بزيادة حجمها بالمعدل نفسه حتى يصل الفولاذ الى مرحلة الانصهار. ومع التبريد البطيء لقطعة الفولاذ من حالة الانصهار الى درجة حرارة الغرفة نجد ان الخطوات نفسها ستتكرر ولكن بنظام عكسي، والاختلاف الوحيد هنا هو ان التغيير الفجائي في الحجم سيحدث في هذه الحالة عند درجة حرارة منخفضة بعض الشيء عن تلك التي حدث عندها اثناء التسخين.

ان التقلص المفاجيء للفولاذ على الرغم من مواصلة تسخينه يعني ان هذا الفولاذ يستوعب قدرأ ملحوظاً من الطاقة الحرارية، وقد استغلت هذه الطاقة في تغيير البنية الداخلية، أي في اعادة الترتيب الذري من B.C.C الى F.C.C .



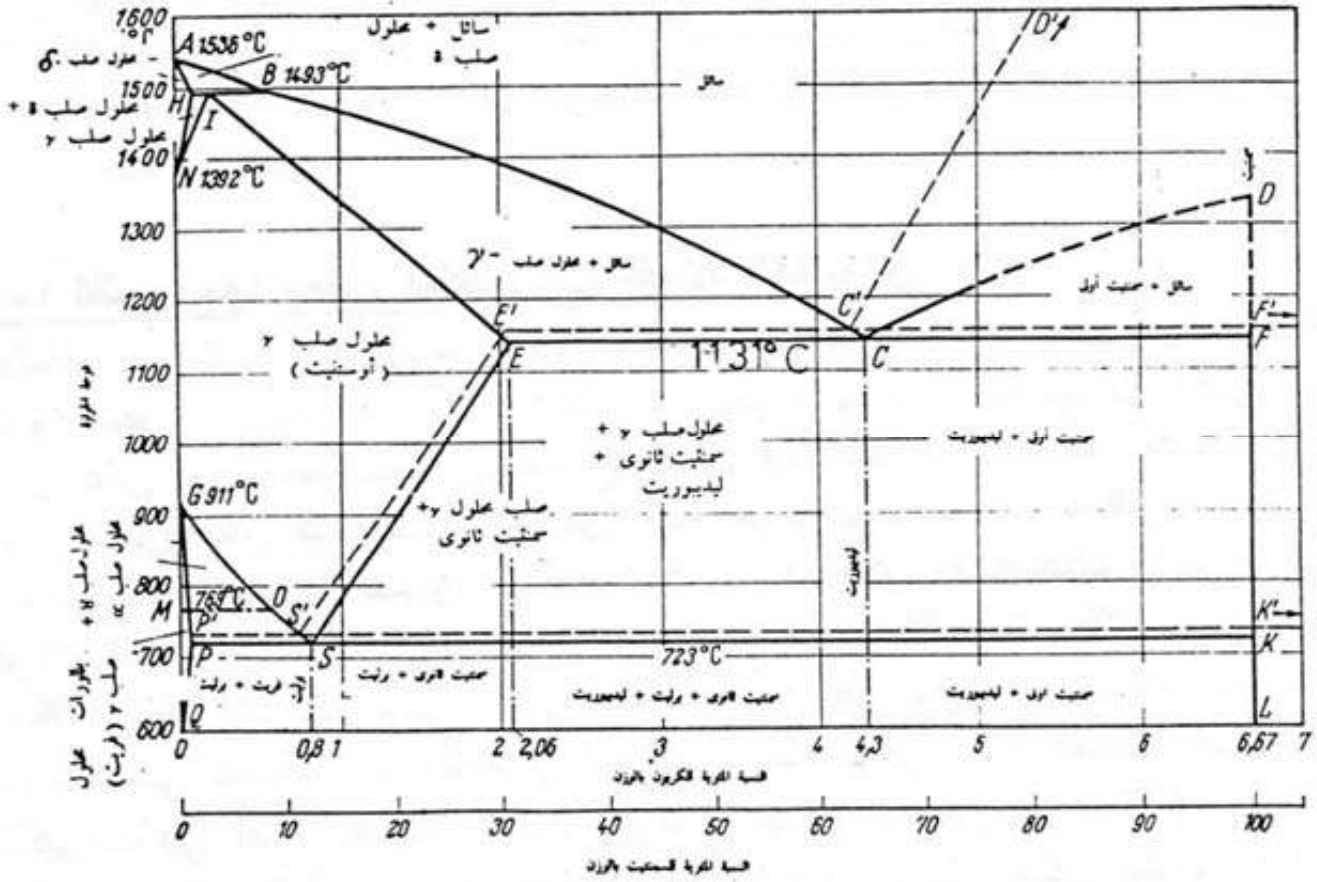
الشكل ( 28-2 ) تأصل الاطوار في الفولاذ

اما الفولاذ الذي يحتوي على نسبة اكثر من 0.8% كاربون ( فوق اليوتكتويدي ) فانه يتعرض الى التقلص المفاجيء نفسه الذي يمثل التحول الداخلي للذرات من نظام B.C.C الى نظام F.C.C ، الا انه وبعد الانتهاء من مرحلة التقلص تبدأ الزيادة في الحجم مرة اخرى ولكن بمعدل يقل قليلا عن معدل الزيادة في الحجم الأصلي، ويستمر هذا الحال حتى الوصول الى درجة حرارة معينة نلاحظ بعدها رجوع معدل الزيادة في الحجم الى وضعه الأصلي حيث يبقى كذلك حتى يدخل مراحل التلدين والانصهار.

ان المشاهدات والاستنتاجات التي نحصل عليها من هذه التجارب تفيدنا في التعرف على التراكيب المجهرية ومتابعة التغيرات التي تحدث في البنيان الداخلي لقطعة الفولاذ مع ارتفاع درجة حرارتها.

### 2-9-7-3 مخطط التوازن المستقر وشبه المستقر للحديد والكاربون :-

يعد التركيب الداخلي المكون من الحديد و الكرافيت من اثبت صور سبائك الحديد مع الكاربون، فاننا نستطيع ان نسمي نظام الحديد - الكرافيت النظام المستقر ( الخطوط المتقطعة في الشكل ( 2-30 )، والنظام شبه المستقر للسبائك بين الحديد - وكربيد الحديد ( السمنتايت ) ( الخطوط المتصلة من الشكل نفسه ) وذلك لامكانية السمنتايت عطاء كاربون هو ( كرافيت ) . ومن ملاحظة الشكل الكامل يمكن فهم صور السمنتايت المختلفة، فالبناء الداخلي للسمنتايت هو نفسه في كل الحالات عدا إختلاف في الحجم والشكل الخارجي فقط. فالسمنتايت الأولي ينفصل بصورة مباشرة من السبيكة المنصهرة على يمين النقطة C، وينفصل السمنتايت الثانوي في الحالة الصلبة عند درجة حرارة ما بين 1131 °م - 723 °م وبتراكيب 2% - 0.8% كاربون وعلى يمين الخط ES من بلورات المحلول الصلب (  $\gamma$  ) ( الأوستنايت )، أما السمنتايت الثالث فانه ينفصل تحت درجة حرارة 723 °م من بلورات  $\alpha$  ( الفيريت ) وبتراكيب من 0.025% - 0.0025% كاربون.



الشكل ( 2-30 ) النظام المستقر و شبه المستقر للسبائك الحديد - و الكربون

## 10-2 الفولاذ ( الصلب ) Steel :-

يطلق اصطلاح الفولاذ ( الصلب ) على السبيكة الحاوية على الحديد مع نسبة من الكربون لا تتجاوز 2% كربون كما في الشكل ( 2-31 ). ويمكن تقسيم الفولاذ الى نوعين أساسيين هما: الفولاذ الكربوني و الفولاذ السبائكي.

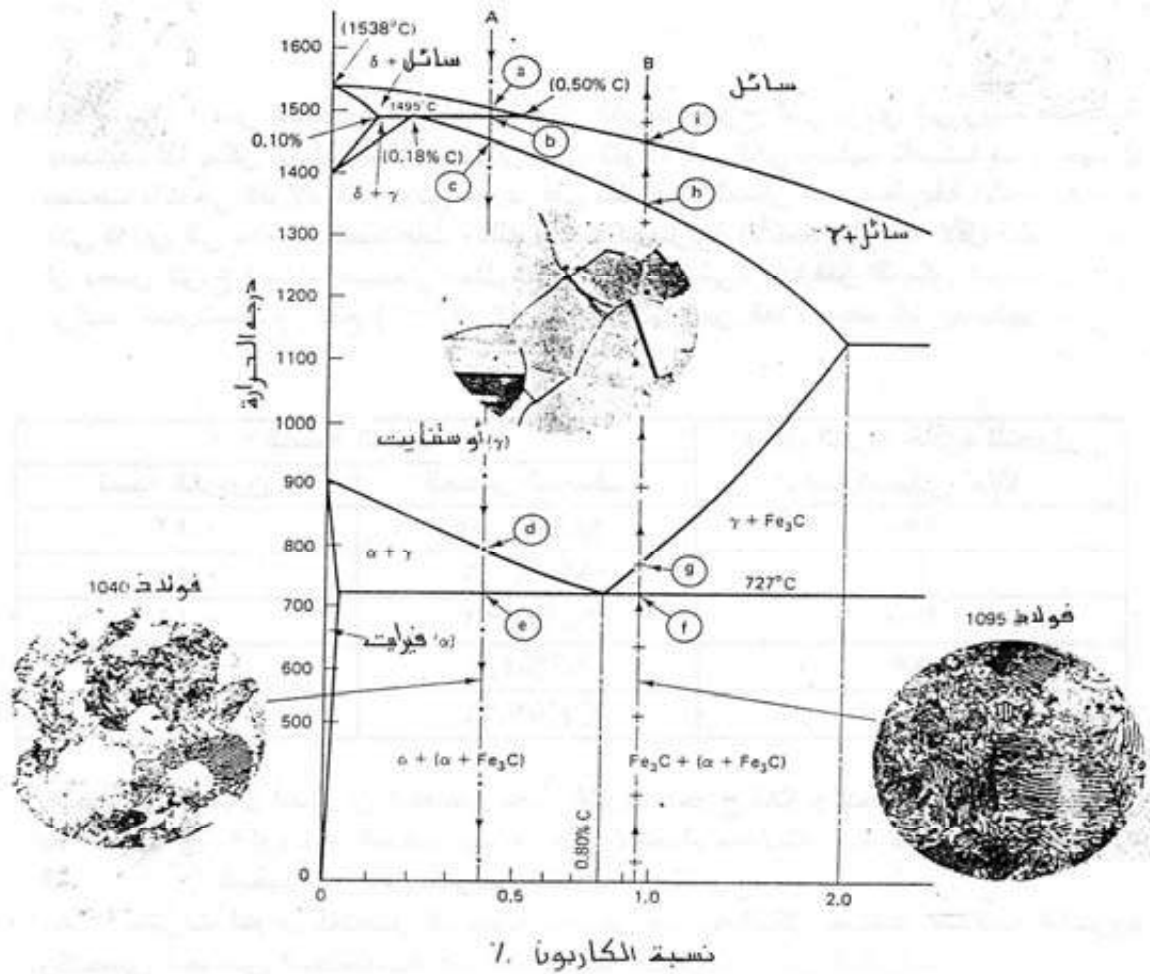
1. **الفولاذ الكربوني**:- وهو الفولاذ الذي يلعب فيه الكربون دوراً أساسياً في تحديد خواصه

وبنسبة لا تتجاوز 1.4% كربون.

وهناك اربعة أنواع من هذا الفولاذ هي :

أ. الفولاذ المنخفض الكربون، ويحتوي على نسبة أقل من 0.35% كربون، ويمتاز بالمطيلية العالية عند تشكيله على الساخن لذا لديه قابلية جيدة على الخراطة. ويمكن تقسيم هذا الفولاذ الى نوعين، النوع الأول ويسمى الفولاذ الطري الهامد Dead Mild Steel ويحتوي على نسبة من الكربون ما بين 0.05% الى 0.15% كربون، وتصنع منه الشرائط المدرفلة على الساخن لغرض الكبس والقضبان والأسلاك في صناعة المسامير، اما النوع الثاني فهو الفولاذ الطري Mild Steel ويحتوي على 0.1% - 0.3% كربون، وهذه النسبة من الكربون كافية للحصول على سطوح صلدة بالكربنة ليصبح بالامكان الجمع بين سطوح ذات مقاومة بلى ( Wear ) عالية وخواص

لب متينة، ويستخدم هذا النوع من الفولاذ في الصناعات الأنشائية بسبب مقاومته العالية ومطيلته المنخفضة.

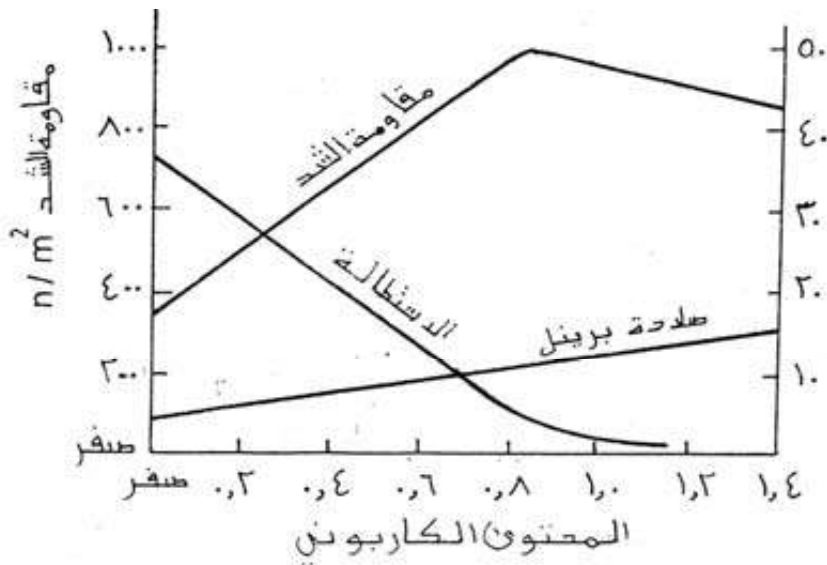


الشكل ( 2-31 ) مخطط الفولاذ A - سبيكة قبل اليوتكتك B - سبيكة فوق اليوتكتك

- ب. فولاذ متوسط الكربون، ويحتوي على نسبة من الكربون ما بين 0.35% - 0.6% كربون ويمكن تصليده كلياً بالآخامد والمراجعة ليعطي مقاومة جيدة جداً ومتانة عالية.
- ج. فولاذ عالي الكربون، ويحتوي على نسبة من الكربون ما بين 0.6% - 0.8% كربون، وهذه النسبة العالية من الكربون تساعد هذا النوع من الفولاذ على معاملته حرارياً لتحسين خواصه. ويستعمل هذا النوع في صنع عجالات السكك الحديد والأسلاك ذات المقاومة العالية مثل أوتار البيانو وأسلاك الخياطة وأسلاك النوابض.
- د. فولاذ العدة الكربوني، ويحتوي على نسبة من 0.8% - 1.4% كربون، ويستخدم هذا النوع في كثير من الصناعات العامة مثل اللوالب والمثاقب والمطارق والسكاكين وغيرها من العدد المنزلية ويعتبر فولاذ العدة الكربوني محدود الاستخدام بسبب صلابته ومقاومته المنخفضة في درجات الحرارة المرتفعة بالمقارنة مما هو عليه في فولاذ العدة السبائكي.

## 2-1-10-2 بنية الفولاذ الكربوني والخواص الميكانيكية :-

تعتمد الخواص الميكانيكية للفولاذ الكربوني ببطأ على النسب المئوية لمكونات التراكيب المجهرية المختلفة، فيحتوي الفولاذ الكربوني على الفيررايت والسمنتايت اللذان يكونان البيرلايت، ويعد الفيررايت الحالة اللينة الصعبة الكسر نسبياً، أما السمنتايت فهو الحالة الصلدة الهشة والشكل ( 2-33 ) يبين الخواص الميكانيكية والنسب المئوية للكربون ويلاحظ من الشكل ( 2-33 ) ان المقاومة تتناسب خطياً مع زيادة النسبة المئوية للكربون لغاية 0.8% ( بيرلايت 100% ) ولا تستمر هذه العلاقة الخطية بعد ذلك نتيجة لظهور السمنتايت في التركيب المجهرى. وقد وجد ان صلادة الفولاذ قبل اليوتكتويدي المملدن يمكن تحديدها من المعادلة:



الشكل ( 2-33 ) العلاقة بين الخواص الميكانيكية والنسب المئوية للكربون

$$[ M_p 180 + M_F 80 ] 1.3 = H_B$$

اما صلادة الفولاذ فوق اليوتكتويدي فيمكن تحديدها من المعادلة:

$$[ M_c 800 + M_p 180 ] 1.3 = H_B$$

والقيمة الثابتة 1.3 وضعت لتصحيح الناتج من تأثير الشوائب، اما أرقام الصلادة 80، 180، 800 فهي لكل من الفيررايت والبيرلايت والسمنتايت على التوالي. اما كمية الفيررايت والبيرلايت والسمنتايت فرمزها  $[ M_c$  و  $M_p$  و  $M_F$  ] على التوالي.

وتحدد خواص الفولاذ قبل اليوتكتويدي بمقادير متوسطة لخواص كل من البيرلايت والفيررايت. اما الفولاذ فوق اليوتكتويدي فيظهر بدلاً من الفيررايت السمنتايت الثانوي الذي يعمل على زيادة الصلادة والمقاومة وتقليل اللدونة، وبزيادة السمنتايت الثانوي تزداد قسافته (هشاشته) وزيادة كبيرة وتنقص مقاومته ليصبح عندئذ تقدير الخواص الميكانيكية غير دقيق. وبصورة عامة هناك علاقة تجريبية تقريبية بين النسبة المئوية للكربون ومقاومة الشد (  $\sigma$  ) للفولاذ قبل اليوتكتويدي المبرد تبريداً بطيئاً كما في الشكل ( 2-33 )

$$\sigma \text{ نيوتن/مم}^2 = 350 + C\%700$$

## 2-10-2 الفولاذ السبائكي (Alloy Steel) :-

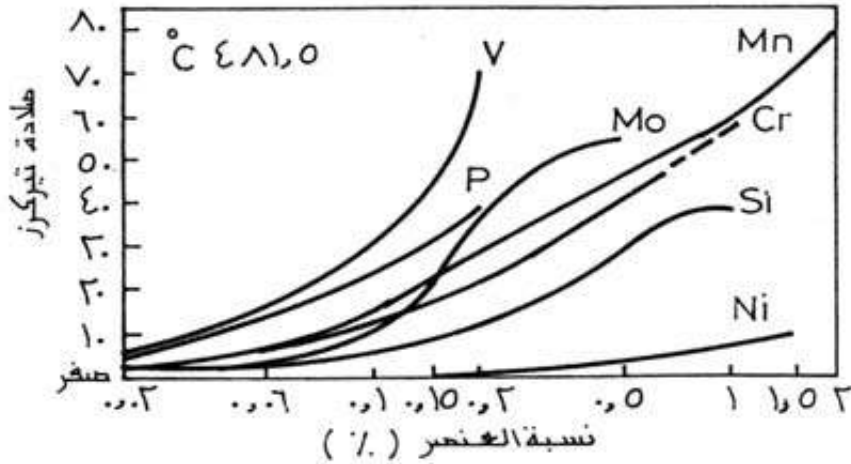
هو الفولاذ الذي يحتوي على نسب قليلة من عناصر الـ ( S , p , Si , Mn ) وعلى نسب اخرى من عناصر خاصة مثل ( Cu, Co, W, Mo, Cr, Ni ) او على نسب عالية من عناصر مثل (Mn, Si).

ويسمى الفولاذ السبائكي حسب العنصر المضاف اليه فيقال مثلاً فولاذ كرومي أو فولاذ منغيزي أو فولاذ سليكوني وهكذا. وقبل الحديث عن الفولاذ السبائكي واستخداماته وخواصه لابد من القول أن للفولاذ الكربوني استخدامات محدودة للأسباب الآتية:

1. عدم امكانية الحصول على مقاومة شد اعلى من 700 نيوتن/م<sup>2</sup> اذا أريد الاحتفاظ بمتانة مستطيلية معقولتين في آن واحد.
2. تؤدي عملية التصليد للفولاذ الكربوني باستخدام الماء الى حدوث عددٍ من التصدعات والعيوب.
3. للفولاذ الكربوني مقاومة ضعيفة للتآكل والتأكسد في درجات الحرارة العالية.

## 1-2-10-2 تأثير العناصر المضافة في خواص الفولاذ السبائكي :-

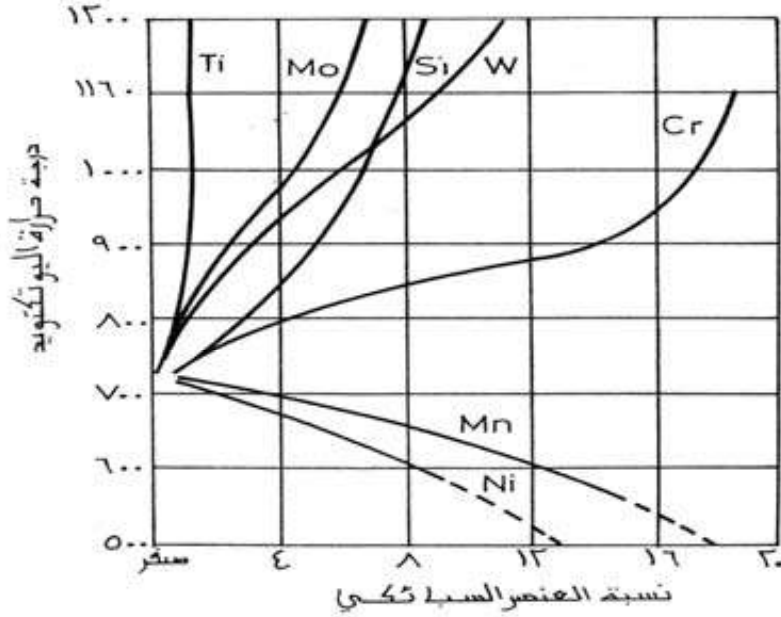
1. تؤدي العناصر السبائكية المضافة الى زيادة الصلادة للفولاذ بسبب تكوين المحلول الجامد الذي يؤدي الى حدوث تشويه في بنية الشبكة البلورية كما في الشكل ( 2-35 ).
- 2.



الشكل ( 2-35 ) تأثير العناصر المضافة على صلادة الفولاذ السبائكي

3. ان وجود نسبٍ من العناصر مثل ( W, Cr, Mn, Mo, Ti, V ) تفوق حد الذوبان في الحالة الجامدة يؤدي أحياناً الى تكوين الكاربيدات الصلدة مثل ( Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Mo<sub>2</sub>C, WC ) وعادة ما تكون هذه الكاربيدات مقترنة مع السمنتايت.
4. تؤدي بعض العناصر المضافة الى تكون مركبات وسطية مثل ( FeCr, Fe<sub>3</sub>W<sub>2</sub> ).
5. تؤدي بعض العناصر المضافة مثل ( Cu, Co, Al, Ni, Si ) الى تحلل الكاربيدات وتكوين الكرافيت وهذا بدوره يؤدي الى نقص في قيمة المقاومة والمطيلية ومقاومة

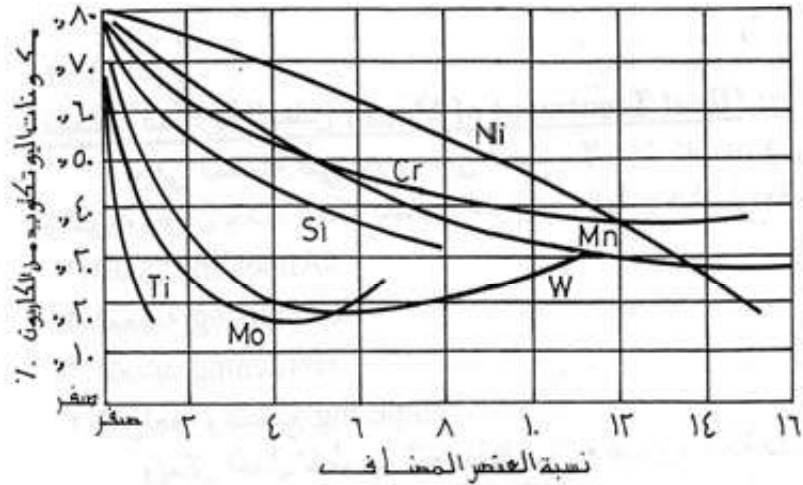
- الصدمة، وللتغلب على تأثير مثل هذه العناصر تضاف عناصر سبائكية اخرى تحمل تأثيراً معاكساً وهي العناصر التي تسبب تكوين الكاربيدات.
6. تعمل بعض العناصر مثل ( Cr, Si ) على نمو الحبيبات بينما يحد البعض الآخر مثل ( Ni ) من نمو هذه الحبيبات.
7. تعمل بعض العناصر على تغيير درجات الحرارة الحرجة ( درجة حرارة التفاعل اليوتكتويدي )، فإضافة 3% نيكل على سبيل المثال تؤدي الى خفض  $A_1$  بمقدار  $30^\circ \text{C}$ . كما في الشكل (2-36) وعند اضافة 1% Cr ترتفع  $A_1$  الى  $880^\circ \text{C}$ .



الشكل (2-36) تأثير العناصر المضافة على درجة حرارة اليوتكتويد

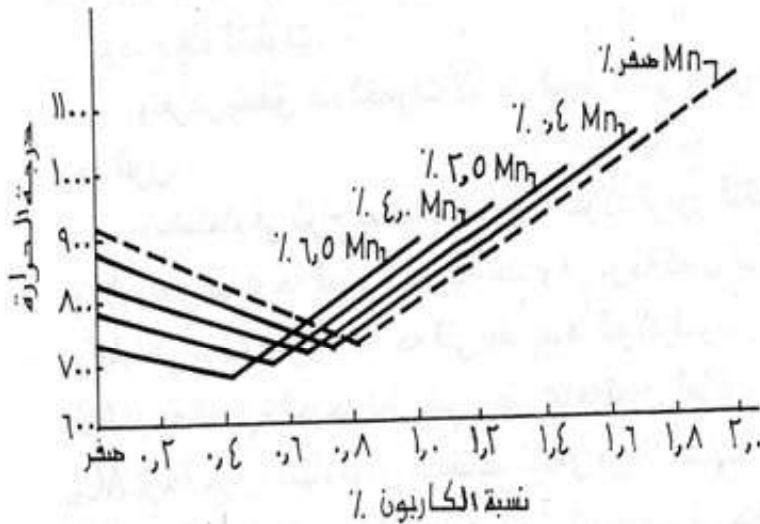
8. تؤدي العناصر السبائكية أيضاً الى خفض نسبة الكربون في تركيب اليوتكتويد ( البيرلايت ) شكل ( 2-37 ) فإضافة 4% Ni ستصبح نسبة الكربون في اليوتكتويد 0.7% كربون وعند اضافة 4% Cr ستصبح هذه النسبة 0.55% كربون.





الشكل ( 2-37 ) تأثير العناصر المضافة على تركيب اليوتكتويد

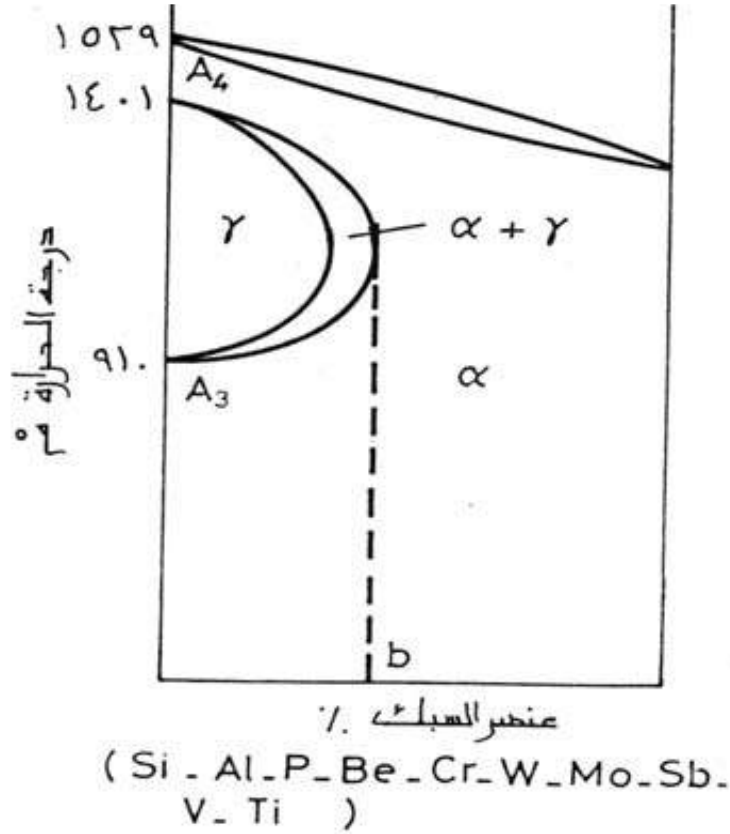
اما الشكل ( 2-38 ) فيوضح تأثير النسب المختلفة للمغنيز في نسبة الكربون في اليوتكتويد وفي درجة حرارة اليوتكتويد معاً.



شكل ( 2-38 ) تأثير نسب المغنيز على تركيب اليوتكتويد و درجة حرارة اليوتكتويد

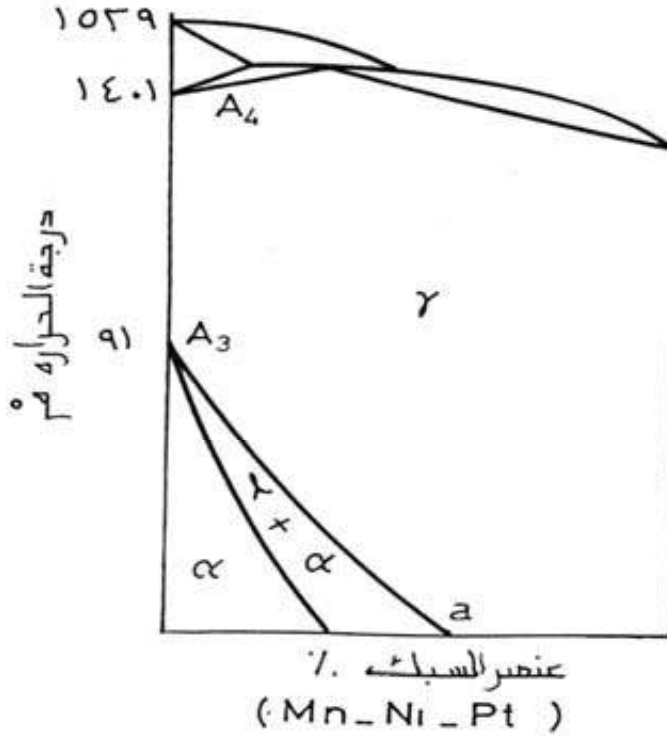
9. ترفع بعض العناصر السبائكية درجات الحرارة الحرجة او تخفضها (  $A_4$ ,  $A_3$  ) اذ يرمز لتحول  $\alpha$  الى  $\gamma$  بـ (  $A_3$  ) ولتحول  $\gamma$  الى  $\delta$  بـ (  $A_4$  )، فالعناصر [ Mo, Cr, Si, W, V, Al ] تزيد من قيمة  $A_3$  حتى تندمج بنقطة  $A_4$  مكونة ما يسمى بحلقة كاما المغلقة شكل ( 2-39 )، وعندما تصل نسبة هذه العناصر في الفولاذ حداً معيناً سيصبح الفيرريت مستقراً عند درجات الحرارة كافة ويطلق عليه اسم الفولاذ الفيريتي الذي يمتاز بصفاته المغناطيسية ومقاومته لفعل درجات الحرارة ومقاومته للصدأ علاوة

على انه غير قابل للتصليد بالمعاملات الحرارية. ويمكن تصغير حجم حبيبات هذا النوع من الفولاذ بطريقة التلدين بعد عملية التشكيل على البارد. اما العناصر [ Cu, Co, Mn, Ni ] فانها تخفض من قيمة (  $A_3$  ) وترفع من قيمة (  $A_4$  )، وعندما تصل نسبتها حداً معيناً فانها ستؤدي الى استقرارية الأوستنايت حتى في درجة حرارة الغرفة.



شكل ( 2-39 ) الفولاذ الفيبرايبي

ويكون هذا النوع من الفولاذ ذا بنية اوستنايتية عندما يبرد بالهواء الى درجة حرارة الغرفة ويسمى الفولاذ الأوستنايتي. ومن خواص هذا النوع من الفولاذ خلوه من الصفات المغناطيسية وعدم امكانية تصليده بطرائق الأخماد الاعتيادية علاوة على انه لدن عند حد المرونة وله قوة تماسك عالية ومقاومة لفعال درجات الحرارة العالية كما في الشكل ( 2-40 ).



الشكل ( 40-2 ) الفولاذ الاوستنيتي

### 3-10-2 تصنيف الفولاذ :-

#### 1-3-10-2 اولاً: تصنيف الفولاذ حسب العنصر المضاف :-

**فولاذ نيكلي:-** يكون النيكل مع الحديد محلولاً صلباً ذا بنية بيرلايتية اذا كانت نسبته 5% وبنية اوستنيتية اذا كانت نسبته 25% ، اما اذا زادت نسبته كثيراً فانه يكون بنية مارتنسايتية، ويستخدم الفولاذ الحاوي على 2-5% نيكل في اجزاء المكائن التي تتعرض للصدمات والجهد الحراري، بينما الفولاذ الحاوي على 3.5% نيكل فيستخدم في الأعمال الأنشائية لمرونته العالية، اما الفولاذ الحاوي على نسب عالية من النيكل فيستخدم كفولاذ مقاوم للصدأ.

**فولاذ كرومي:-** ان بنية الفولاذ الحاوي على نسبة اقل من 6% من الكروم لا تختلف كثيراً عن بنية الفولاذ الكربوني الخالي، وعندما تكون نسبته اكثر من 6% فان بنيته تتكون من الفيراييت مع بلورات الكاربيدات. ومن الاستعمالات المهمة لهذا الفولاذ صناعة الكرات والدرافيل الأسطوانية وكراسي المحاور، بينما تستخدم انواع الفولاذ العالية الكروم لمقاومة التآكل الأحتكاكي وزيادة مقاومة الزحف عند درجات الحرارة العالية.

**فولاذ منغيزي:-** يضاف المنغيز الى الفولاذ باعتباره عاملاً مساعداً اذ يتحد مع الأوكسجين مكوناً أوكسيد المنغيز، ولا يضاف هذا العنصر بنسب عالية لانه يگون مع السليكون مركبات معدنية هشة تجعل الفولاذ صعب التشغيل ومقاوم للتآكل، ومن الاستعمالات المهمة لهذا النوع من الفولاذ صناعة أجزاء المكائن المستخدمة في البثق والسحق والمعدات الخاصة بالسكك الحديدية.

**فولاذ التتستون:-** يوجد التتستون مع عناصر اخرى في الفولاذ السباتكي، ومن هذه العناصر الكروم والمنغيز، ويؤدي بصورة عامة الى احتفاظ الفولاذ بصلادته عند تسخينه لذا يستخدم في صناعة ادوات القطع، ويبيد الفولاذ الحاوي على 4-5% من هذا العنصر خاصية الاحتفاظ العالي للمغطة، مما يجعله ذا قيمة في صناعة المغناط الدائمة.

**فولاذ المولبدنيوم:-** ان تأثير المولبدنيوم مشابه لتأثير عنصر التتستون من حيث قوة التصليد ورفع مقاومة الشد. وعند اضافة عنصر الكروم الى المولبدنيوم يتكون فولاذ ذو مقاومة عالية للكلال وللتاكل في درجات الحرارة العالية.

**فولاذ الفناديوم:-** ان وجود هذا العنصر مع الفولاذ يكون على صورة كاربيدات علاوة على انه يگون محلولاً جامداً مع الفيراييت، ويستخدم هذا الفولاذ في انتاج العدد والمصوبات والمطروقات.

**فولاذ سليكوني:-** ان وجود السليكون بنسب اكثر من 3% يگون سبيكة تستخدم في صناعة المعدات الكهربائية، اما اذا احتوى هذا الفولاذ على عنصر اضافي مثل الكروم بنسبة 6% فان هذه السبيكة تحتفظ بصلادتها في درجات الحرارة العالية، لذا تستخدم في صناعة الصمامات في الآلات الأتراق الداخلي.

## **2-3-10-2 ثانياً: تصنيف الفولاذ حسب الاستخدام:-**

### **1. فولاذ انشائي سباتكي:-**

ويستخدم هذا النوع من الفولاذ في صناعة أنواع مختلفة من أجزاء الماكينات والمنشآت عالية المقاومة والمتانة، ويحتوي على عناصر خلط سباتكي أساسية مثل الكروم (0.8-1.1%) والنيكل (0.5-4.5%) والسليكون (0.5-1.2%) والمنغيز (0.8-1.8%)، وتخلط مع هذه العناصر عناصر اخرى مثل التتستون والمولبدنيوم والفناديوم والتيتانيوم والبورون ولكن بنسب ضئيلة لغرض اضافة تحسينات اخرى في الخواص. وتنتمي غالبية انواع هذا الفولاذ الانشائي الى الفولاذ البيرلايتي وضمن مجموعة الفولاذ قبل البوتكتويدي وعندما تجرى على الفولاذ معاملات حرارية مثل التصليد والمراجعة ترتفع فيه الخواص الميكانيكية اذ يزداد حد الخضوع والصلادة والمتانة، ويرجع الفضل في ذلك الى السرعة الحرجة للتبريد في حالة الفولاذ السباتكي، علاوة على ذلك تكون بنية حبيبات الفولاذ السباتكي وحجمها أصغر مما عليه في الفولاذ الكاربوني، وعليه فان الفولاذ السباتكي يستخدم في صناعة الأجزاء الضخمة وكذلك الأجزاء الصغيرة ذات المقاطع المعقدة. وبزيادة تركيز عناصر الخلط السباتكي تصبح قابلية الفولاذ على التصليد اكبر واعمق، وقد لا يؤدي هذا التصليد احياناً الى تحسين

الخواص الميكانيكية للفولاذ بل العكس من ذلك فإنه قد يؤدي الى تدهورها والى زيادة درجة حرارة التحول من اللدونة الى القصفة ( تقليل المتانة ).

## 2. الفولاذ المقاوم للصدأ:-

تفقد المعادن في كثير من الحالات بريقها المعدني ويتغطي سطحها بنواتج التاكسد او الصدا الامر الذي يؤدي الى تدهور خواصها الميكانيكية، بشكل حاد ويحصل الصدا عادة من تأثير الغازات او السوائل غير الألكتروليتية مثل النفط ونواتجه، او من تأثير السوائل الألكتروليتية كالأحماض والقلويات والأملاح. وقد لوحظ ان الفولاذ الحاوي على 13% كروم تكون مقاومته للتآكل الجوي جيدة بسبب تكون طبقة رقيقة مستقرة  $(CrFe)_2O_3$  على سطحه تمنع تآكله عند مهاجمته بالسوائل ذات الطبيعة المؤكسدة، كما يمكن زيادة مقاومة الصدا باضافة عنصر الألمنيوم او السليكون وهما عنصران يذوبان في الحديد ويكونان في اثناء التسخين قشرة واقية من الأكاسيد. ويمكن تقسيم هذا الفولاذ الى الأنواع الآتية:

أ. الفولاذ الكرومي الذي تكون بنيته مارتنيسيت، وهو فولاذ يحتوي على 0.2% - 0.4% كربون زائداً 13% كروم، ويصلد بالأخمد بالزيت من درجة 950 °م وفي هذه الحالة يتميز بمقاومة تآكل قصوى نتيجة ذوبان جميع الكربيدات في المحلول الجامد. وتكون هذه السبائك صعبة اللحام، وتتنخفض مقاومتها للتآكل بسبب التشكيل على البارد. ويستعمل هذا النوع من الفولاذ في صناعة الصمامات والمكابس وفي صناعة أدوات القطع والجراحة التي تحتاج الى حافات حادة.

ب. الفولاذ الكرومي الذي تتكون بنيته من الأوستنايت والذي يحتوي على 0.12% كربون. وتكون نسبة الكروم الى النيكل في هذا النوع من الفولاذ هي 8 الى 18، ولا يمكن تصليد هذا النوع بالأخمد لان الإخمد من درجة حرارة 1050 °م يؤدي الى إمتصاص الكربيدات من قبل المحلول الجامد وتكوين بنية من الأوستنايت فقط التي تمتاز بالليونة وخلوها من المغناطيسية مع امتلاكها مقاومة تآكل قصوى. ويستعمل هذا النوع من الفولاذ في مصانع الكيماويات والألبان وصناعات المواد الغذائية وللأغراض المنزلية. وعند تسخين الفولاذ الأوستنايتي حتى درجة 500 - 700 °م (اثناء اللحام مثلاً) ستنفصل كربيدات الكروم على الحدود بين الحبيبات، ولهذا سيقبل تركيز الكروم في المحلول الجامد بالقرب من الحدود بين الحبيبات عن 12% الأمر الذي يؤدي الى انخفاض شديد في مقاومة الصدا مما يجعل الفولاذ عرضة للصدأ بين البلورات ( بين الحبيبات ) الذي يتطور الى تشققات على امتداد تلك الحدود مما يؤدي الى انهيار الفولاذ.

ج. الفولاذ الكرومي الذي تتكون بنيته من الفيرائيت، ويحتوي هذا النوع على 0.05% - 0.15% كربون و 16% - 30% كروم وهو غير قابل للتصليد بالمعاملة الحرارية، وتتألف بنيته من حبيبات الفيرائيت وجسيمات من الكربيدات ويستعمل في صناعة الأجزاء التي تعد فيها الخواص الميكانيكية خواصاً ثانوية اذا ما قورنت مع مقاومة التآكل والقابلية الجيدة على التشغيل.

## 3. الفولاذ المقاوم للحرارة العالية:-

يمتاز هذا النوع من الفولاذ بمقاومته للزحف والتأكسد والتفشر ( Scaling ) لاحتوائه على عناصر مثل الكروم والألمنيوم والسليكون اذ تتكون أكاسيد هذه العناصر على شكل غشاء واقى، ويجب ان تكون بنية هذا النوع مستقرة ( غير متغيرة ) في

درجات الحرارة العالية كي تمنع ترسب الكربيدات في مناطق الحدود الحبيبية او تكورها.

ومن صفات هذا النوع من الفولاذ أيضاً قابليته على التشغيل بالمكائن وقابليته على اللحام ومقاومته للكلال، ويستخدم هذا النوع في محطات توليد القدرة البخارية حيث يكون حاوياً على المولبدنيوم بنسبة 0.5% الذي يساعد على تكوين كربيدات مستقرة، ويستخدم كذلك في صناعة الصمامات عندما يحتوي على عنصري الكروم بنسبة 8% والسيلكون بنسبة 3.5%، ويستخدم في صناعة ريش وأقراص التوربينات الغازية عندما يحتوي على عنصري النيكل بنسبة 8% والكروم بنسبة 18%.

#### 4. فولاذ العدة السبائكي:-

تتصف جميع أنواع فولاذ العُد بصفات مشتركة مثل الصلادة والمتانة ومقاومة الأحتكاك الميكانيكي، ويمتاز البعض من هذا النوع بقلة التشويه خلال التصليد وبالمتانة العالية جداً وبالمقاومة ضد التلين بالحرارة وبالتشق في الفولاذ المستخدم في التشكيل على الساخن والقطع السريع. ويفضل ان يكون فولاذ العُد قابلاً للخراطة والجلخ قدر الإمكان وخالياً من النزوع الى فقدان الكربون في اثناء المعاملة الحرارية. وبشكل عام يجب ان تتوفر في هذا النوع من الفولاذ عناصر تساعد على تكوين الكربيدات الصلدة مثل Ti, V, Mo, W, Cr. فهذه العناصر علاوة على نزوعها لاستنفاد نسبة الكربون في الأوستنايت والمارتنساييت فانها تسبب تغييرات اخرى فهي :

أ. تعمل على تصغير الحجم الحبيبي في الأوستنايت لوجودها على هيئة جسيمات كربيد غير قابلة للذوبان في درجات الحرارة المستعملة في التصليد. وبصورة عامة يمكن القول انه كلما ازدادت مكونات الكربيد صلادة ازداد التحسن في المتانة.

ب. تساعد بوجود جسيمات الكربيدات في طور المارتنساييت المستمر على تحسين مقاومة العُد للاحتكاك الميكانيكي.

ج. تساعد جسيمات الكربيدات على تحسين الصلادة الساخنة التي لها أهمية كبيرة في عمليات القطع السريع.

د. تقاوم مكونات الكربيد التلين خلال عملية المراجعة.

هـ. تساعد جميع العناصر المكونة للكربيد والمذابة في الأوستنايت على تحسين قابلية التصليد.

يعد الفولاذ سريع القطع من أهم سبائك فولاذ العُد، وتعد عناصر التتكتستن والمولبدنيوم والفناديون والكوبلت العناصر الأساسية في هذا النوع من الفولاذ التي توفر الصمود ضد الحرارة.

ولغرض تصليد الفولاذ سريع القطع، يسخن الى درجة حرارة 1220 °م تقريباً لكي تذوب الكربيدات الثانوية مما يعطي اوستنايت حاو على كمية كبيرة من V, Mo, W, Cr الأمر الذي يجعل المارتنساييت الناتج بعد التصليد صامداً للحرارة، ولغرض تحاشي نشوء الشقوق عند التسخين حتى درجة حرارة التصليد، تسخن العُد أولاً تسخيناً تمهيدياً عند 800 – 850 °م ولمدة عشر دقائق، وفي أملاح منصهرة مدة أربع دقائق وفي درجة 1050 – 1100 °م ، ولايجوز الإبقاء على درجة حرارة التصليد لفترة زمنية طويلة ويفضل ان تكون المدة هنا من 8-9 ثوان لكل مليمتر من القطر. وعند تبريد الأوستنايت الحاوي على العناصر السبائكية المرتفعة في أي وسط سواء في الزيت أو الأملاح أو الهواء فانه سيستمر بالبقاء حتى النقطة المارتنساييتية Ms ( 180-200 °م )، ومع الاستمرار بالتبريد يتحول

الأوستنايت الى مارتنسايت ( راجع المعاملات الحرارية ) ( 2-11-3-2 ) . وبعد عملية التصليد يراجع الفولاذ عند درجة 560 م° تقريباً الأمر الذي يؤدي الى تحول الأوستنايت المتبقي الى مارتنسايت الشكل ( 2- 41 ) ويكون ذلك مصحوباً بزيادة في الصلادة، وفي اثناء فترة الإبقاء عند درجة حرارة المراجعة ستفصل كربيدات من الأوستنايت المتبقي مما يؤدي الى تقليل نسبة العناصر فيه، لذا وفي اثناء التبريد التالي ( عند درجات حرارة أقل من 150 م° ) سيتحول الأوستنايت المتبقي الى مارتنسايت. وخلال عملية المراجعة التي تجري لمرة واحدة سيتحول جزء من الأوستنايت المتبقي الى المارتنسايت، لذا يعمد الى تكرار عملية المراجعة عند درجة 560 م° لضمان تحول الأوستنايت المتبقي كله الى المارتنسايت، وتستغرق كل عملية من عمليات المراجعة من 45 الى 60 دقيقة.

## 5. الفولاذ المغناطيسي:-

وهو على نوعين:

### أ. فولاذ مغناطيسي مؤقت (Soft Magnet-Steel) :-

وهو الفولاذ المستعمل في معدات ومكائن التيار المتناوب اذ تزول الخاصية المغناطيسية حال زوال المجال المغناطيسي ولا يحتفظ الفولاذ إلا بقدر قليل جداً من المغناطيسية. ان اقدم السبائك التي استخدمت في هذا المجال الحديد الطري، ثم ظهرت بعد ذلك سبائك الحديد - السليكون المحتوية على 4.5% سليكون والتي تصنع على شكل ألواح تستخدم في قلب المحلول الكهربائي، ويفضل استخدام السليكون لكونه فاعلاً في زيادة المقاومة الكهربائية، وقد تحقق نجاح كبير في التحكم في اتجاهية الحبيبات في الحديد السليكوني بحيث يمكن الحصول على أحسن أداء مغناطيسي.

### ب. فولاذ مغناطيسي دائم (Permanent magnet-Steel) :-

وتستخدم مثل هذه السبائك في صناعة المغناط الدائمة، ويعد الفولاذ الكربوني الحاوي على 1% كربون من أقدم السبائك التي استخدمت في صناعة المغناط الدائمة، ثم أعقبها استخدام فولاذ التتستن الحاوي على 6% تتستن، وفولاذ الكروم الحاوي على 6.3% كروم، ومن ثم اخترعت مجموعة من السبائك تحتوي على نسب عالية من الكوبلت ولها خواص مغناطيسية جيدة، ثم دخل تطور سبائك المغناطيس الدائم عصراً جديداً عندما اخترعت سبائك تحتوي على النيكل والألمنيوم والحديد التي تسمى تجارياً ( Alni )، ثم طورت هذه السبائك باضافة عناصر اخرى مثل الكوبلت والنحاس وسميت بأسم النيكو ( Alinico ) التي تتميز بخواصها الاتجاهية. وتعد سبائك الكولماكس Columax من أكثر أنواع السبائك المغناطيسية الدائمة توفراً، اذ تعمل في اثناء عملية الصب على ان يكون اتجاه حبيباتها الطولية هو اتجاه محور المغناطيسية المفضل نفسه مما يعطي قيمة كبيرة لنفاذية المغناطيسية.

### 2-3-10-3 ثالثاً: تصنيف الفولاذ السبائكي حسب البنية المجهرية :-

وهو على ستة أنواع هي :

1. النوع البيرلايتي.
2. النوع المارتنسايت.
3. النوع الاوستنيتي.

4. النوع الكاربيدي.
5. النوع الليديبوريتي.
6. النوع الفيراييتي.

#### **4-10-2 تسمية الفولاذ :-**

وضعت جمعية مهندسي المحركات SAE و المعهد الأمريكي للحديد والفولاذ AISI سلسلة من المواصفات تغطي بعض أنواع الفولاذ السبائكي جدول ( 2-2 ) ويشار الى هذه الأنواع من الفولاذ بالأعداد، فيشير الرقم الأول من اليسار الى نوع السبيكة ويشير الرقم الثاني الى نسبة العنصر الرئيسي المضاف أما الرقمان الأخيران فانهما يشيران الى نسبة الكربون الموجودة في الفولاذ حيث تمثل القيمة الواحدة 0.01% كربون، اما الاعداد التي تشير الى نوع الفولاذ فهي كما يلي:

Cr-V	:6	C	:1
W	:7	Ni	:2
Ni-Cr-Mo	:8	Ni-Cr	:3
Si-Mo	:9	Mo	:4
		Cr	:5

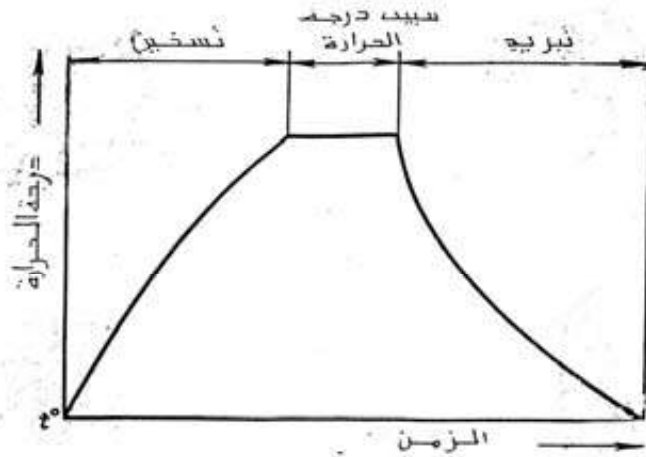
فالرقم SAE 1020 مثلا يشير الرقم (( 1 )) الى الفولاذ الكاربوني الذي يحتوي على نسبة من الكربون ما بين 0.15 الى 0.25%. والرقم SAE 2340 يشير الرقم (( 2 )) الى فولاذ نيكل الذي يحتوي على قيم 3% نيكل تتراوح ما بين 2.75 و 3.25% نيكل ونسبة الكربون ما بين 0.35 الى 0.45%.

#### **11-2 المعاملة الحرارية للمعادن (Heat Treatment of Metal) :-**

وهي المعاملة التي تجرى على المعادن لاجداث تغيير في خواصها الميكانيكية والفيزيائية ومن خلال التحكم بالتأثير الحراري عليها. وهناك أربع من هذه المعاملات:

1. التلدين **Annealing**.
  2. المعادلة **Normalising**.
  3. التصليد **Hardening**.
  4. المراجعة والتطبيع **Tempering**.
- ويمكن اجمال خطوات المعاملة الحرارية بصورة عامة بالخطوات الآتية:
- أ. رفع درجة حرارة المعدن او السبيكة الى درجة حرارة معينة بمعدل تسخين معين.
  - ب. ابقاء درجة الحرارة ثابتة لفترة زمنية محدودة كافية للحصول على التجانس الحراري والتغيير المطلوب بالنسبة للأطوار او الخواص.
  - ج. التبريد بمعدل تبريد معين ( بالفرن، بالهواء، بالماء او الزيت ) والشكل ( 2-43 ) يوضح هذه الخطوات.





الشكل ( 2-43 ) رسم تخطيطي للمعاملة الحرارية

ولغرض تحقيق هذه الخطوات لابد من السيطرة على كل من درجة الحرارة والزمن وجو الفرن.

وسنستخدم في شرح المعاملات الحرارية للفولاذ الرموز الآتية:

$AC_1$  ونعني بها درجة الحرارة الحرجة الدنيا وهي درجة تحول البيرلايت الى اوستنايت.

$AC_2$  تعني درجة الحرارة الحرجة التي يفقد عندها الفولاذ الخواص المغناطيسية.

$AC_3$  درجة الحرارة الحرجة العليا التي ينتهي عندها تحول الفيرريت الى الأوستنايت.

$AC_m$  درجة حرارة انتهاء ذوبان السمنتايت الثانوي في الأوستنايت.

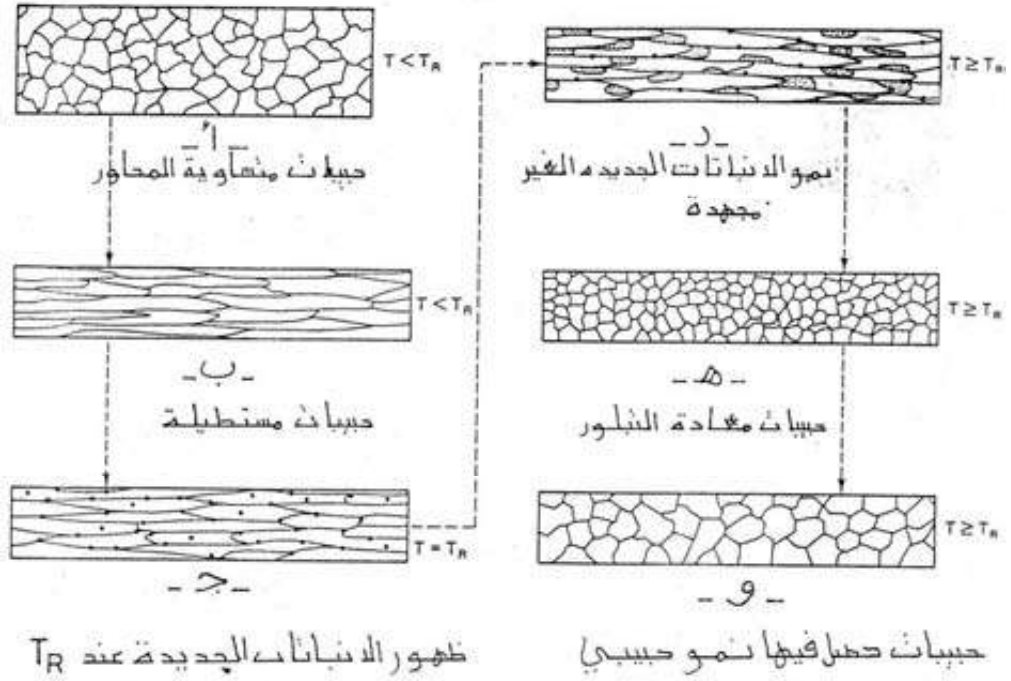
$AC_4$  درجة الحرارة الحرجة التي عندها يتحول الأوستنايت الى حديد دلتا ويرمز الحرف C

الى التسخين بينما يرمز الحرف r مثل (  $Ar_1$  ,  $Ar_3$  ,  $A_{rm}$  ) الى التبريد. ان قيم AC تكون

عادة اعلى من قيم Ar ويزداد هذا الفرق بزيادة معدلات التسخين والتبريد.

## 2-11-1 التلدين في المعادن:-

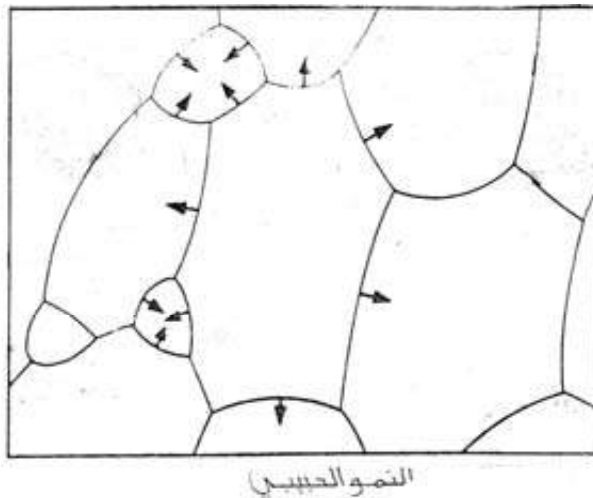
ان الغرض الأساسي من التلدين التخلص من عدم الاستقرار الذي ينجم عن التصليد في اثناء التشكيل اللدن او في اثناء عملية السباكة لذا يتطلب الأمر تسخين المعدن او السبيكة المشكلة الى درجة من الحرارة تعادل (  $T_m 0.3$  ) (  $T_m$  هي الدرجة المطلقة لانصهار المعدن ) ، ولا تغير هذه الدرجة من شكل وأبعاد الحبيبات المشكلة الا انها كافية لاحداث تغيير في خواص المعدن نتيجة توزيع الأنخلاعات في مجموعات او الفناء المتبادل للأنخلاعات المختلفة الإشارة وعند رفع درجة الحرارة الى قيمة تعادل (  $T_m 0.4$  ) يلاحظ ظهور انبثاقات جديدة في مناطق الحدود البلورية التي تنمو وتكبر مع زيادة الفترة الزمنية حتى تصبح حبيبات متساوية المحاور الى حد ما شكل ( 2-44 ) تختلف تماماً عن الحبيبات القديمة المستطيلة والمشوهة لا من حيث الشكل فقط بل وايضاً باكتسابها بنية داخلية اكثر اكتمالاً وكذلك بانخفاض تركيز العيوب البلورية فيها ( من  $10^{12}$  / سم<sup>2</sup> الى  $10^8$  / سم<sup>2</sup> ) ويطلق على هذه العملية اعادة التبلور Recrystallization، وان القوة المحركة لاعادة التبلور تكمن في الطاقة المخزونة في انحرافات النسق البلوري للحبيبات المشكلة والتي تتحرر بالتسخين الأمر الذي يؤدي الى



شكل ( 2-44 ) يمثل اعادة التبلور و النمو الحبيبي في المعادن

الأنخفاض في الطاقة الحرة، وتنتهي عملية اعادة التبلور عندما تختفي الحبيبات المشكلة نهائياً فهي تبدأ بالتضخم بنمو الحبيبة الواحدة على حساب الحبيبة الأخرى وانتقال بعض الذرات او مجموعة منها عبر الحدود الفاصلة من الحبيبة المتضائلة الى الحبيبة النامية مما يؤدي الى انتقال الحدود الفاصلة تدريجياً باتجاه الحبيبة المتضائلة، وعادة ما تنمو الحبيبات ذات الحدود المقعرة على حساب الحبيبات ذات الحدود المحدبة أي ان الحدود تنتقل باتجاه مركز تقعرها

شكل ( 2-45 )

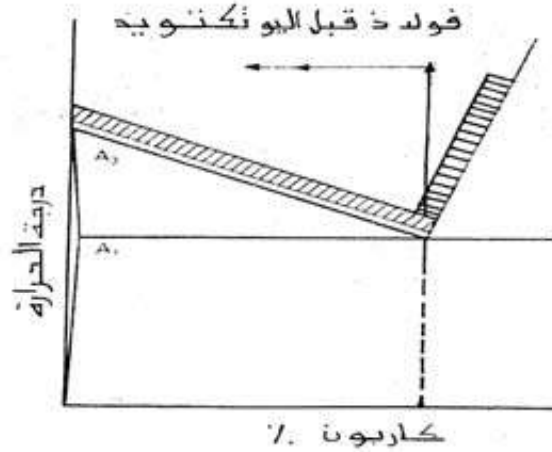


شكل ( 2-45 ) تنتقل الحدود الحبيبية نحو مركز التقعر فتلاشي الحبيبات الصغيرة

وتسمى هذه العملية النمو الحبيبي ( Grain Growth )، وتكمن القوة المحركة لهذه العملية في تقليل الطاقة السطحية للحبيبات.

### 2-11-2 المعادلة ( Normalizing ) -:

تعد المعادلة عملية وسطية بين التلدين و التصليد ،و تتم برفع درجة حرارة الفولاذ قبل اليوتكتويدي و اليوتكتويدي الى فوق درجة الحرارة الحرجة العليا  $AC_3$  والانتظار لفترة زمنية مناسبة تعتمد بالدرجة الاولى على سمك العينة ، ثم التبريد في الهواء الساكن الذي يعد معدلا وسطيا بين التبريد داخل الفرن المغلق و بين التبريد في الماء شكل (2-53)

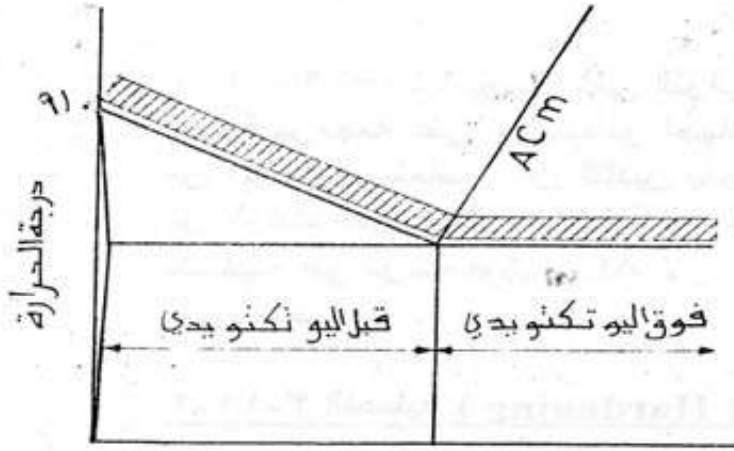


الشكل (2-53) معادلة الفولاذ متوسط - عالي الكربون

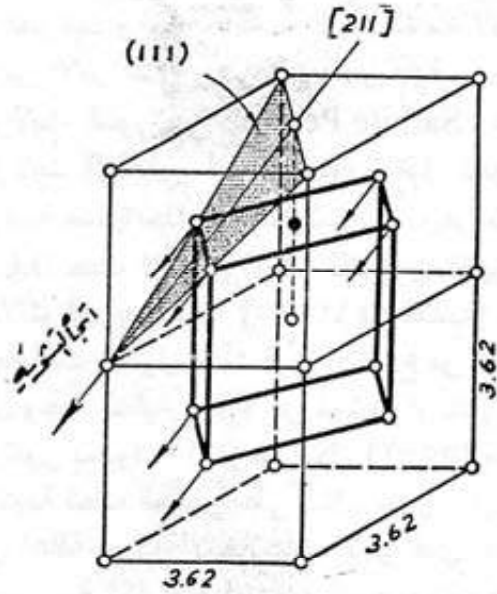
و يساعد التبريد في الهواء على تكون بنية من البيرلايت الناعم و الفيرلايت بحبيبات صغيرة ، وهي بنية تتصف بصلادة عالية مقارنة مع البنية الملدنة .ومثال على ذلك ،تقدر صلادة انواع الفولاذ المحتوية على 0.2% ، 0.45% ، 0.8% من الكربون بعد عملية التلدين بحوالي 120،160،180 برينل HB على التوالي ،وبعد عملية المعادلة تقدر بحوالي 130-190-240 برينل على التوالي .

### 3-11-2 التصليد ( Hardening ) -:

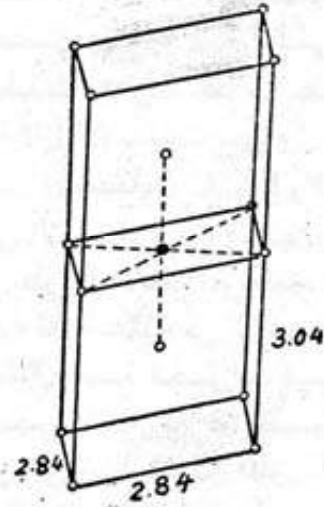
نعني بالتصليد تسخين الفولاذ الى درجة حرارة فوق  $AC_3$  تكون كافية لتكوين اوستنايت متجانس من حيث التركيب الكيماوي ودرجة الحرارة ،ثم ابقائه عند تلك الدرجة لفترة زمنية مناسبة تعتمد على سمك المقطع والتركيب الكيماوي ثم اخماده بعد ذلك باستخدام الماء او الزيت شكل (2-54). اذا تجاوز معدل التبريد قيمة حرجة فان الاوستنايت سيتحول مباشرة الى بنية صلدة جدا هي المارتنسايت .وهو مركب انتقالي بين الاوستنايت F.C.C والفيرلايت B.C.C حيث لاتتمكن ذرات الكربون الكثيرة الموجودة في الاوستنايت من الهروب عند معدلات التبريد العالية (1000م في الثانية) مثل ما يحصل بطريقة الاخمداء في الماء ، فيتكون نتيجة ذلك محلول جامد فوق الاشباع من حديد الفا مذابة فيه نسبة عالية من الكربون ،ويكون شكل وحدة الخلية عبارة عن موشور رباعي تزداد فيه الاطوال مع انحراف في زوايا الموشور بحدود 60 درجة شكل (2-55).



الشكل ( 2-54 ) التصليد للفولاذ الكربوني



الـ اوسنايت - الفيراييت  
( وحدة خلية مكعب )



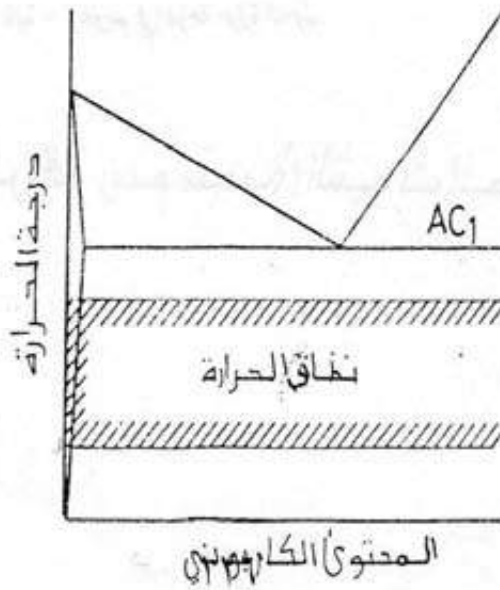
المارتنسايت  
( وحدة خلية موشور رباعي )

الشكل ( 2-55 )

مع زيادة في الحجم بحدود 1% ، وتظهر البنية المتكونة تحت المجهر على شكل ابري . ان التشوه الحاصل في شكل الشبكة البلورية يعمل على اعاقه حركة الانخلاعات الامر الذي يؤدي الى زيادة الصلادة و تقليل المطيلية ، وكلما زادت نسبة الكربون في المارتنسايت كان التشوه في الشبكة البلورية اكبر مع زيادة في الصلادة .

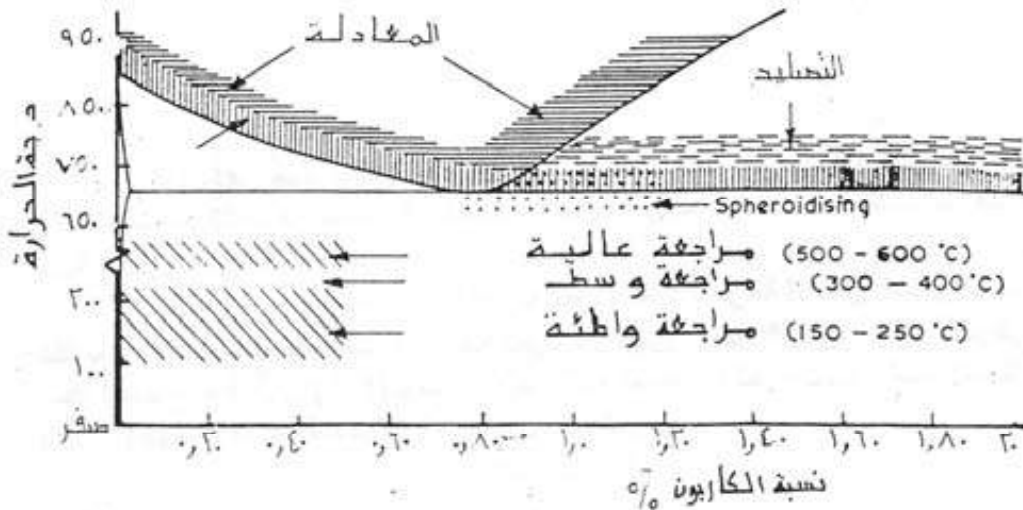
## 4-11-2 المراجعة ( Tempering ) :-

تؤدي عملية التصليد في معظم الحالات الى نشوء محلول مفرط في التشبع غير مستقر , لذا يعمد الى اجراء عملية المراجعة , وهي عملية تتضمن تسخين الفولاذ المصلد حتى درجات حرارة (200-600م) شكل (2-60) , حيث يتوفر عندها الظروف اللازم لاعادة توزيع المركبات الذائبة بالانتشار , لذا يعد التسخين عند المراجعة عامل اساسي في ازالة معظم الاجهادات الداخلية ولتسريع العمليات الانتشارية لتفكيك المحلول الجامد وبالتالي الحصول على محلول جامد متزن لتزداد عند ذلك المتانة دون ان تتأثر الصلادة ومقاومة الاحتكاك , وتجدر الاشارة هنا الى ان سرعة التسخين وسرعة التبريد لا تلعبان دوراً مهماً في عملية المراجعة .



الشكل (2-60) المراجعة في الفولاذ الكربوني

يلاحظ مما سبق ان المعاملات الحرارية للفولاذ تعتمد بالدرجة الاساس على نسبة الكربون , نسبة العناصر المضافة , درجة الحرارة , الزمن , معدل التسخين , معدل التبريد , سـمـك الانمـوذج , امـا الشكل (2-61) فيوضح مواقع المعاملات الحرارية للفولاذ الكربوني .



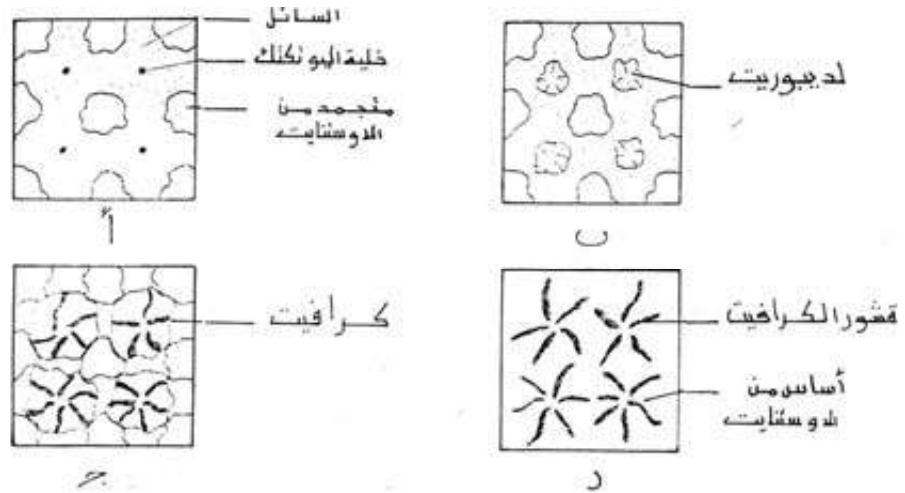
الشكل (2-61) توزيع درجات الحرارة للمعاملات الحرارية للفولاذ الكربوني

## 12-2 حديد الزهر ( cast Iron ) :-

تسمى سبائك الحديد الحاوية على نسب كربون من 2% الى 6.67% حديد الزهر ، ومن الناحية العملية يحتوي حديد الزهر 2.5% - 4.5% كربون ، لذلك يلعب التفاعل اليوتكتيكي الذي يحدث عند درجة حرارة 1131 م دوراً مهماً في تكوين البنية المجهرية . فعند متابعة تبريد سبيكة من الحديد تحتوي على نسبة 2.5% كربون شكل (2-24) يتبين لنا ان نواة الاوستنايت تتكون عند درجة 1317م ، وعند استمرار التبريد ستزداد كمية الاوستنايت الى ان تصل الدرجة 1131م حيث يتكون المحلول الجامد اليوتكتيكي من السائل المتبقي ، وهو محلول يحتوي على كتل من الاوستنايت في اساس من السمنتايت شكل (2-62) وعند درجة 723م سيتحول الاوستنايت كما معلوم الى البيرلايت وعليه فان البنية النهائية ستكون من جزر كبيرة من البيرلايت زائداً يوتكتي من جزر بيرلايتية في اساس من السمنتايت تدعى الليدبيوريت ، وتتصف هذه البنية بخواص عديدة اهمها الصلادة العالية والمطيلية المنخفضة علاوة على مقاومة الشد المنخفضة نسبياً ، وعليه فان مثل هذه البنية لا تشكل بالحدادة ولا تسحب وتكسب بل تشكل بالسبك . وبصورة عامة يمكن تصنيف حديد الزهر الى ثلاثة انواع هي :

### أ- حديد الزهر قبل اليوتكتك :-

تتراوح نسبة الكربون في هذا النوع من (2 الى 4.3%) ، وتتكون بنيته عند 1131م من بلورات الاوستنايت + الليدبيوريت ، ويمكن تحديد نسبة كل من هذين المكونين بتطبيق قاعدة الذراع .



الشكل (2-62) تبريد حديد الزهر قبل اليوتكتك 2,5% كربون

الشكل (2-62) تبريد حديد الزهر قبل اليوتكتك 2,5% كربون  
 أ- تكون خلايا اليوتكتك  
 ب- نمو اللديبوريت  
 ج- تفاعل يوتكتكي شبه متكامل مع نجوم الكرافيت  
 د- تجمد متكامل مع نجوم الكرافيت في أساس من الأوستنايت

**مثال :-**

حديد زهر يحتوي على 3% كربون تتكون بنيته عند التجمد في درجة 1131م من اللديبوريت  $W_{Led}$  والأوستنايت  $\gamma W$  ، جد النسبة المئوية لهذين المكونين ؟

**الحل :-**

من مخطط الحديد والكربون شكل (2-24) نحصل على :

$$W_{Led} = \frac{2 - 3}{2 - 4.3} \times 100 = 43.5\%$$

$$\gamma W = \frac{3 - 4.3}{2 - 4.3} \times 100 = 56.5\%$$

وعند انخفاض درجة الحرارة من 1131م الى اعلى من 723م فإن قسماً من الأوستنايت سيفرز سمنتايت ثانوي ، وعند درجة 723م سيتكون البيرلايت ، وعندها ستتكون البنية من اللديبوريت والبيرلايت والسمنتايت الثانوي ، ويمكن تحديد نسبة كل منها بتطبيق قاعدة الذراع ، فمثلا تتكون بنية الزهر الحاوي على 3% كربون من 11.3% سمنتايت ثانوي طليق و 45.2% بيرلايت .

## ب- حديد زهر يوتكتك :-

هو حديد يحتوي على 4.3% كاربون ، وتتكون بنية من الليديبوريت لا يوجد فيه طور زائد . فعند درجة حرارة 1131م تتكون البنية من الاوستنايت مع السمنتايت ، وعند 723 م تتكون البنية من البيرلايت مع السمنتايت .

## ج- حديد زهر فوق اليوتكتك :-

ويحتوي على نسبة اعلى من 4.3% وادنى من 6.67% كاربون ، وتتكون بنيته في درجة حرارة 1131م من بلورات من السمنتايت الاولي و الليديبوريت .

## مثال :-

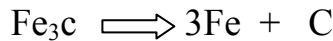
حديد زهر يحتوي على 5% كاربون تتكون بنيته في درجة حرارة 1131م من الليديبوريت والسمنتايت الاولي جد النسبة المئوية لهذين المكونين ؟

## الحل :-

من مخطط الحديد - الكاربون شكل (2-24) نحصل على

$$W_{L_{ed}} = \frac{5 - 6.67}{4.3 - 6.67} * 100 = 70.46 \% \text{ ليديبوريت}$$
$$W_{Fe_3C_1} = \frac{4.3 - 5}{4.3 - 6.67} * 100 = 29.54 \% \text{ سمنتايت اولي}$$

وعند درجة حرارة 723م تتكون بنية الزهر من السمنتايت الاولي والليديبوريت الذي يتكون من السمنتايت الثانوي والسمنتايت البوتكتك والبيرلايت وسيكون السمنتايت الذي يتكون في بنية حديد الزهر غير ثابت ويتحلل عند درجات الحرارة العالية اذا سمح الوقت بذلك واذا ترك ليبرد ببطئ الى عناصره الاساسية وهي الكاربون والحديد وحسب المعادلة الاتية :



فالكاربون الحر المنفصل سيكون بصورة كرافيت متبلور , لذا فان التبريد البطيء يعد من العوامل الاساسية في انفصال الكرافيت الذي يكون على اشكال مختلفة منها الرقائق ومنها الكروي .

وعادة يكون لون المكسر داكناً (رمادي اللون) ويسمى حديد الزهر الرمادي وهو زهر يتصف بالليونة النسبية وله قابلية جيدة للتشغيل بالمكائن .

اما اذا كان الكاربون متحداً على شكل سمنتايت فان حديد الزهر سيكون كما اسلفنا صلباً وهشاً وغير قابل للتشغيل بالمكائن .

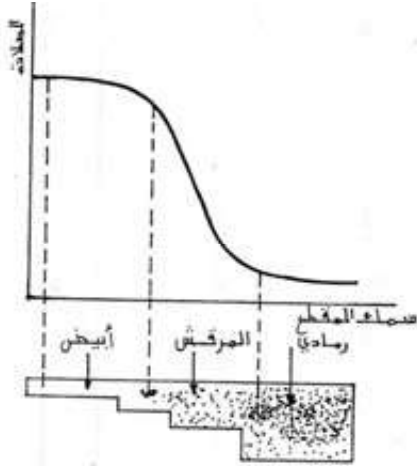
ويكون لون المقطع (المكسر) ابيض لذا يسمى حديد الزهر الابيض . اما اذا تحلل جزء من السمنتايت الى كرافيت فسيظهر على سطح حديد الزهر المكسر بشكل مرقش يسمى بحديد الزهر المرقش Mottled Cast Iron ومما تقدم نستنتج ان صورة الكاربون تحدد نوع حديد الزهر الامر الذي يستدعي دراسة العوامل المؤثرة في صور الكاربون . ومن اهم هذه العوامل هي :

## 1- معدل التبريد :-

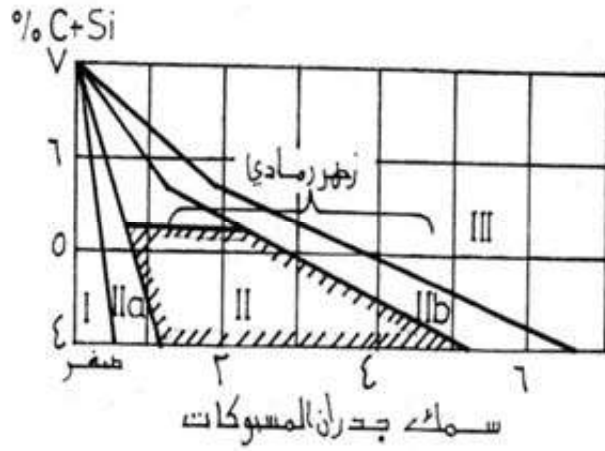
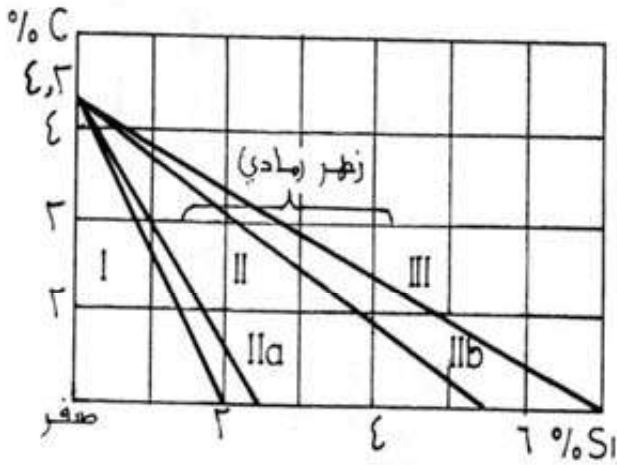
اذا كان معدل التبريد بطيئاً فإنه يؤدي الى تكون الكرافيت وبالتالي تكون حديد الزهر رمادي , اما اذا كان سريعاً فان السمنتايت سيستقر ويتكون بذلك حديد الزهر الابيض . ويعتمد معدل التبريد على نوع مادة القالب وعلى سمك المقطع , فتحوي



المسبوكة على الزهر الابيض اذا كان المقطع رقيقاً , بينما تحتوي على الزهر الرمادي اذا كان المقطع سميكاً والشكلان (2-63) و (2-64ب) يبينان ان الكرافيت يزداد اكمالاً كلما زاد سمك المسبوك أي مع انخفاض معدل التبريد .



الشكل (2-63) تأثير سمك المقطع على عمق التبريد المفاجئ لحديد الزهر الرمادي



المنطقة	البنية
I	P + Led
II	P + G
III	F + G
IIa	P + G + Led
IIb	P + F + G

الشكل (2-64) تأثير نسب C, Si على أنواع حديد الزهر

## 2- العناصر المضافة :-

ان اضافة بعض هذه العناصر مثل الفيروسليكون في منصهر الحديد يساعد على تكون الكرافيت وبالتالي تكون الزهر الرمادي , واذا ترك السائل يتجمد من دون أي اضافة فإن السمنتايت سيتكون وبالتالي نحصل على الزهر الابيض .

## 3- التركيب الكيميائي :-

توجد مع حديد الزهر خمسة عناصر اساسية هي الكربون والمنغنيز والسليكون والكبريت والفسفور .

فالكربون يزيد من كمية الكرافيت ويخفض من نقطة الانصهار , ويساعد السليكون على تكون الكرافيت وبالتالي تكون حديد الزهر الرمادي , ويوجد هذا

العنصر بنسبة تتراوح ما بين 1% و 3% ، والشكل (2-64-أ) يوضح العلاقة بين الكربون والسليكون وتأثيرهما في بنية حديد الزهر ، حيث يلاحظ ان زيادة نسبة الكربون في حديد الزهر تقلل الحاجة الى السليكون للحصول على البنية المطلوبة . ويعمل المنغنيز بشكل مباشر على تكوين الكربيدات وخاصة  $Mn_3C$  مما يساعد على تكون الزهر الابيض . ويكون للمنغنيز هذا التأثير فقط عندما تكون كميته اعلى من الكمية اللازمة للاتحاد مع الكبريت وهي :

$\frac{1}{1.72} = \frac{S}{Mn}$  اذ يوجد بنسبة تتراوح ما بين 0.4% و 1% . اما الكبريت فإنه يوجد عادة في حديد الزهر بنسبة تتراوح ما بين 0.1% و 0.35% ويكون على شكل كبريتيد الحديد FeS اذ يكون بوتكتك ثنائي سهل الانصهار مع الحديد { درجة انصهاره 985م° } ويوجد هذا اليوتكتك بين البلورات الامر الذي يؤدي الى الانكسار السهل في درجات الحرارة العالية .

ان وجود الكبريت في حديد الزهر سيؤخر تكون الكرافيت مما يجعل الزهر المسبوك ابيضاً . اما اذا وجد مترافقاً مع المنغنيز فإنه سيتحول الى كبريتيد المنغنيز MnS , وليس لهذا المركب تأثير ضار في الزهر مثل تأثير FeS . اما العنصر الأخير وهو الفسفور فإن النسبة المسموحة لوجوده في المسبوكات يكون ما بين 0.1% و 0.3% واذا زادت على هذا الحد , ستظهر بنية من اليوتكتك تتكون من  $Fe + Fe_3C + Fe_3P$  وهي بنية سهلة الانصهار والسيولة الامر الذي يساعد على ملئ تجويف القالب عند السباكة .

#### 4- المعاملة الحرارية :-

تساعد عمليات المعاملة الحرارية كالتلدين على تكوين الكرافيت من مسبوكات حديد الزهر الابيض كما في صناعة حديد الزهر الطروق .  
ان الفرق بين حديد الزهر الابيض والرمادي ممكن ملاحظته من الجدول (2-4)

انواع حديد الزهر :-

#### 2-12-1- حديد الزهر الرمادي :-

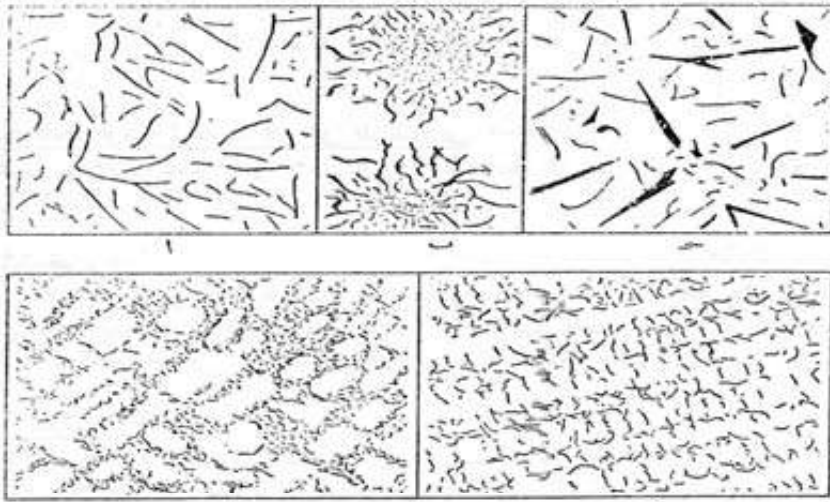
يتميز هذا النوع بوجود كمية كبيرة من الكربون الحر على شكل قشور من الكرافيت الذي يشغل من 6-10% من حجم حديد الزهر الرمادي . ويمتاز هذا النوع من الزهر بسهولة التحضير ورخص الثمن , ومن اهم خواصه الميكانيكية سهولة تشغيله ومقاومته لدرجات الحرارة والكهربائية والصداء والتأكسد , وتتراوح صلابته ما بين 180 و 240 برينل ومقاومته للتشد بحدود 200 نيوتن /مم<sup>2</sup> .

الحديد الزهر الرمادي	الحديد الزهر الأبيض	
كربون حر ، (كرافيت)	متحد ، كسمتايت	الشكل الذي يوجد فيه الكربون
نسبة السليكون عالية . نسبة الكبريت واطنة .	نسبة السليكون واطنة . نسبة الكبريت عالية .	التركيب الكيميائي
بطيء .	سريع	معدل التبريد في قالب الصب
طري نسبياً وقابل للتشغيل صلادته برينيل (١٨٠ - ٢٤٠)	صلد وهش وغير قابل للتشغيل ، صلالده برينيل (٤٠٠ - ٥٠٠)	الخواص
قوالب الصبات (Ingot mould) ، اسطوانات ومكابس وسائط نقل ، مصوبات المكائن ، أنايب الماء الرئيسية .	نصال الحاريت (ploughshares) ، الدرافيل المصلدة (chilled rolls) ، الكرات (Balls) القوالب والصفائح المقاومة لللى (Wear) ، صناعة الحديد الزهر الطروق	الاستعمالات النموذجية

### جدول (٣-٤) الحديد الزهر الأبيض والرمادي

#### تأثير شكل الكرافيت في خواص حديد الزهر الرمادي :-

تعتمد الخواص الميكانيكية لحديد الزهر الرمادي بصورة عامة على شكل قشور الكرافيت وحجمها ويمكن تقسيم شكل الكرافيت الى خمسة انواع رئيسة كما موضح في الشكل (2-65) مع اتجاه



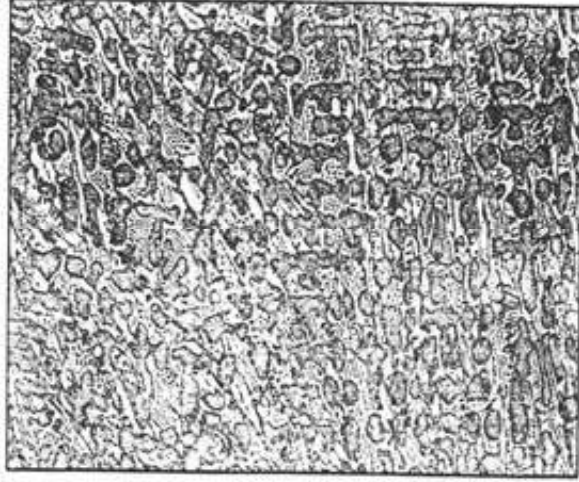
الشكل (2-65) يبين نوع قشور الكرافيت

- أ- توزيع منتظم و اتجاه جزافي
- ب- تجمعات كالورد و اتجاه جزافي
- ج- قشور بمقاسات فوق بعضها مع اتجاه جزافي
- د- عزل داخل التكوين الشجيري مع اتجاه جزافي
- هـ- عزل داخل التكوين الشجيري مع اتجاه مفضل

## 2-12-2- حديد الزهر الابيض :-

يتميز هذا النوع من الحديد بأحتوائه على الكربون متحداً على شكل سمنايت  $Fe_3C$

شكل (2 - 66)



الشكل (2-66) حديد زهر ابيض

وبلونه الأبيض وبصلادته العالية التي تبلغ 400 - 500 برينل وبعدم قابليته على التشغيل بالقطع , لذا فهو محدود الاستخدام . ويصل حجم السمنايت الموجود في هذا الزهر الى 15 مرة من وزنه , فالزهر الأبيض الحاوي على 2.5% كربون يحتوي على 37.5% سمنايت , ولهذا تظهر في هذا النوع من الحديد خاصيتا القصفة والصلادة العاليتين . ويمكن انتاج هذا النوع بطريقتين ,

تعتمد الاولى على تبريد المسبوك بسرعة عالية تكون كافية لمنع تحلل الكربون , وتعتمد الثانية على الضبط المناسب للتركيب الكيميائي . ان المسبوكات التي تحتوي على مقاطع حادة او رفيعة او رقيقة لها نيل كبير للتحويل الى حديد زهر ابيض , بينما المسبوكات ذات المقاطع السميكة تميل للتحويل الى حديد زهر رمادي وذلك بسبب سرعة فقدانها للحرارة . اما عن اهمية حديد الزهر الأبيض الأساسية فهي تكمن في صناعة حديد الزهر الطروق .

## 2-12-3- حديد الزهر المرقش Mottled - Cast Iron :-

قد يتحول الجزء الخارجي للمسبوك الى حديد زهر ابيض في ظروف معينة , بينما يتحول الجزء الداخلي الى حديد زهر رمادي , وتتكون منطقة الانتقال بين هاتين المنطقتين من بنية مكونة من البيرلايت وكرافيت شرائحي بنسب متباينة كما في الشكل (2-67) .

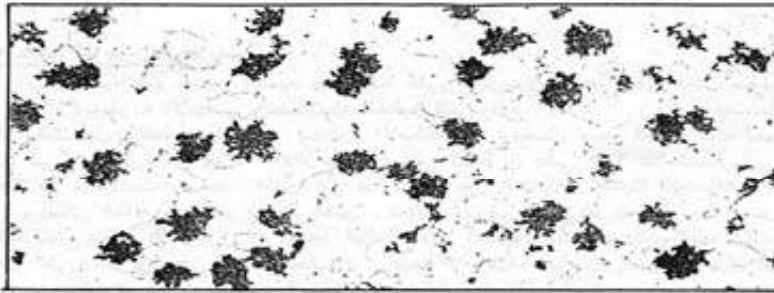
## 2-12-4- حديد الزهر الطروق Malleable Cast Iron :-

يصنع هذا النوع من الحديد عن طريق تليدين حديد الزهر الابيض بعد التحكم جيداً بطريقة تبريده . وتتم هذه العملية بتسخين الزهر الابيض ببطئ الى درجة 950م° والانتظار لفترة زمنية هي بحدود (10) ساعات , بعدها تخفض درجة الحرارة بمعدل 8 - 10 درجات لكل ساعة حتى تصل الى 690م° , ثم يبرد بالهواء الى درجة حرارة الغرفة . ان التسخين الى درجة 950م° يعني تحول البيرلايت الموجود في الزهر الابيض الى اوستينايت يذوب بدوره جزءاً من السمنايت , وبعد انقضاء فترة قصيرة عند هذه الدرجة , نجد ان قسماً من الاوستينايت قد وصل حد التشبع بالكربون ويبقى في حالة اتزان مع السمنايت الذي يحتوي

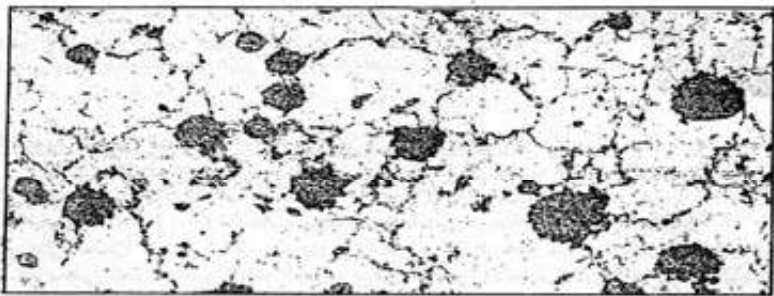
على 6.67% كاربون ، وبالاحتفاظ بالمسبوكة مدة اطول نجد ان السمنتايت سيبدأ بالتحلل الى حديد و كرافيت ، ويترسب الكرافيت الناتج من التحلل على شكل انبثاتات تنمو بمعدلات منتظمة وفي جميع الاتجاهات ، لتبدو في النهاية على شكل عقد او كرات غير منتظمة كما في الشكل (2-68)



الشكل (2-67) حديد زهر مرقش



- 1 -



- 2 -

الشكل (2-68) حديد زهر طروق  
أ- ذى قلب أسود (فيراتى)  
ب- ذى قلب ابيض (بيرلايتى)

وتعد عملية التحلل هذه بطيئة نسبياً إذ تحتاج الى وقت طويل هو بحدود 24 ساعة او اكثر , وبذلك تستغرق عملية تحويل الزهر الابيض الى الزهر الطروق 100 ساعة تقريباً , وهذا احدى مساوئ هذا النوع من الزهر , فضلاً عن عدم امكانية صنع مقاطع كبيرة منه . ومن صفات هذا النوع مقاومته العالية للصدمة مما ادى الى استخدامه في صناعة الطائرات والسيارات وعربات النقل والمعدات الزراعية وفي صناعة بعض المواد الانشائية الصغيرة . وحديد الزهر الطروق نوعان هما :

### 1. حديد الزهر الطروق الفيراييتي ( اسود القلب ) :-

وينتج بتلدين الزهر الابيض من درجة 950م° ومن ثم التبريد البطيء وكما ذكرنا انفاً .

وبهذه العملية يتحلل السمنتايت الى ارضية من الفيراييت (ذات لون اسود ) موزع عليها بعض البقع (العقد ) من تجمعات نجمية الشكل من الكرافيت كما في الشكل (2-68-أ ) ومن خواص هذا الزهر ليوثته النسبية , إذ تصل النسبة المئوية للاستطالة من 12-18% , وصلادته من 110 - 120 برينل , ومقاومة الشد من 340 - 390 نيوتن /مم<sup>2</sup>

### 2. حديد الزهر الطروق البيرلاييتي (ابيض القلب ) :-

وينتج بتبريد حديد الزهر الابيض من درجة 1050م° تبريداً سريعاً نسبياً مقارنة مع الزهر الطروق اسود القلب , إذ سيتحلل السمنتايت الى بيرلاييت كأرضية (ذات لون ابيض ) موزع عليها بعض التجمعات النجمية من الكرافيت كما في الشكل (2-68-ب) , لذلك يأخذ هذا الزهر طابع الهشاشة ويمتاز بصعوبة التشغيل . ومن مميزات هذا النوع ايضاً ارتفاع صلادته إذ تصل الى ما بين 170-270 برينل , وارتفاع مقاومة الشد لتصل الى ما بين 430 - 770 نيوتن /مم<sup>2</sup> , وانخفاض النسبة المئوية للاستطالة لتصل الى ما بين 2-10 % فقط .

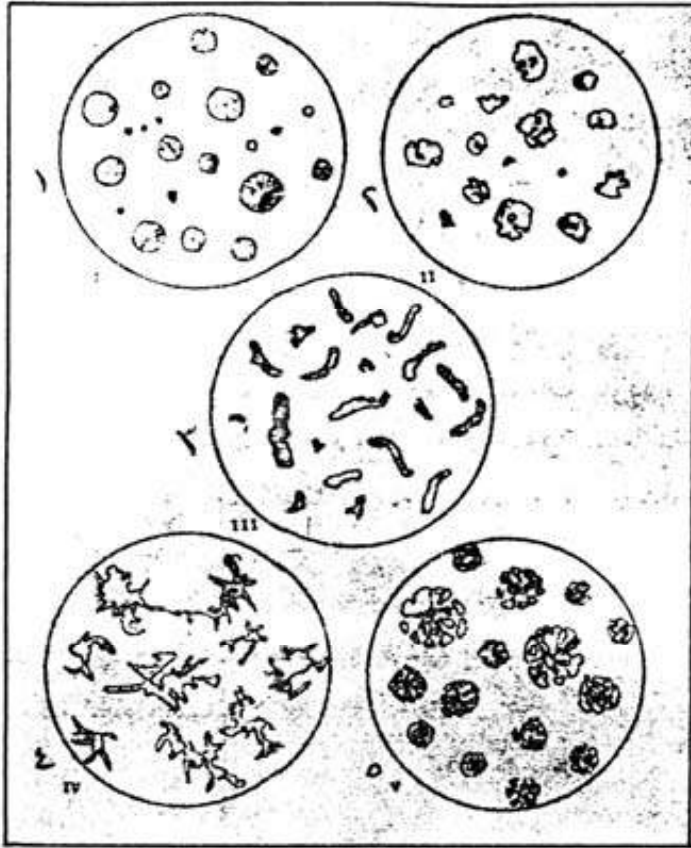
### 5-12-2- حديد الزهر الكروي :-

يمكن الحصول على هذا النوع من الزهر بأضافة السيريوم  $Cr_{58}$  الى منصهر حديد الزهر الرمادي , يقوم هذا العنصر بأزالة وفصله الكبريت مع ترك نسبة 0.02% سيريوم كمتبقي في المنصهر ليعمل على تكوير الكرافيت. ويفضل كذلك استخدام المغنيسيوم بنسبة 0.03-0.07% لرخص ثمنه , ولما كان هذا العنصر يتطاير عند درجة حرارة اقل من درجة حرارة صب الحديد , فإنه يتسابق مع النحاس او النيكل لتجنب ظروف الانفجار , ويترك المنصهر المتسابق عقب اضافة المغنيسيوم فترة قصيرة حتى يتم التفاعل , ويضاف الفيروسليكون بعد صب المعدن لأبطال مفعول هذا العنصر في تكوين الكريبيد. وتتشابه عموماً مميزات حديد الزهر الكروي مع مميزات حديد الزهر الرمادي من ناحية انخفاض درجة الانصهار وارتفاع السيولة وسهولة السبك والتشغيل وارتفاع مقاومة البلى . اما الاختلاف الرئيسي بينهما فهو ان الكربون من النوع الكروي يكون على هيئة كرات بدلاً من رقائق كما هو الحال في النوع الرمادي .

### تأثير شكل الكرافيت في حديد الزهر الكروي :-

ذكرنا ان شكل الكرافيت في هذا النوع هو كروي , الا انه وفي الأنواع غير الجيدة منه توجد أشكال أخرى وكما موضح في الشكل (2-69) اما الأشكال الأخرى فأن لها

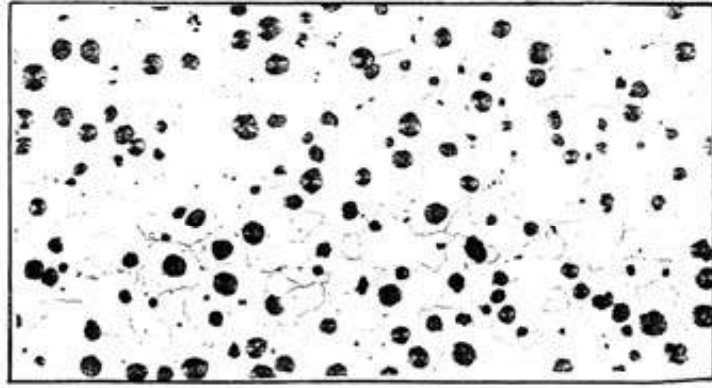
- تأثيراً سيئاً في هذه الخواص . ويمكن تحديد خمسة نقاط اساسية تؤثر في شكل الكرافيت في هذا النوع من حديد الزهر وهي :
- أ- درجة الحرارة.
  - ب-مقطع المسبوك.
  - ج- التطعيم المبدئي.
  - د - كمية المغنيسيوم المضافة.
  - هـ- تركيب حديد الزهر المستخدم.



الشكل (2-69) انواع الكرافيت في حديد الزهر الكروي

ويعد الانموذج (1) من الاكثر قبولاً لان هذا الشكل يمنح الزهر خواصاً ميكانيكية جيدة ,





الشكل (2-70) حديد الزهر الكروي مفضل

## 6-12-2 أنواع حديد الزهر حسب البنية المجهرية :-

يمكن تقسيم حديد الزهر حسب البنية المجهرية الناتجة بفعل معدلات التبريد المختلفة وكما يلي :-

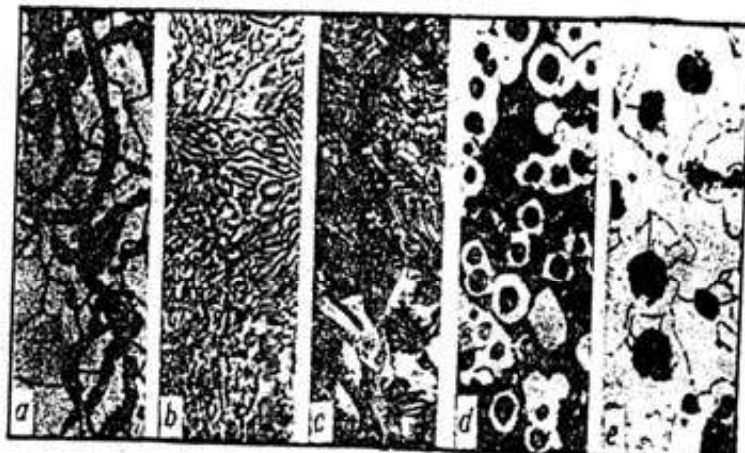
أ- حديد زهر بيرلايت + سمنايت (P+led) وهو زهر خال من الكرافيت وينتج من التبريد العنيف للزهر الأبيض

ب- حديد زهر بيرلايت + سمنايت + كرافيت (P+led+G) وهو يحتوي على 17% من الكرافيت وتكون حاشيته من البيرلايت ، وينتج من التبريد المعتدل ، ويسمى هذا الزهر ( الزهر المرقش ) .

ج- حديد زهر بيرلايت + كرافيت (P+G) وهو يحتوي على نسبة ما بين 20 و30% من الكرافيت ، وينتج من التبريد المعتدل ، ويعرف بالزهر المرتفع المقاومة الميكانيكية .

د - حديد زهر بيرلايت + فيرايت + كرافيت (P+F+G) وهو يحتوي على نسبة من 30-90% كرافيت وينتج من التبريد البطيء . ويعرف بالزهر الرمادي .

هـ - حديد زهر فيرايت + كرافيت (F+G) وهو زهر خال من السمنايت ، لذا فهو يمتاز بليونته ومقاومته الميكانيكية المنخفضة ، وينتج هذا الزهر من التبريد البطيء جداً ، وتظهر بنيته على شكل حبيبات مفتوحة وقشور كبيرة من كرافيت والشكل ( 2-71 ) يوضح أشكال هذه الأنواع



الشكل (2-71) البنية المكروسكوبية لحديد الزهر

## 13-2 السبائك غير الحديدية :-

لمجموعة المعادن والسبائك غير الحديدية مكانتها الهامة في المجالات الإنشائية الهندسية لما تتمتع به من خواص فيزيائية واسعة لا تتوفر في سبائك الحديد وأن معظم هذه السبائك مصنوعة من عنصرين أو أكثر من العناصر الآتية : النحاس ، الألمنيوم ، الرصاص ، القصدير ، الخارصين. غالباً ما تضاف عناصر أخرى الى سبائك هذه المجموعة بغية الحصول على خواص ميكانيكية معينة .

### 1-13-2 النحاس وسبائكه :-

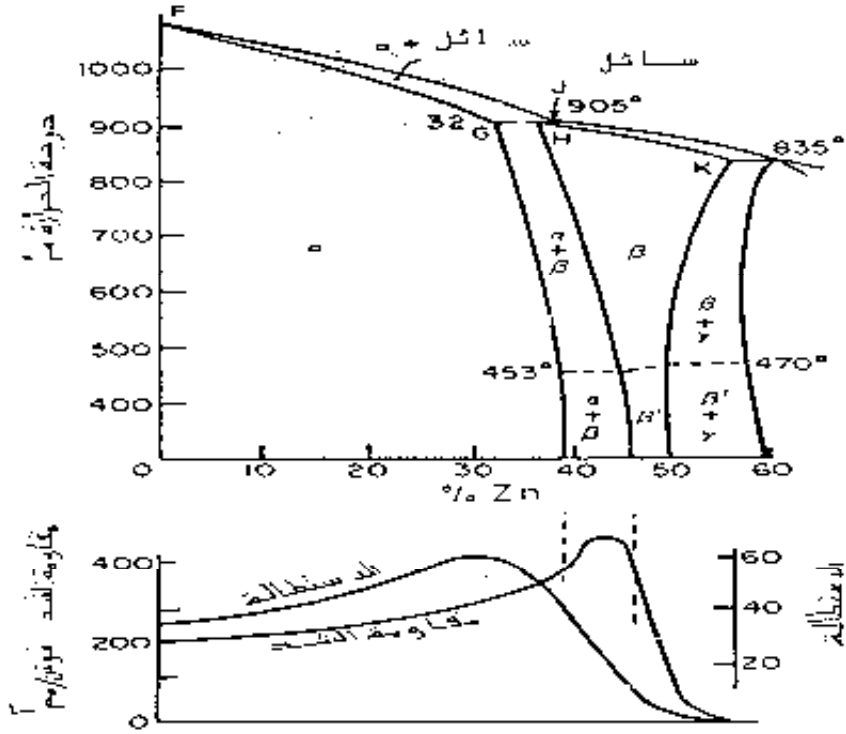
ويمكن تصنيف سبائك النحاس الشائعة الى ما يأتي :

- أ. سبائك النحاس - الخارصين (النحاس الاصفر Brasses).
- ب. سبائك النحاس - القصدير (البرونز القصديري Tin Bronzes).
- ج. سبائك النحاس - الألمنيوم (البرونز الألمنيوم Aluminium Bronzes).
- د. سبائك النحاس - البريليوم (Beryllium Bronzes).
- هـ. سبائك النحاس - النيكل (كوبرو نيكل Copro-Nickel).

ان لكل من هذه السبائك مخططات توازن حرارية معقدة لكنها تشترك وبصورة عامة في وجود ذوبانية مناسبة في الحالة الصلبة تتبعها اطوار وسطية . فالمحلول الجامد الذي يتكون في النسب الواطئة من العناصر المضافة عبارة عن الطور ( $\alpha$ ) الفا الذي يمتاز بالليوننة والمطيلية العاليتين . وذرات هذا الطور تترتب بشبكة بلورية من نوع F.C.C . أما المحلول الجامد المتكون عند زيادة نسب العناصر المضافة عن حد الذوبان في الحالة الصلبة ، فهو الطور بيتا ( $\beta$ ) الذي تترتب ذراته بشبكة بلورية من نوع B.C.C ويمتاز بالمقاومة المرتفعة والمطيلية المنخفضة . ولا تشكل هذه السبائك على البارد بسهولة بينما تكون ملائمة للتشكيل على الساخن أما إذا زادت نسب العناصر المضافة على نسب معينة فإنه سينتج طوران هما كما ( $\gamma$ ) والدلتا ( $\delta$ ) وهما طوران صلدان وهشان معاً .

### أ. سبائك النحاس - الخارصين (النحاس الأصفر) :-

من مخطط التوازن الطوري للنحاس - الخارصين شكل ( 2-72 ) يتضح أن بنية النحاس الأصفر الذي لا يزيد محتوى الزنك فيه على 39% عبارة عن بلورات من المحلول الجامد  $\alpha$  مع الذي يمتاز بلليوننة والمطيلية العاليتين بينما يظهر الطور ( $\beta$ ) في السبائك التي يبلغ محتوى الخارصين فيها من 39-50% وهذا الطور عبارة عن المركب الألكتروني CuZn . وعند درجات الحرارة المرتفعة يكون النسق البلوري للطور ( $\beta$ ) غير منتظم من حيث وضع الذرات فيه وتكون منطقة تجانسه واسعة ، لذلك يكون هذا الطور ليناً في هذه الحالة . وعندما تنخفض درجة الحرارة حتى 453-470م° ، سيصبح وضع ذرات النحاس والخارصين في هذا الطور منتظماً ويرمز اليه في حالته المنتظمة بالرمز ( $\beta'$ ) وهو طور يتميز بالصلادة والقصفة معاً .



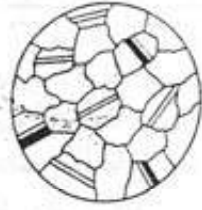
الشكل ( ٣ - ٧٣ ) ضغط الخوازيق الطوري والخواص الميكانيكية للنحاس الأصفر .

أما السبائك التي تحتوي على أقل من 46.5% خارصين ، فإنها ترسب عند التبريد قسماً من طور (α) بينما ترسب السبائك التي تحتوي على أكثر من 50% خارصين الطور كاملاً (γ) عند التبريد . وهكذا فإن السبائك التي تحتوي على 38-64.5% خارصين ستكون لها بنية دقيقة من الطورين (β+α) بينما ستكون السبائك التي تحتوي على 5.46-50% خارصين من الطور β بشكل كامل .

ويبين الشكل ( 2-72 ) التغيرات التي تحصل في الخواص الميكانيكية للنحاس الأصفر تبعاً لمحتوى الخارصين فزيادة محتوى الخارصين في منطقة الطور (α) تزداد متانة وصلادة ولدونة النحاس الأصفر ، وعند ظهور الطور (β) تقل اللدونة بشكل حاد ، أما مقاومة الشد القصوى فتستمر بالارتفاع لتصل إلى أقصى قيمة لها عندما يصل محتوى الخارصين إلى 45% وستقل متانة النحاس الأصفر بشدة في مجال الطور (β) ولهذا السبب فإن سبائك النحاس الأصفر التي يزيد فيها محتوى الخارصين على 42% لا تستخدم في الصناعة أما الأستطالة النسبية فإنها تصل إلى أقصى قيمة لها عندما تكون نسبة الخارصين بحدود 30-32% .

#### الخواص الميكانيكية والأستخدام :-

تستخدم سبائك النحاس الأصفر التي تحتوي على 30% خارصين في صناعة الصفائح المشكّلة على البارد والأسلاك المسحوبة على البارد ولغرض السحب العميق والكبس وأنتاج والأنابيب ، كما يستخدم في صناعة أغلفة الأطلاقات . أما عن الخواص الميكانيكية فإن لهذه السبيكة أستطالة عالية تبلغ 70% وصلادة واطئة تبلغ 65 فيكرز ومقاومة شد تبلغ 320 نيوتن/مم<sup>2</sup> والشكل ( 2-73 ) يبين التركيب المجهرى لهذه السبيكة .



ب- مشكل على البارد وملدن



ا- كمطبوبة

الشكل ( ٢ - ٧٣ ) البنيان الدقيقتان للنحاس الأصفر ٧ / ٣

أما السبائك التي تحتوي على 40% خارصين فهي سبائك ملائمة للتشكيل بالدرفلة على الساخن ، والبثق والختم ولأنتاج المسبوكات وتمتاز هذه السبائك بعد عملية التشكيل على الساخن بمقاومة شد تبلغ ما بين 300 و 460 نيوتن /مم<sup>2</sup> وصلادة ما بين 75 و 150 فيكرز ، وأستطالة نسبية تبلغ 35% والشكل ( 2-74 ) يبين التركيب المجهرى لهذا النوع من السبائك .



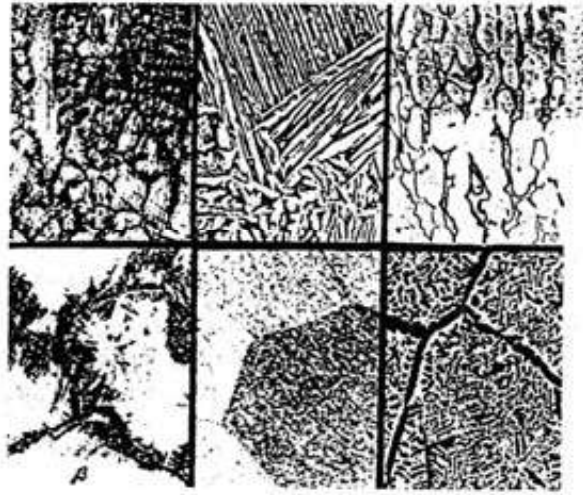
(ب) مشكلتة على الساخن (مبنوقة )



( أ ) كمسبوكة

الشكل ( 2-74 ) البنيان الدقيقتان للنحاس الأصفر 60/40

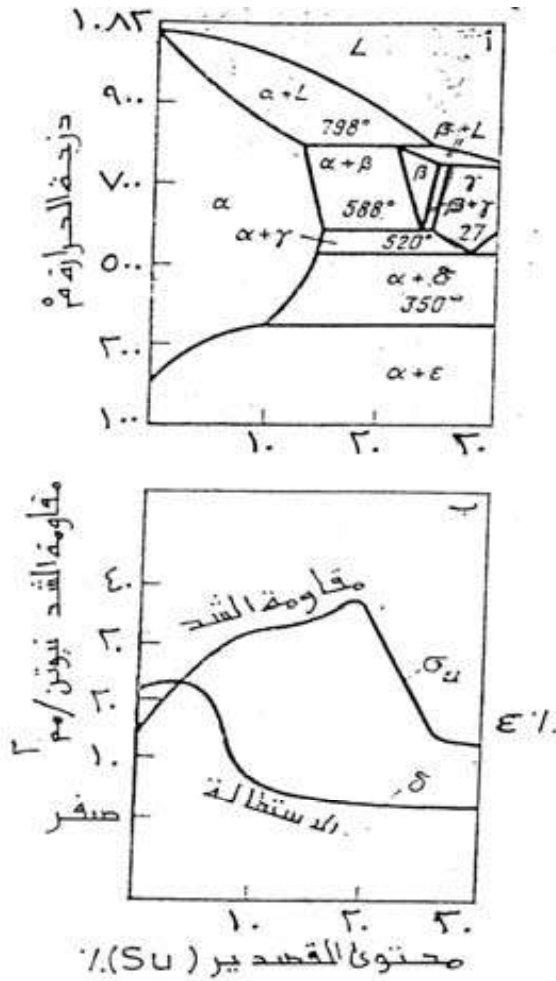
وأذا أضيفت لهذا النوع من السبائك عناصر أخرى مثل المنغنيز والألمنيوم والقصدير ، والحديد ، والنيكل ، ستتكون سبائك تمتاز بالمقاومة العالية للتآكل ، ومقاومة شد عالية قد تصل الى 740 نيوتن /مم<sup>2</sup> والشكل ( 2-75 ) يبين التراكيب المجهرية لبعض أنواع النحاس الأصفر المختلفة .



- الشكل (2-75) يبين التراكيب المجهرية لبعض أنواع النحاس الأصفر المختلفة .
- أ- نحاس اصفر مسبوك (الجزر طور  $\beta$ ) و(القلب طور  $\alpha$ )
- ب-نحاس اصفر مسبوك (الطور الغامق  $\beta$ ) و(الطور الفاتح  $\alpha$ )
- ج- نحاس اصفر ميثوق يلاحظ استتالة  $\beta$
- د- نحاس اصفر أجريت عليه عملية تسخين و أحماد في الماء يلاحظ الواح  $\alpha$  مترسبة على الحدود الحبيبية  $\beta$
- هـ- نحاس حاوى على 45% خارصين يلاحظ حبيبات  $\beta$  المنتظمة
- و- نحاس حاوى على 57% خارصين يلاحظ شبكة ( $\gamma$ ) و الجسيمات في الاساس  $\beta$

ب- سبائك النحاس والقصدير- ( البرونز القصديري ) :-

الشكل (2-76) يوضح مخطط التوازن الطوري للنحاس - القصدير ، ويتبين من هذا المخطط أن القصدير يذوب في النحاس لغاية 14% مكوناً محلولاً جامداً من ( $\alpha$ ) وتتكون في هذه السبيكة مركبات الكترونية متعددة مثل  $Cu_2Sn$  (الطور  $\beta$  ذو النسبة 2/3) ، والمركب  $Cu_{31}Sn_8$  (الطور  $\delta$  ذو النسبة 13/21) ، والمركب  $Cu_3Sn$  (والطور  $\epsilon$  ذو النسبة 4/7) ، كما توجد مجموعة من التحولات الحولية (البريتكتيكية) وتحولات من النوع اليوتكتويدي ، فعند درجة 588م يحدث تحول يوتكتويدي بالطور  $\beta$  مع تكوين خليط من الطور ( $\alpha$ ) والطور ( $\gamma$ ) ، اما عند درجة 520م فستتحول بلورات المحلول الجامد ( $\gamma$ ) الى خليط من الطورين ( $\alpha$ ) و( $\delta$ ) وعند درجة حرارة 350م تقريباً ، سيتحول الطور ( $\delta$ ) الى المحلول الجامد ( $\alpha$ ) والمركب ( $\epsilon$ ) ، ويحدث هذا التحول عند التبريد البطيء جداً فقط . اما في ظروف التبريد الواقعية فإنه سيتكون البرونز من الطور ( $\alpha$ ) والمركب ( $\delta$ ) .



الشكل ( ٢ - ٧٦ ) الرسم البياني لاطوار

سبائك النحاس - قصدير  
(أ) والخواص الميكانيكية للبرونز  
المسبوك تبعاً لمحتوى القصدير (ب)

ان البرونز الذي يحتوي على اقل من 5% قصدير سيتكون من محلول جامد من ( $\alpha$ ) وتتكون بنيته من حبيبات متعددة الاسطح , اما اذا زاد محتوى القصدير على 5% , فستتكون بنيته من الطور ( $\alpha$ ) واليوتكتويد ( $\delta + \alpha$ ) . وتعد السبائك التي تحتوي على 10-12% قصدير هي الاكثر استعمالاً في الحياة العملية , اذ ان زيادة نسبة القصدير عن هذه النسبة تؤدي الى تكون بنية قصفه , وهذا ما يظهر في الشكل (2-76-ب) والذي يبين تغيير الخواص الميكانيكية للبرونز تبعاً للمحتوى القصديري .  
ويلاحظ هنا ان مقاومة الشد تزداد لغاية نسبة 18-20% قصدير , ثم تنخفض بشكل حاد بسبب احتواء البنية على كمية كبيرة من اليوتكتيد الحاوي على المركب القصف  $\delta$  اما الاستطالة النسبية فأنها تزداد لغاية 6% قصدير ثم تقل بعد ذلك بسبب تكون اليوتكتويد , لهذا فإنه من غير الممكن تطبيق التشكيل اللدن الا على البرونز الذي يحتوي على نسبة اقل من 6% قصدير .

## الخواص الميكانيكية والاستخدام :-

تتميز السبيكة التي تحتوي على 4% قصدير بالليوننة والمطيلية العاليتين وتسمى ببرونز العملات . اما السبيكة التي تحتوي على 10% قصدير فأنها تستخدم في صناعة المسبوكات بسبب مقاومة الشد والتآكل العاليتين , ومن هذه المسبوكات الاجزاء الرابطة لانابيب البخار وانابيب المياه ذات الضغط العالي . كما تصلح هذه السبيكة لصناعة المحامل لأحتواء بنيتها على اليوتكتويد ( $\delta + \alpha$ ) اذ تبلغ مقاومة الشد ما بين 270-340 نيوتن /مم<sup>2</sup> , والصلادة ما بين 70 - 100 فيكرز , ولاتزيد الاستطالة على 20% . اما السبائك التي تحتوي على 15% قصدير فأنها تستخدم كسبائك تحميل وذلك لأحتوائها على اليوتكتويد ( $\delta + \alpha$ ) في ارضية لينة من الطور  $\alpha$  . وتستخدم هذه السبيكة ايضاً لصناعة الاجراس لأعطائها رنيناً افضل . ويمكن اضافة بعض العناصر الاخرى الى البرونز لأكسابه صفات جديدة اخرى , فأضافة نسبة اقل من 0.3% من الفسفور (البرونز الفسفوري) تزيد من مقاومة الشد الى 370 نيوتن /مم<sup>2</sup> , والاستطالة النسبية الى 65% , والصلادة الى 75 فيكرز , وتستخدم مثل هذه السبيكة كنوابض وفي التوربينات البخارية . اما البرونز المسبوك فأن له الخواص نفسها تقريباً عدا ان الاستطالة لا تزيد على 15% . والشكل (2-77) يوضح البنية المجهرية لسبائك النحاس - القصدير (أ) بعد السباكة (ب) بعد عملية التشكيل والتلدين .



الشكل (2-77) البنية المجهرية للبرونز القصديري

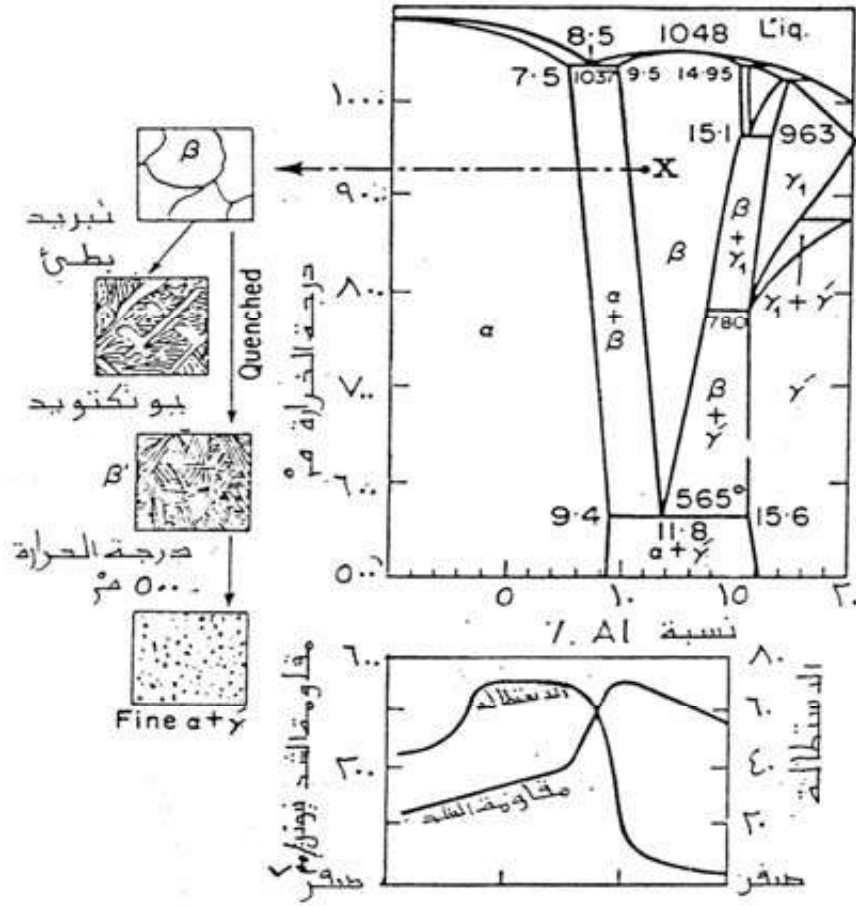
أ- بعد السباكة

ب- بعد التشكيل و التلدين

### ج- سبائك النحاس الالمنيوم :-

الشكل (2-78) يمثل مخطط التوازن الحراري للنحاس-الالمنيوم ، اذ يتكون محلول جامد من الطور ( $\alpha$ ) عندما تكون نسبة الالمنيوم اقل من 9%. اما البرونز الذي يحتوي على نسب اعلى من ذلك ،فانه يتكون من خليط من الطورين ( $\alpha + \gamma'$ ) (الطور  $\gamma'$  هو مركب الكتروني  $Cu_{32} Al_{19}$ ). وعندما تزيد نسبة الالمنيوم على 10% ، تصل مقاومة الشد الى قيمتها القصوى وعندما تبلغ نسبة الالمنيوم ما بين 4-5% ستزداد الاستطالة النسبية ،وتهبط قيمتها بشدة عندما تتجاوز نسبة الالمنيوم 5% ،والسبب في ذلك يعود الى ظهور الطور  $\gamma'$  القصف .وعن الخواص الميكانيكية والاستخدام ،نذكر ان سبائك البرونز التي تحتوي على نسب من الالمنيوم اقل من 8% ،يمكن تشكيلها تشكيلا لدناً على البارد والساخن ، ولهذا فهي تستخدم في صناعة الحلى الاصطناعية .واذا احتوت هذه السبيكة على عناصر مضافة مثل النيكل ، والحديد ، والمنغنيز ، فأنها تستخدم في صناعة انابيب المكثفات البحرية . اما البرونز الذي يحتوي على نسب من الالمنيوم ما بين 8-10% ،فانه يمكن ان يشكل على الساخن ، وله قدرة عالية على السباكة . ولهذا فهو يستخدم في صناعة المسبوكات المعقدة الشكل .وتتمتاز السبيكة من هذا النوع والمشكلة على الساخن بان لها مقاومة شد مقدارها 770 نيوتن /مم<sup>2</sup>، تقريبا واستطالة نسبية مقدارها ما بين 15-25% وتعد هذه السبائك محدودة الاستخدام بسبب ارتفاع تكاليف انتاجها وصعوبة صهرها وسبكها بسبب تكون اوكسيد الالمنيوم ،وانكماشها الشديد عند الصب .

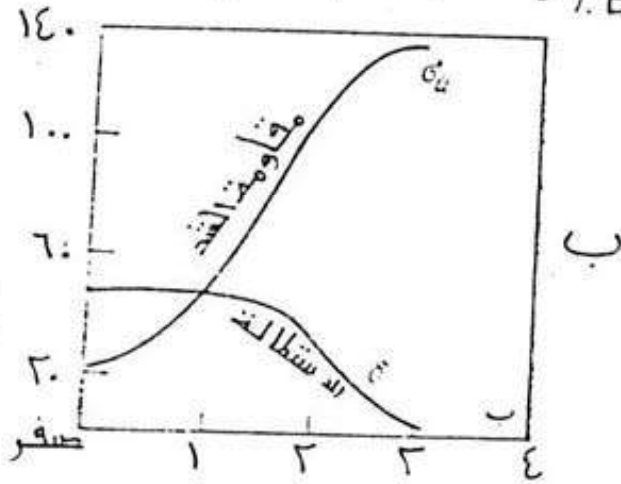
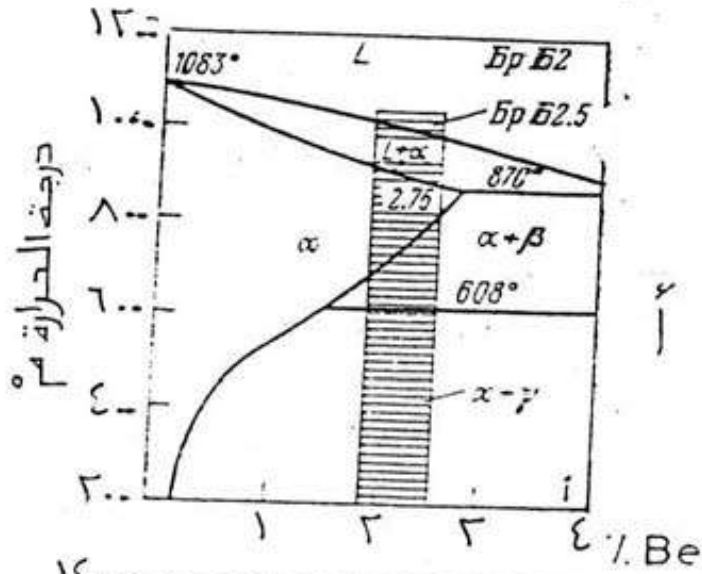




الشكل ( ٢ - ٧٨ ) مخطط التوازن الطوري والخواص الميكانيكية لسبيكة Cu - Al .

د - سبائك النحاس - البيريليوم :-

يبين الشكل (2-79) مخطط النحاس - البيريليوم ، ويظهر من هذا المخطط ان النحاس يذوب 2.75% من البيريليوم داخل المحلول الجامد ( $\alpha$ ) عند درجة 870م° ، وتنخفض قيمة هذه الذوبانية عند درجة حرارة الغرفة . فمثلا ، اذا اخمدت السبيكة التي تحتوي على 2% بيريليوم من درجة 800م° ، فان المحلول الجامد  $\alpha$  سيستمر بالبقاء عند درجة حرارة الغرفة ، الا انه سيكون محلولاً فوق الاشباع للبيريليوم في النحاس ، ويكون شبه مستقر عند درجة حرارة الغرفة الأمر الذي يؤدي فيما بعد الى تحوله الى بنية من ( $\gamma + \alpha$ ) . وتمتاز هذه السبيكة بصورة عامة بالليونة والمطيلية العاليتين ، وامكانية تصليدها بالتشكيل على البارد . واذا اجريت عليها بعض المعاملات الحرارية مثل الاخمد من درجة 780م° ، فانها ستكتسب خواص ميكانيكية عالية ، اذ ستكتسب مقاومة شد تبلغ 50 نيوتن /مم<sup>2</sup> ، واستطالة



محتوى البيريليوم (بالوزن) % Be

الشكل ( ٢ - ٧٩ ) أ - الرسم المبياني لاطوار

النحاس - بيريليوم

ب - الخواص الميكانيكية بعد

الانضام من ١٨ م في الماء

والنخنيق عند ٣٠٠ م وذلك

تبعاً لمحتوى البيريليوم فيها

نسبية تبلغ 45%، وصلادة تبلغ 120 برينل اما اذا اجريت عملية تعتيق عند درجة 300م ولمدة ساعتين فسنحصل على مقاومتي شد تبلغ 130 نيوتن /مم<sup>2</sup> وصلادة تبلغ 400 برينل ،في حين تنخفض الاستطالة النسبية الى 1.5% .وبصورة عامة ،يمكن استخدام سبائك النحاس - البيريليوم في صناعة النوايض في الاجهزة الكهربائية باعتبارها ذات موصلية مقبولة للكهرباء فضلا عن ثباتها امام الصدأ .

## هـ- سبائك النحاس - النيكل :-

يذوب عنصر النيكل في النحاس ذوبانا تاما وبجميع النسب ، ليكونا أي النحاس والنيكل سلسلة من المحاليل الجامدة كما موضح في الشكل (2-13). وتتميز بنية هذه السبائك بوجود العزل المجهري .والذي يمكن ازالته بعملية تلدين لاحقة .ويمكن تشكيل جميع انواع هذه السبائك على البارد وعلى الساخن . وتعرف سبيكة النحاس التي تحتوي على 20% نيكل بسبيكة الكوبرو نيكل ،وهي سبيكة تتمتع بليوننة عالية وقابلية جيدة على الطرق ، ويمكن تشكيلها على البارد بسهولة . وبما انها تتمتع بمقاومة عالية ضد الصدأ ، فانها تستخدم وعلى نطاق واسع في صناعة الادوات الطبية والنقود والاعوية .وتسمى سبائك النحاس مع النيكل والخرصين ، الفضة الالمانية لونها الفضي الجميل .وبما ان مقاومتها للصدأ عالية ، فانها تستخدم في صناعة الحلبي التقليدية و اجزاء الساعات . وتمتاز هذه السبائك بعد عملية التشكيل اللدن بالليوننة العالية ، اذ تصل الاستطالة النسبية الى 45% ،بينما تبلغ مقاومة الشد ما بين 300 و 380 نيوتن/مم<sup>2</sup> ، والصلادة ما بين

75 و 80 برينل . اما السبائك التي تحتوي على نسب اعلى من 40% نيكل ،فانها تمتاز بمقاومة نوعية كهربائية مرتفعة وغير متغيرة تقريبا مع درجة الحرارة .لذا تستخدم مثل هذه السبائك في صناعة عناصر التسخين وفي صناعة المقاومات الكهربائية .

## 2-13-2 الالمنيوم وسبائكه :-

يمكن تقسيم سبائك الالمنيوم الى نوعين رئيسيين هما :

اولاً - السبائك المصبوبة **casting alloys** ( على يمين النقطة E) وتقسم ايضا الى نوعين هما :

1. سبائك غير قابلة للتعامل الحراري.
2. سبائك قابلة للتعامل الحراري

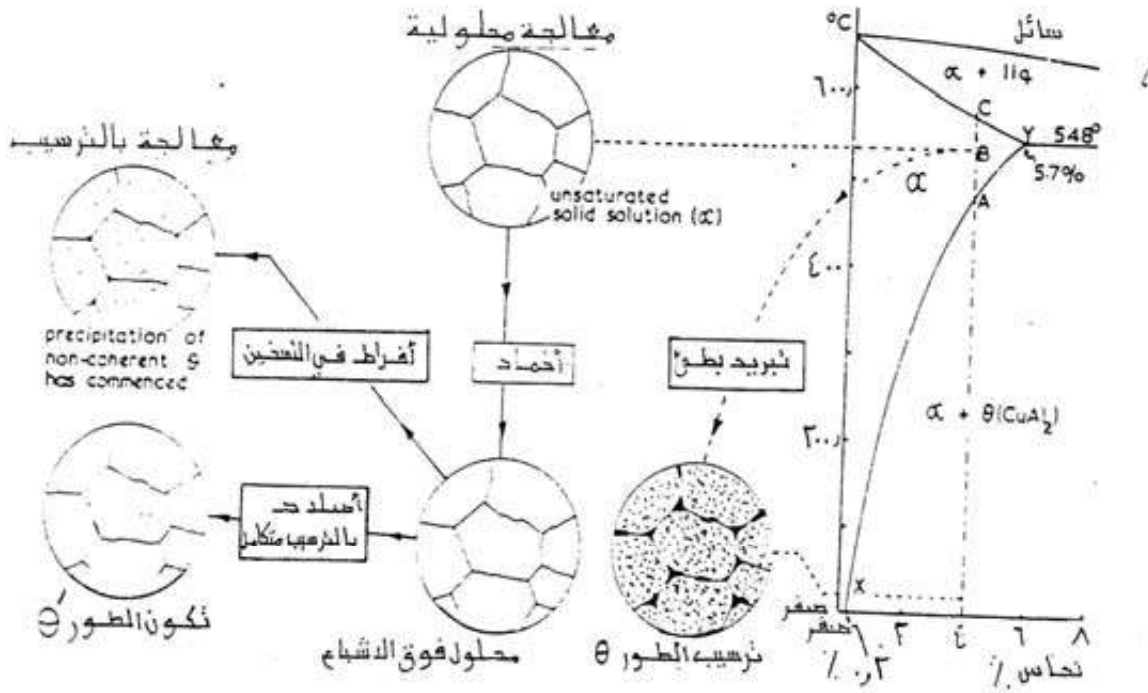
ثانياً - السبائك المشكلة **wrought alloys** (على يسار النقطة E) وتقسم ايضا الى :

1. سبائك غير قابلة للتعامل الحراري ، وهي سبائك تحتوي على عناصر بتركيب ادنى من النقطة S .
2. سبائك قابلة للتعامل الحراري . وهي سبائك تحتوي على عناصر بتركيب بين النقطتين S و E .

وقبل ان نشرح هذه الانواع الاربعة لابد من شرح التعامل الحراري الذي يجرى على هذه السبائك ، والذي يتضمن مرحلتين هما المعاملة المحلولية والتعتيق .

## المعاملة المحلولية والتعتيق :-

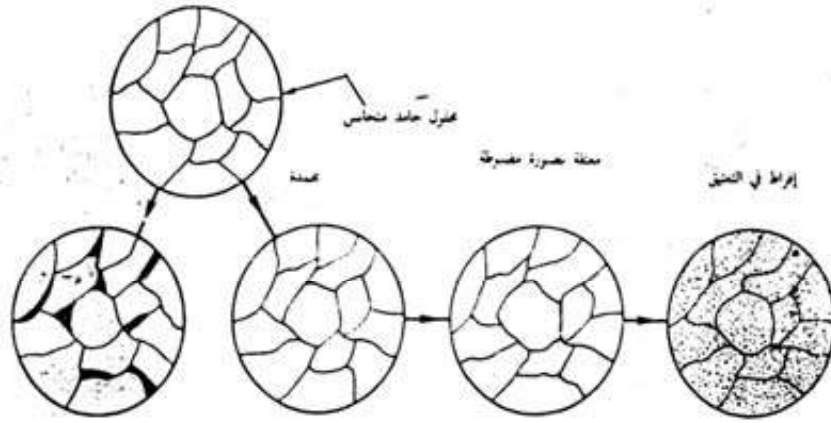
تدخل مرحلتا المعاملة المحلولية والتعتيق في عملية تصليد السبائك عن طريق ترسيب الاطوار وهو ما يسمى ( التصليد بالترسيب precipitation hardening ) . ويمكن توضيح هاتين المعاملتين على سبيكة الدور الومين (AL-4%Cu) والمبينة في الشكل (2-81) حيث تذوب نسبة 5.7% من النحاس في الالمنيوم عند درجة 548م° ليتكون المحلول الجامد ( $\alpha$ ) ، وتقل قابلية الذوبان لتصبح نسبة النحاس المذابة 0.2% عند درجة حرارة الغرفة . واذا تم تبريد سبيكة تحتوي على 4% نحاس وبيطئ من درجة حرارة الغرفة ، فإن البنية المجهرية الناتجة ستحتوي على حبيبات من المحلول الجامد  $\alpha$  الذي يحتوي على 0.2% نحاس ، وعلى دقائق خشنة من المركب الكيميائي الصلب والقصف ( $Cu AL_2$ ) ولذلك فستكون الخواص الميكانيكية الناتجة رديئة . ولغرض تحسين هذه الخواص لابد من اجراء المعاملة المحلولية ومن ثم التعتيق .



الشكل ( ٢-٨١ ) جزء من مخطط النوازن الطوري لسبيكة ٧.٤ Al-Cu و بوضوح التغيرات في البنية أثناء التصلد بالتعتيق .

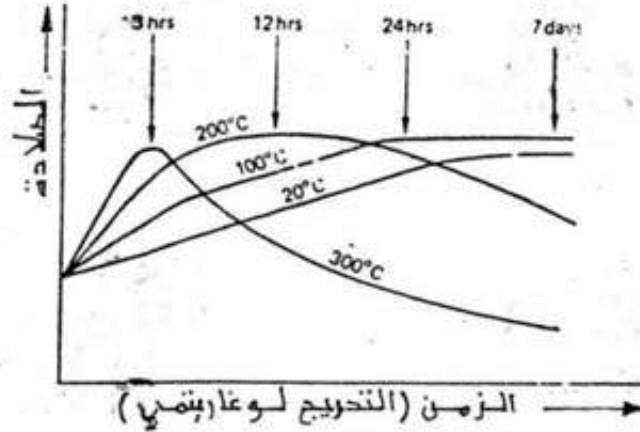
وتتم المعاملة المحلولية برفع درجة حرارة هذه السبيكة الى درجة 500م° , والابقاء عليها لفترة تسمح بأذابة المركب الكيميائي  $Cu Al_2$  وتكوين المحلول الجامد  $\alpha$  المتجانس , ثم الاخمد بالماء من هذه الدرجة الى درجة حرارة الغرفة وستمنع عملية الاخمد من ترسيب المركب  $Cu Al_2$  والابقاء على المحلول الجامد  $\alpha$  وهو محلل فوق الاشعاع فيه 4% من النحاس بدلاً من 0.2% عند التبريد البطيء . لذا سيكون هذا المحلول في حالة شبه مستقرة . اما عملية التعتيق , فهي الانتظار لفترة اربعة ايام بعد المعاملة المحلولية في درجة حرارة الغرفة , وستؤدي هذه الفترة الى انتشار ذرات النحاس في الشبكة البلورية للألمنيوم , حيث تتكون دقائق صغيرة جداً من  $Cu Al_2$  لا ترى حتى بالمجهر الضوئي . وستعمل هذه الدقائق على الاخلال بالانتظام في الشبكة البلورية للطور  $\alpha$  مما يجعلها عائقاً لحركة الانخلاعات , مما يؤدي الى زيادة مقاومة السبيكة الميكانيكية وصلادتها , وهذا ما يعرف بالتصلد بالترسيب واحيانا التصلد بالتعتيق . وقد لا يحصل التعتيق تلقائياً في درجة حرارة الغرفة لذلك يعتمد الى تعجيل عملية انتشار ذرات النحاس في الألمنيوم بتسخين السبيكة الى درجات حرارة مرتفعة نوعاً ما (150م°) ولبضع ساعات ,

فهذه الدرجة من الحرارة كفيلة بتعجيل عملية دمج الدقائق المترسبة من المركب  $Cu Al_2$  لتقل في العدد وتكبر في الحجم بحيث يصبح بالإمكان مشاهدتها تحت المجهر الضوئي . والشكل (2-82) يوضح ذلك .



الشكل (2-82) التغيرات في البنية أثناء التصليد بالتعتيق لسبيكة ألومين (AL-4%Cu)

ان تقليل عدد الدقائق من شأنه ان يقلل من العوائق امام حركة الانخلاعات ، وهذا يساهم في خفض قيمتا الصلادة والمقاومة . والشكل (2-83) يوضح هذا .



الشكل (2-83) منحنيات الصلادة- الزمن للتصليد بالتعتيق لسبيكة الالمنيوم

ويمكن تاخير عملية التعتيق وذلك بالاحتفاظ بالسبيكة بعد عملية المعاملة المحلولية مباشرة ، في جو بارد درجة حرارته (-6م) ، وتكون هذه الطريقة في بعض الاحيان ضرورية جدا لاجراء عمليات التشكيل الميكانيكي مثل الكبس ، والبرشيم ، قبل البدء بتصليد السبيكة.

وكما بينا ان سبائك الالمنيوم يمكن تقسيمها الى نوعين هما :

## اولا - السبائك المصبوبة :-

### أ - سبائك غير قابلة للتعامل الحراري :-

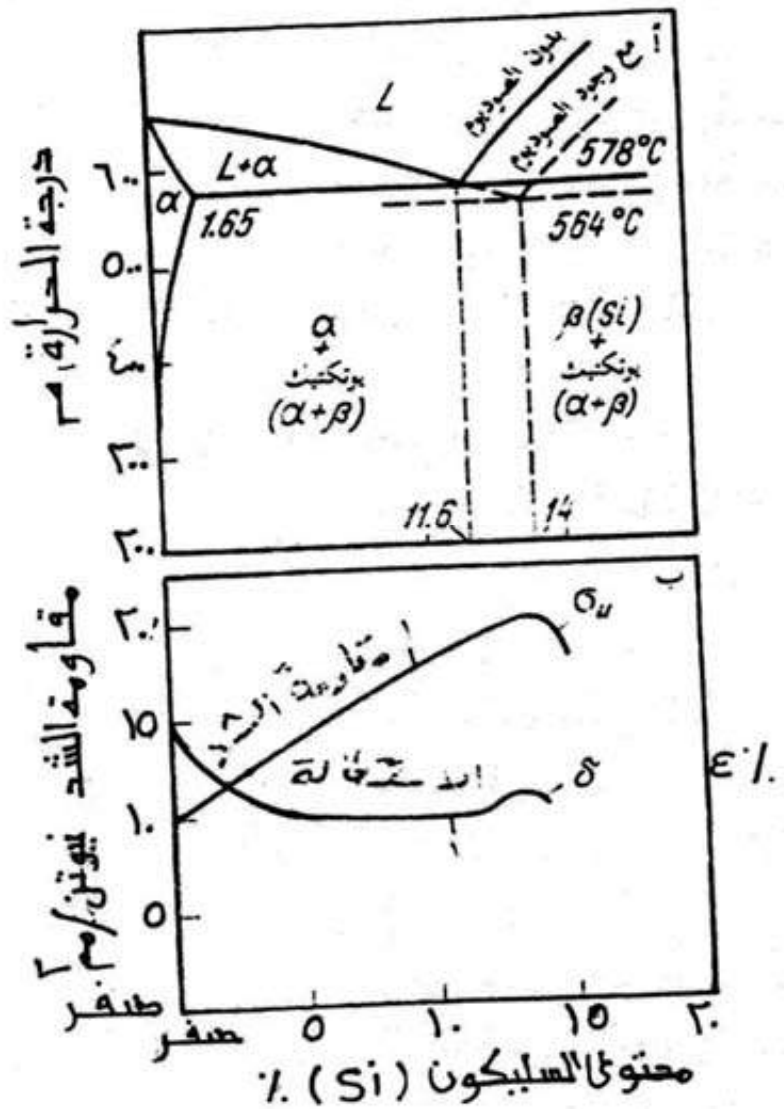
ويشمل هذا النوع السبائك التي تحتوي على نسبة ما بين 10 و 13% سليكون وتمتاز بالسيولة العالية و الانكماش الواطئ ، وتتكون بنيتها من اليوتكتي. شكل (2-84) .

وهي بنية ابرية الشكل ، كبيرة الحجم ، وذات خواص رديئة .ويمكن تحسين هذه الخواص بإضافة كميات قليلة من الصوديوم (0.01%) اليها وهي في الحالة المنصهرة ، حيث تؤدي هذه الإضافة الى تصغير حجم الحبيبات والى تكون محلول جامد  $\alpha$  شجيري في أساس من اليوتكتي الدقيق كما في الشكل (2-85) .

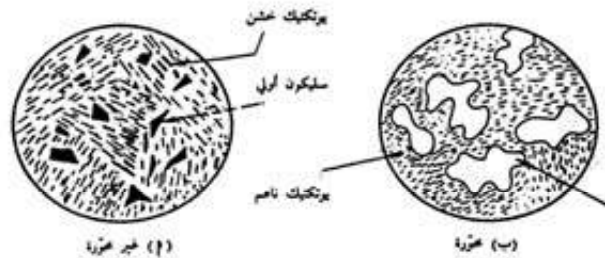
ان اضافة الصوديوم من شأنه ان يزيح تكون اليوتكتك الى 14% بدلا من 11.6% كما في الشكل (2-84-أ) والى خفض درجة حرارة اليوتكتك من 578م° الى 564م° .وتستخدم مثل هذه السبائك في صناعة المقاطع الرقيقة والمسبوكات المعقدة مثل اغلفة المقاييس والمحركات وصناديق المفاتيح الكهربائية .وتمتاز هذه السبائك بعد اضافة الصوديوم بمقاومة شد تبلغ 200 نيوتن /مم<sup>2</sup> ، وصلادة تبلغ 60 فيكرز ، واستطالة نسبية تبلغ 15% .

### ب - سبائك قابلة للتعامل الحراري :-

وتشمل السبائك التي تحتوي على المغنيسيوم والنحاس والسليكون ، والنيكل ايضا الذي يعمل على زيادة مقاومة السبيكة لدرجات الحرارة العالية و التاكل . و التعامل الحراري الاساسي الذي تتعرض له هذه السبائك هو المعاملة المحلولية ، حيث يبدأ بالتسخين لغاية درجة 520م° ولمدة ست ساعات ، يتبعها الاخمد بالماء ، ثم التعتيق عند درجة حرارة الغرفة ولمدة خمسة ايام ، او التعتيق عند درجة 100م° ولمدة ساعتين . وتستخدم هذه السبيكة في صناعة السيارات (لصنع المكابس وهياكل الاسطوانات) .



الشكل (2-84) أ- الرسم البياني لاطوار سبائك الالمنيوم - سليكون  
ب- تأثير السليكون على الخواص الميكانيكية



الشكل (2-85) البنية الدقيقة المثالية لسبائك AL- 12% Si

## ثانيا - السبائك المشكلة :-

### أ- سبائك غير قابلة للتعامل الحراري :-

وتشمل السبائك التي تحتوي على 1.25% منغيز ، والسبائك التي تحتوي على نسبة ما بين 2 و7% مغنيسيوم . وهي سبائك لا يمكن تصليدها الا بالتشكيل على البارد ، اذ يتكون المحلول الجامد  $\alpha$  من المنغيز في الالمنيوم مع كمية قليلة من طور اضافي من دقائق المركب  $AL_6 Mn$  . اما المحلول الجامد  $\alpha$  من المغنيسيوم في الالمنيوم ، فانه لا يحتوي على أي طور اضافي كما في الشكل (2-86) .

ومن مميزات هذه السبائك ، سهولة تشكيلها بالضغط ، وجودة لحامها باللحام التلامسي والقوس الكهربائي مع الحماية بغاز الاركون ، ومقاومتها العالية للصدأ . ويمكن اجراء عملية التلدين بعد عملية التشكيل على البارد ، للحصول على الليونة المطلوبة . وتجري هذه المعاملة بدرجات حرارة ما بين 350 و400م° .

### ب - سبائك قابلة للتعامل الحراري :-

وتشمل الانواع الاتية :

1 - Si - Mg - Cu - AL

2 - Cu - Mg - Zn - AL

3 - Si - Mg - AL

ويمكن تصليد هذه السبائك بالمعاملة المحلولية والتعتيق ، وهي تغطي عادة بطبقة من معدن الالمنيوم النقي لحمايتها من التآكل . وتستخدم السبيكة الاولى في العديد من الصناعات الهندسية خاصة في بناء الطائرات . وهي متوفرة كمطروقات والواح وانابيب . وتتميز السبيكة الثانية بصعوبة تشكيلها ، كما انها تكون عرضة لتشقق التآكل الاجهادي . وكذلك تتميز بمقاومة شد عالية ، وتستخدم كمطروقات . اما السبيكة الثالثة فهي السبيكة الاكثر استخداماً لانها ذات مقاومة عالية للتآكل ومقاومة ميكانيكية جيدة ، لذا فهي تستخدم في المقاطع الانشائية والوانبي والسيارات .

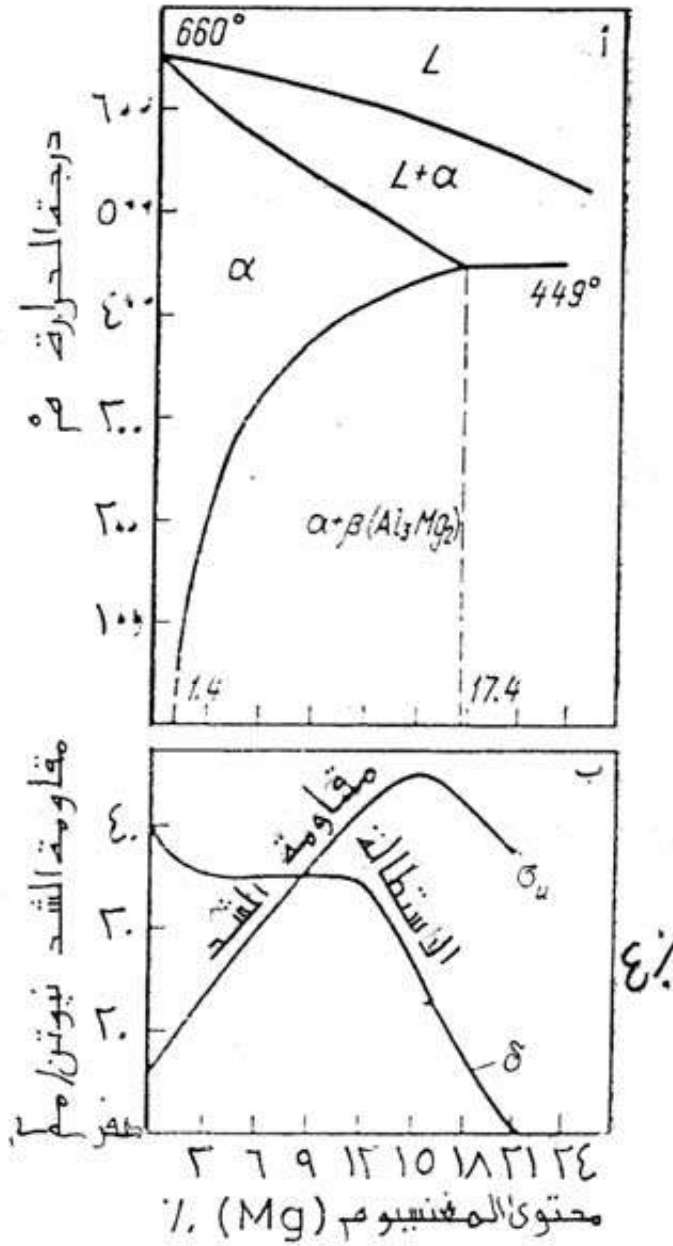
### تسمية سبائك الالمنيوم :-

تسمى سبائك الالمنيوم المشكلة بأربعة ارقام ، ومثال على ذلك الرقم 2021 ، حيث يعني الرقم الاول من اليسار نوع السبيكة ، والرقم الثاني يدل على التحويرات التي حصلت في السبيكة الاصلية ، والرقمان الاخيران يدلان على نقاوة الالمنيوم او السبيكة الخاصة المعنية . والجدول التالي يبين السبيكة ورقمها الذي يعني نوعها:

الرقم	العنصر
1	AL
2	Cu
3	Mn
4	Si
5	Mg
6	Mg-Si
7	Zn
8	عناصر اخرى



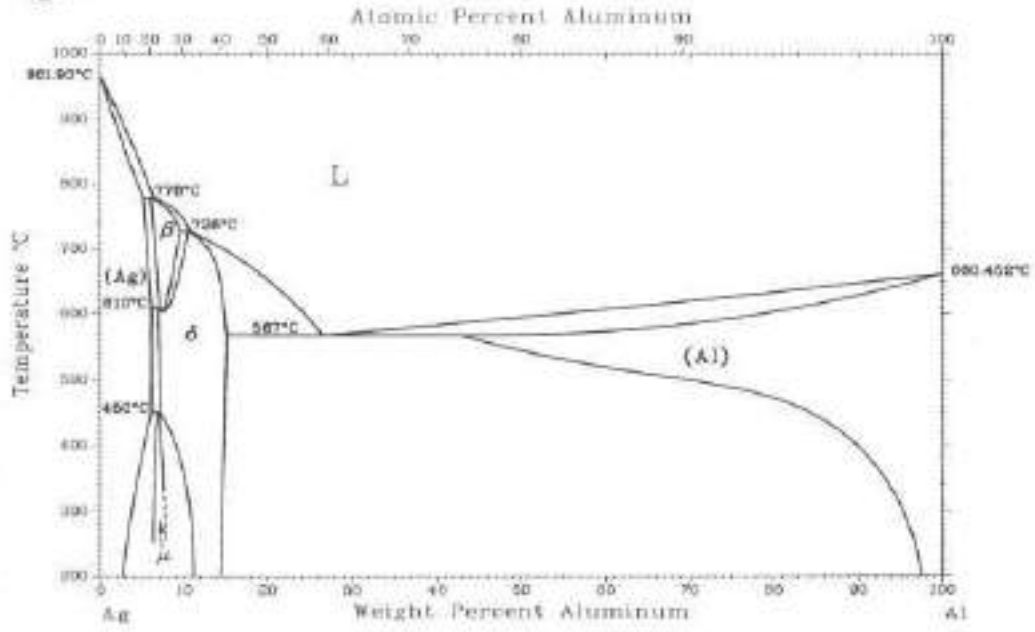
وأحياناً تضاف احرف اخرى مثل H-T-F-O وتضاف لهذه الاحرف اعداداً اخرى  
تعني نوع المعاملة الحرارية التي مرت بها السبيكة .



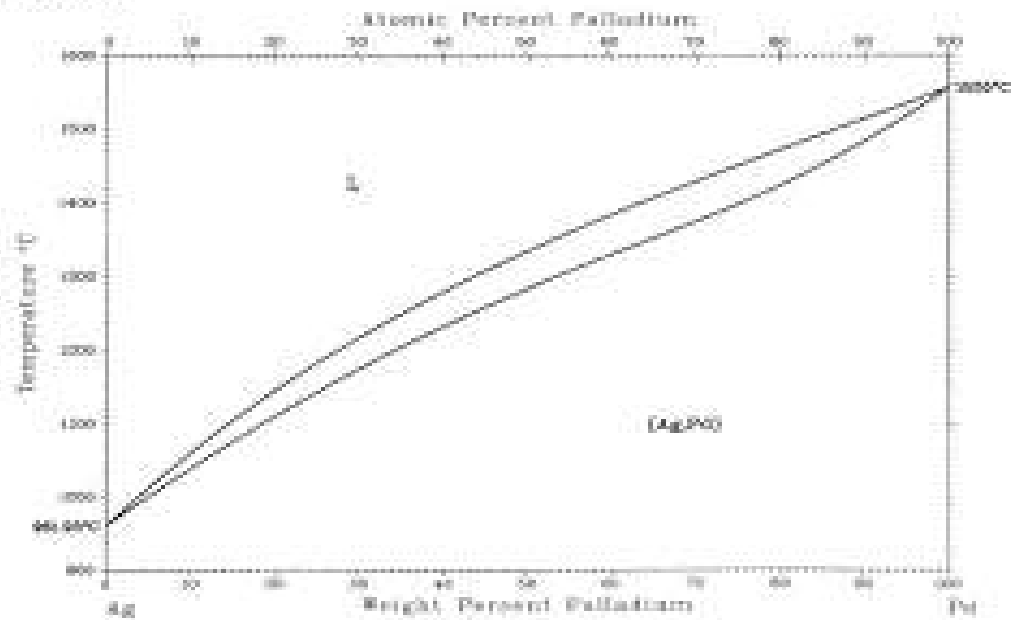
الشكل (2-86) أ- الرسم البياني لاطوار سبائك الالمنيوم - المغنيسيوم  
ب- تأثير المغنيسيوم على الخواص الميكانيكية للالمنيوم

## نماذج من السبائك الثنائية

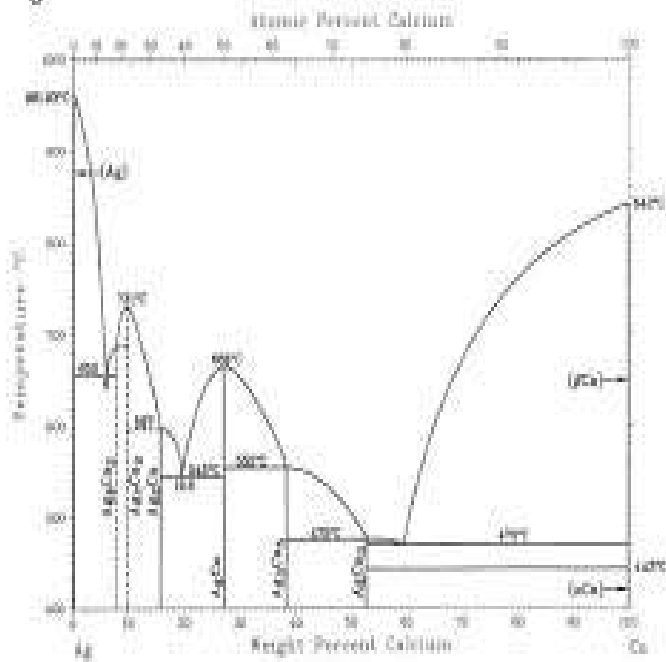
### Ag-Al



### Ag-Pd



Ag-Ca



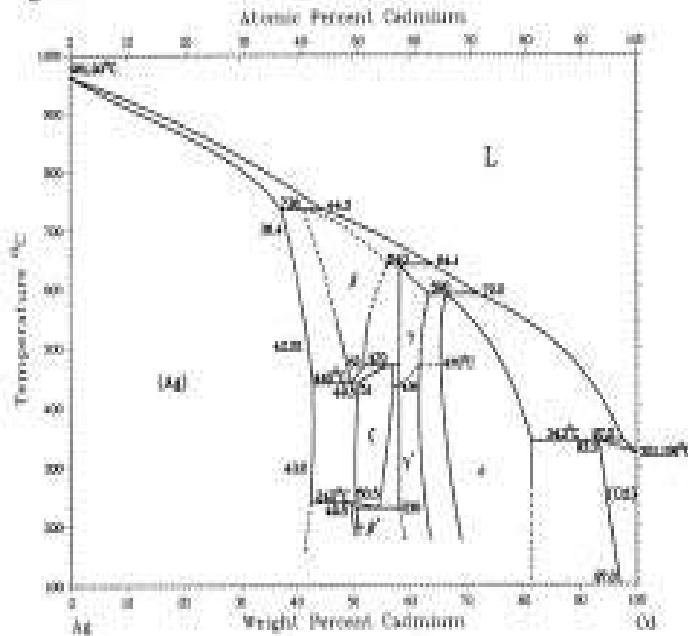
Phase	Composition, wt% Ca	Pearson symbol	Space group
(Ag)	0	cF4	$Fm\bar{3}m$
Ag <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub>	2.9	...	...
Ag <sub>2</sub> Ca <sub>3</sub>	9.6	tP18	$P6_3/m2$
Ag <sub>2</sub> Ca	15.6	cF12	$Fm\bar{3}m$
AgCa	27.1	cF8	$Cmcm$
Ag <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub>	38.2	tF12	$Fm\bar{3}m$
AgCa <sub>2</sub>	52.7	...	...
(Ca)	100	cF4	$Fm\bar{3}m$
(Ca)(a)	100	cI2	$m\bar{3}m$

(a) Above 443 °C

Binary Alloy Phase Diagrams/2•27

From [Hansen]

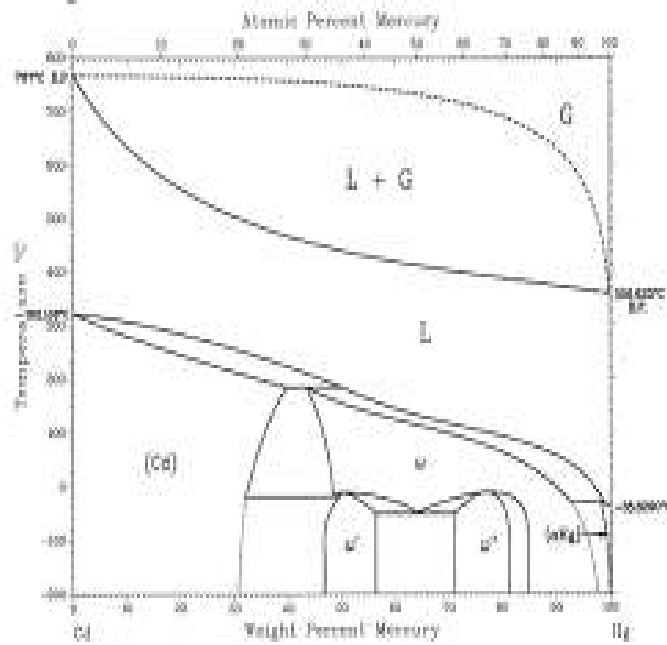
Ag-Cd



Phase	Composition, wt% Cd	Pearson symbol	Space group
(Ag)	0 to 41.2	cF4	$Fm\bar{3}m$
$\beta$	41 to 56	cF2	$Fm\bar{3}m$
$\beta'$	60.5 to 51.0	(a)	...
$\delta$	50.5 to 37	(b)	...
$\gamma$	36 to 65.5	...	...
$\gamma'$	58 to 63.5	cF2	$F43m$
$\epsilon$	65.4 to 82	AP2	$P6_3/mmc$
(Cd)	93.3 to 100	AP2	$P6_3/mmc$

(a) Distorted bcc. (b) cph

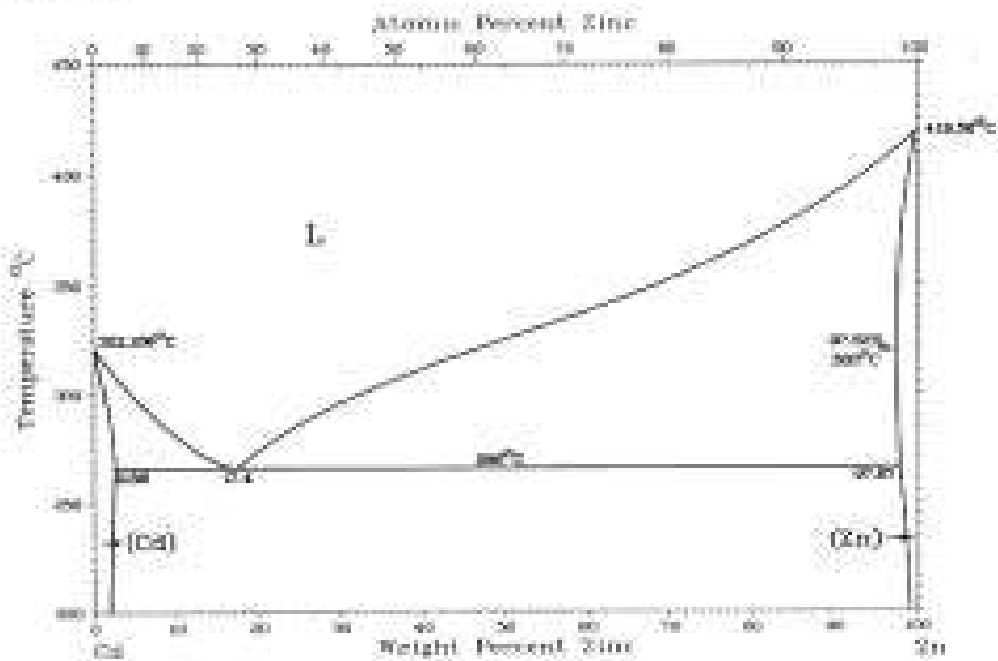
**Cd-Hg**



Phase	Composition, wt% Hg	Pearson symbol	Space group
(Cd)	0 to 37	Fm $\bar{3}m$	P6 <sub>3</sub> /mmc
$\alpha$	42 to 94	F2	Fm $\bar{3}m$
$\alpha'$	42 to 56	F6	Fm $\bar{3}m$
$\alpha''$	71 to 81	F6	Fm $\bar{3}m$
(alphaHg)(a)	98 to 100	R $\bar{3}m$	R $\bar{3}m$
(betaHg)(b)	= 100	F2	Fm $\bar{3}m$

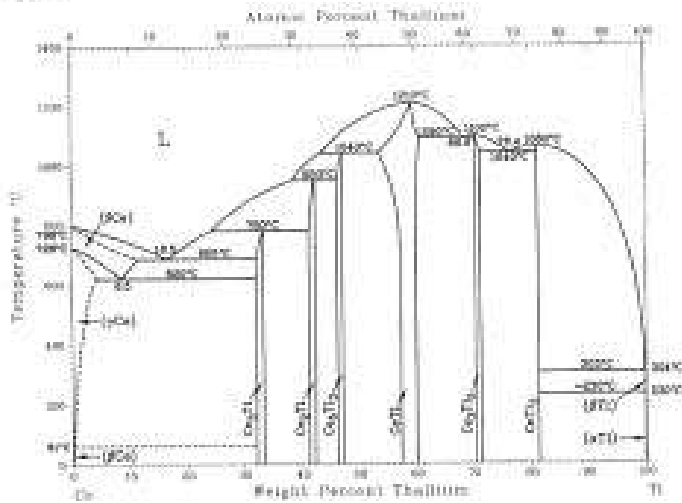
(a) From -38.820 to -103°C at 100 wt% Hg. (b) Below -103°C

**Cd-Zn**



## 2-138/Binary Alloy Phase Diagrams

### Ce-Tl

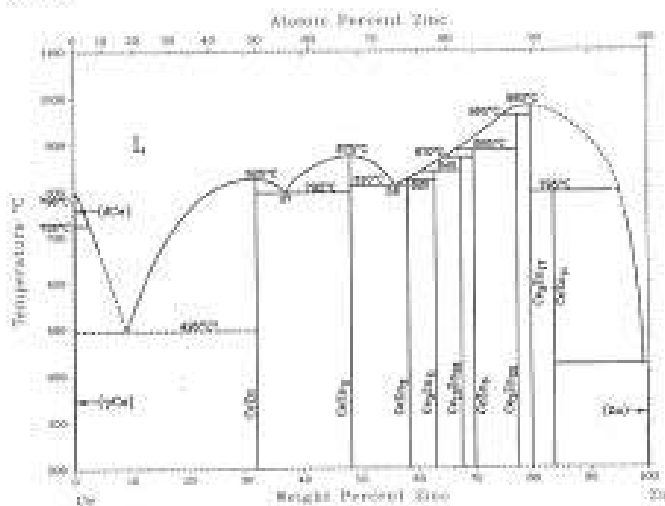


S. Delfino, A. Saccone, A. Palenzona, and R. Ferro, unpublished

Phase	Composition, wt% Tl	Pearson symbol	Space group
(αCe)	0	cF4	$Fm\bar{3}m$
(βCe)	0	bF4	$P6_3/mmc$
(γCe)	0 to 4	cF4	$Fm\bar{3}m$
(δCe)	0 to 12	cF2	$Fm\bar{3}m$
Ce <sub>2</sub> Tl(a)	-32.1 to -33.3	cF4	$Fm\bar{3}m$
	-33	cF4	$Fm\bar{3}m$
Ce <sub>2</sub> Tl	-42	...	...
Ce <sub>2</sub> Tl <sub>5</sub>	-46 to -47	dI2	$Ammc$
CeTl(b)	-53 to -60	cP2	$Fm\bar{3}m$
		(or cF2)	$Fm\bar{3}m$
CeTl(c)	-53 to -60	cP2	$F4/mmm$
Ce <sub>2</sub> Tl <sub>3</sub>	-70 to -71	cC32	$Cmcm$
CeTl <sub>4</sub>	81	cF4	$Fm\bar{3}m$
(RTl)	100	cF2	$Fm\bar{3}m$
(αTl)	100	bP2	$P6_3/mmc$

(a) A cF4-cF4 order-disorder transformation in this phase has been suggested. (b) Cubic structure presumed to be room- and high-temperature phases. (c) Tetragonal structure presumed to be low-temperature phase.

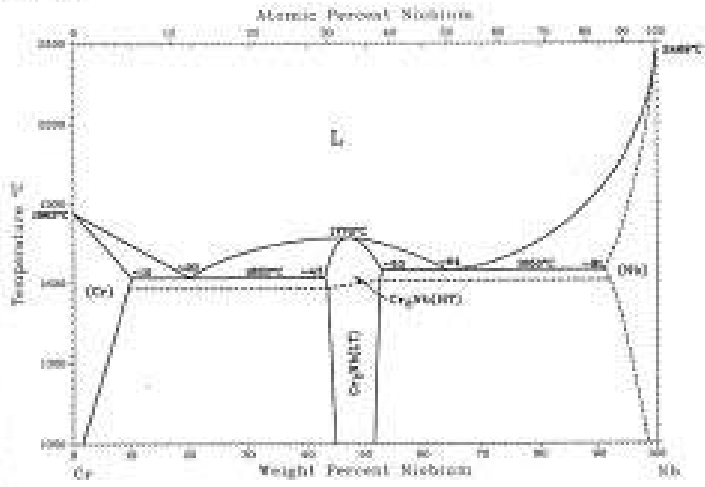
### Ce-Zn



H. Okamoto, 1990

Phase	Composition, wt% Zn	Pearson symbol	Space group
(δCe)	0	cF2	$Fm\bar{3}m$
(γCe)	0	cF4	$Fm\bar{3}m$
(βCe)	0	bF4	$P6_3/mmc$
(αCe)	0	cF8	$Fm\bar{3}m$
CeZn	31.8	cP2	$Fm\bar{3}m$
Ce <sub>2</sub> Zn	48.3	cF12	$Fm\bar{3}m$
Ce <sub>3</sub> Zn	53	cC16	$Cmcm$
Ce <sub>4</sub> Zn <sub>3</sub>	63.2	cF28	$Fm\bar{3}m$
Ce <sub>5</sub> Zn <sub>4</sub>	67.6	bP142	$P6_3/mmc$
Ce <sub>6</sub> Zn <sub>5</sub>	70.0	AP6	$P6_3/mmc$
Ce <sub>7</sub> Zn <sub>6</sub>	77	dI100	$F4/mmm$
Ce <sub>8</sub> Zn <sub>7</sub>	79.9	bP19	$R\bar{3}m$
Ce <sub>9</sub> Zn <sub>8</sub>	83.8	dF8	$F4/mmm$
(Zn)	100	bP2	$P6_3/mmc$

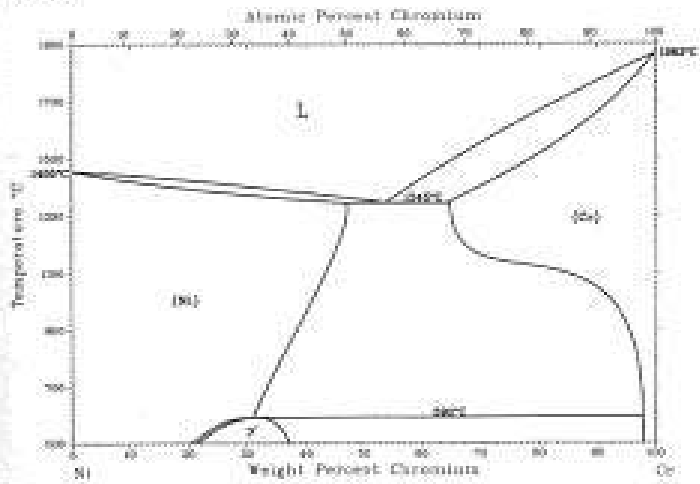
**Cr-Nb**



M. Venkatraman and J.P. Neumann, 1986

Phase	Composition, wt% Nb	Pearson symbol	Space group
(Cr)	0 to ~10	cF2	<i>Im</i> $\bar{3}m$
Cr <sub>2</sub> Nb (HT)	~43 to ~53	hP12	<i>P6<sub>3</sub>/mmc</i>
Cr <sub>2</sub> Nb (LT)	43 to 53	cF24	<i>Fd</i> $\bar{3}m$
(Nb)	~91 to 100	cF2	<i>Im</i> $\bar{3}m$

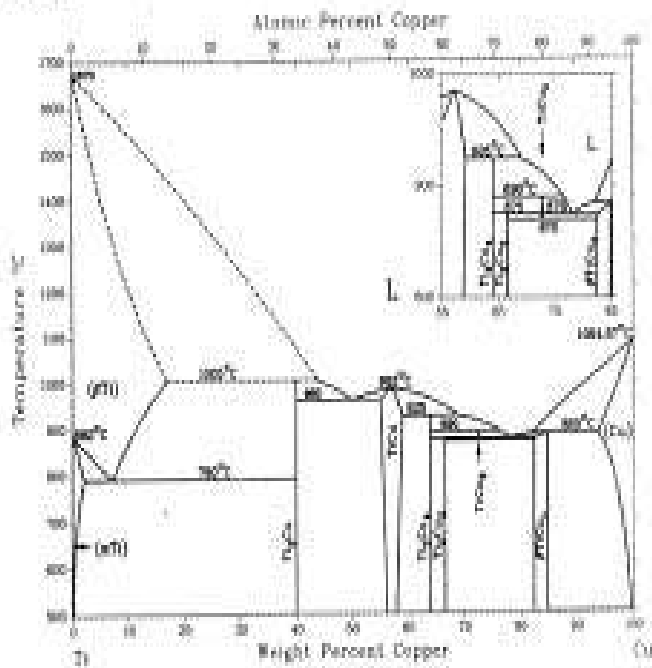
**Cr-Ni**



F. Nash, 1991

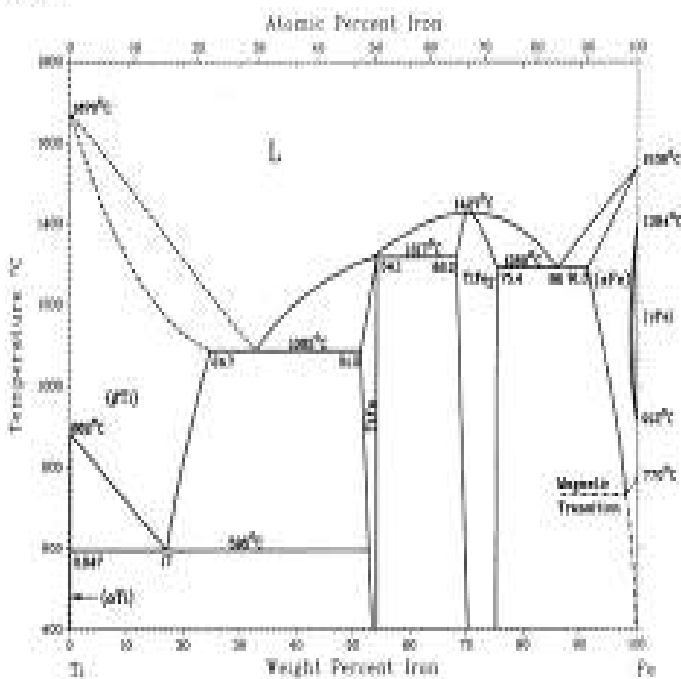
Phase	Composition, wt% Cr	Pearson symbol	Space group
(Ni)	0 to 47.0	cF4	<i>Fm</i> $\bar{3}m$
Ni <sub>3</sub> Cr or $\gamma'$	21 to 37	cF8	<i>Fm</i> $\bar{3}m$
(Cr)	85 to 100	cF2	<i>Im</i> $\bar{3}m$
<b>Metastable phases</b>			
$\sigma$	~28	cP30	<i>P4<sub>3</sub>/mmn</i>
$\delta$	100	cF8	<i>Fm</i> $\bar{3}m$

Cu-Ti



Phase	Composition, wt% Cu	Pearson symbol	Space group
(αTi)	0 to 2.1	hP1	P6 <sub>3</sub> /mmc
(βTi)	0 to 17.2	cI2	Ic3m
Ti <sub>2</sub> Cu	10.9	hP	I4/mmm
TiCu	55 to 59	hP4	P4/mmm
Ti <sub>3</sub> Cu <sub>4</sub>	63.9	hP14	I4/mmm
TiCu <sub>2</sub>	67	hP10	P4/mmm
TiCu <sub>3</sub>	72.7	oC12	Amc2
TiCu <sub>4</sub>	83 to 84.9	oP20	Fm3m
αTiCu <sub>4</sub>	83 to 84.9	hI0	I4/m
(Cu)	94 to 100	cF4	Fm3m
<b>Metastable phases</b>			
TiCu <sub>1</sub>	...	hP8	Fm3m
β*	...	hP2	P4/mmm

Fe-Ti



Phase	Composition, wt% Fe	Pearson symbol	Space group
(αTi)	0 to 0.067	hP2	P6 <sub>3</sub> /mmc
(βTi)	0 to 24.7	cI2	Ic3m
TiFe	51.3 to 54.1	cP2	Pncm
TiFe <sub>2</sub>	68.2 to 73.4	hP12	P6 <sub>3</sub> /mmc
(αFe)	91.3 to 100	cI2	Ic3m
(γFe)	99.5 to 100	cF4	Fm3m
β	(a)	hP3	P6 <sub>3</sub> /mmc

(a) Metastable phase

## المعالجة ( المعاملة ) الحرارية للفولاذ

المقصود بالمعالجة الحرارية هو رفع درجة حرارة المعدن أو السبيكة إلى درجة حرارة معينة وتثبيت درجة الحرارة لفترة زمنية ملائمة ومن ثم التبريد بمعدل تبريد معين فهذه العوامل الثلاثة:

١/ درجة الحرارة التي يسخن إليها المعدن.

٢/ زمن تثبيت درجة الحرارة.

٣/ معدل التبريد.

لها تأثير بالغ على الخواص المراد تحقيقها من المعالجة الحرارية لذا ينبغي أن تحدد هذه العوامل بصورة دقيقة؛ وأن أي خطأ في تحديد هذه العوامل يؤدي إلى عدم تحقيق الخواص المطلوبة والغاية المتوخاة من المعالجة الحرارية.

### أهداف المعالجة الحرارية:

يمكن القول إن المعالجة الحرارية للمعادن والسبائك تهدف بشكل عام إلى:

أ- تحسين الخواص التشغيلية والتشكيلية للمعدن وذلك بزيادة لدونته مما يسمح بزيادة

إنتاجية التشغيل وعدم حدوث تشوهات أثناء عمليات التشكيل مثل الكبس

والسحب... الخ.

ومن المعتاد أن يتم ذلك على المواد الخام ونسف المصنعة قبل وأثناء عمليات التشغيل و

التشكيل.

ب- إكساب المعدن الخواص النهائية المرغوب فيها ويتم ذلك على قلع العمل المنتهية مثل

(التصليد، التصليد الغلافي).

ومن الممكن أن تتبع هذه العملية عمليات تشطيب نهائية لإزالة بعض تشوهات المعالجة

الحرارية.





محاضرات علم المواد وخواصها - قسم الدكتور هادي معلا

السنة الثانية - قوى

المحاضرة الثالثة

## السبائك المعدنية ومخططات الإتران الحراري

**مقدمة :**

لأن الخواص الطبيعية للمعادن النقية غير مناسبة في أغلب الأحيان للتطبيق العملي، فإن التركيبة من خليط من معادن مختلفة أو خليط من معادن وعناصر لا معدنية، تسمى سبيكة معدنية، تستخدم لتفي بالأغراض العملية. تصمم السبيكة عادة لتفي بأغراض هندسية معينة مثل المتانة والصلادة ومقاومة التآكل وزيادة درجة حرارة الانصهار... الخ. قد تكون السبيكة خليطاً من عنصرين فتسمى سبيكة ثنائية وقد تكون خليط من ثلاث عناصر فتسمى سبيكة ثلاثية... الخ. في السبائك المعدنية عموماً يكون العنصر الأساسي معدناً والعناصر الأخرى تكون معادن أو معادن.

يمكن أن تكون مكونات السبائك عند التجمد إما:

1) خليطاً ميكانيكياً (البنيان)، أو

2) محلول صلب، أو

3) مركباً كيميائياً

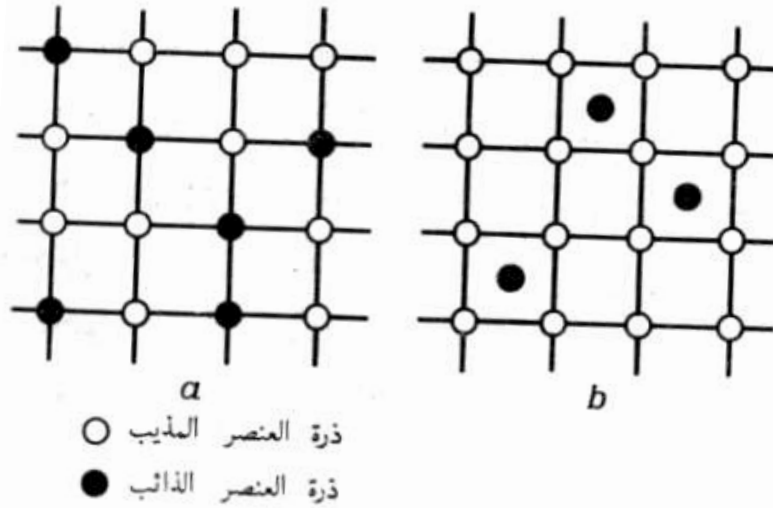
وتبعاً لذلك يختلف بنيان السبائك المختلفة في الحالة الصلبة .

**1. البنيان :** عبارة عن خليط من البلورات ، أطوار منفصلة للعناصر المكونة لا تذوب في الحالة الصلبة . ويسمى هذا البنيان عادة بالخليط الميكانيكي. ومن أمثلة هذه السبائك سبائك الرصاص + القصدير + الزنك وكذلك الألومنيوم + السليسيوم وغيرها.

**2. المحلول الصلب :** ويتميز عن الخليط الميكانيكي بكونه وحيد الطور، وبأن له شبكة بللورية واحدة بها ذرات جميع مكونات السبيكة . ويمكن أن يكون وضع الذرات في الشبكة البللورية لمحلول الصلب من نوعين إما بالإحلال أو بالتغلغل:

- في الحالة الأولى تحل ذرات العنصر المذاب محل ذرات العنصر المذيب كما في حالة المحلول الصلب للنحاس في النيكل.

- في الحالة الثانية فإن ذرات العنصر المذاب تتخذ أماكنها بين ذرات العنصر المذيب التي تستقر في أركان الشبكة الذرية كما هو الحال مع المحلول الصلب للكربون في الحديد .



وضع الذرات (الأيونات) في المحاليل الصلبة:

a - محلول صلب بالاحلال ، b - محلول صلب بالتغلغل.

### 3. المركب الكيميائي :

تكون بعض العناصر التي توجد عادة في أماكن متباعدة من جدول مندلييف الدوري، مركبات كيميائية تختلف في خواصها عن العناصر المكونة . فالمركبات الكيميائية يمكن ان تكون إما ذات تكافؤ معتاد، مثل  $Mg_2Sn$ ,  $Mg_2Si$ ,  $Mg_3Bi_2$  أي ذات تركيب محدد ثابت، أو أن تكون من النوع الالكتروني الذي يتميز بالنسبة الثابتة بين عدد الكترونات التكافؤ وعدد الذرات في المركب ، مثل  $CuZn_3$  وبه تكون هذه النسبة كنسبة 2:3 أو مثل  $Cu_5Zn_8$  و النسبة به كنسبة 13:21 أو  $CuZn_3$  حيث تساوي هذه النسبة 4:7.

## 1-4 الذوبان :

يحدث الذوبان في العناصر المكونة للسبيكة بمعنى : تداخل ذراتها واختلاط بعضها ببعض بصورة متجانسة في الحالة المنصهرة وقد يمتد هذا الاختلاط بصورة تامة أو محددة في الحالة المتجمدة. عادة فان الفلزات في الحالة المتجمدة تقبل الذوبان في بعضها بصورة تامة إذا حققنا واحدا أو أكثر من هذه الشروط:

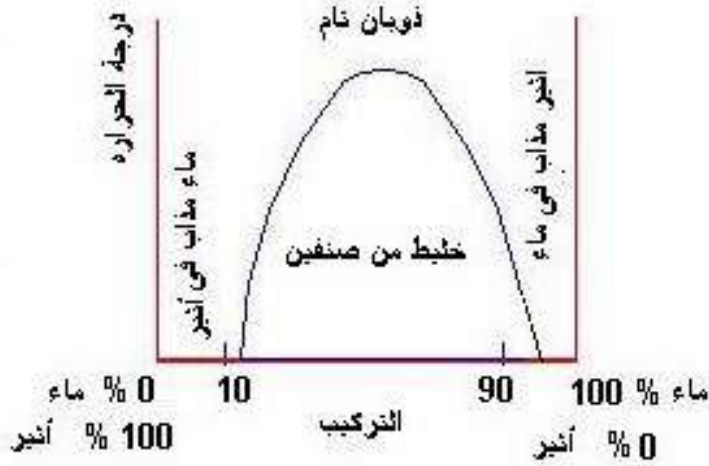
1- تقارب حجم الذرات

2- تساوي التكافؤ

3- تشابه نوع الخلية

إذا اختلفت هذه الشروط فإن الذوبان يحدث جزئيا. عموما فإن الذوبان يعتمد على درجة الحرارة.

لتوضيح هذه الفكرة سنأخذ مثلا من الإيثر و الماء.



الشكل (1-4): منحنى ذوبان الماء و الإيثر

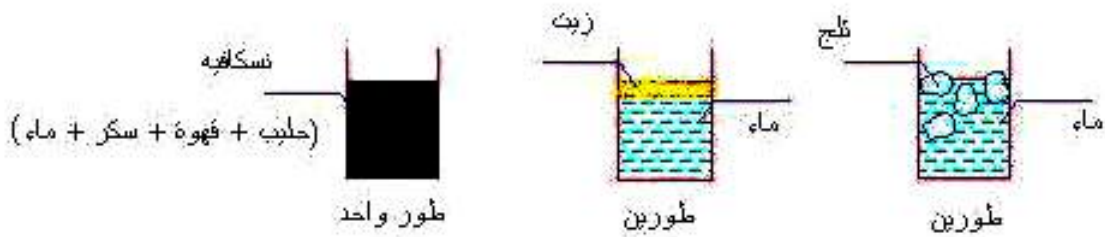
إذابة الإيثر في الماء في درجة قريبة من الصفر المئوي فإن الماء لا يذوب أكثر من 4% من الأثير وإذا حاولنا عند نفس درجة الحرارة إذابة الماء في الأثير لا نستطيع إذابة أكثر من 13% وبارتفاع درجة الحرارة، تزداد نسبة الذوبان. يوضح الشكل (1-4) منحنى الذوبان وهو خط يفصل بين الذوبان التام والذوبان الجزئي. في المساحة تحت المنحنى نجد مخلوطين وهما أثير مذاب في أثير فمثلا إذا خلطنا 50 % ماء و 50 % أثير قرب الصفر المئوي فإن الماء والأثير يقسمان نفسيهما بحيث:

1. جزء صغير من الماء يذوب في جزء كبير من الأثير بنسبة 13 %

2. جزء صغير من الأثير يذوب في جزء كبير من الماء بنسبة 4% والنهية نجد خليطين.

## 4-2- الطور:

يعرف الطور بأنه: جزء متجانس من المادة له خواصه الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية المميزة. مثال لذلك الثلج في الماء هما طوران لأنه يمكننا تمييز الماء عن الثلج رغم أن لهما نفس التركيب الكيميائي. الزيت والماء عند خلطهما والانتظار لفترة يطفو الزيت فوق الماء ويمكن تمييزهما ولذلك فهما طوران. المثال الثالث هو النسكافيه (القهوة بالحليب) فهي طور واحد رغم احتوائها على عدة عناصر (قهوة-سكر-حليب-ماء) إلا أنها امتزجت مع بعضها بحيث لا يمكن تمييز هذه العناصر وأصبحت طوراً اسمه النسكافيه. شكل (4-2) يوضح هذه الأمثلة.



الشكل (4-2) : أمثلة توضح مفهوم الأطوار

## 4-3- مخططات الإلتزان الحراري :

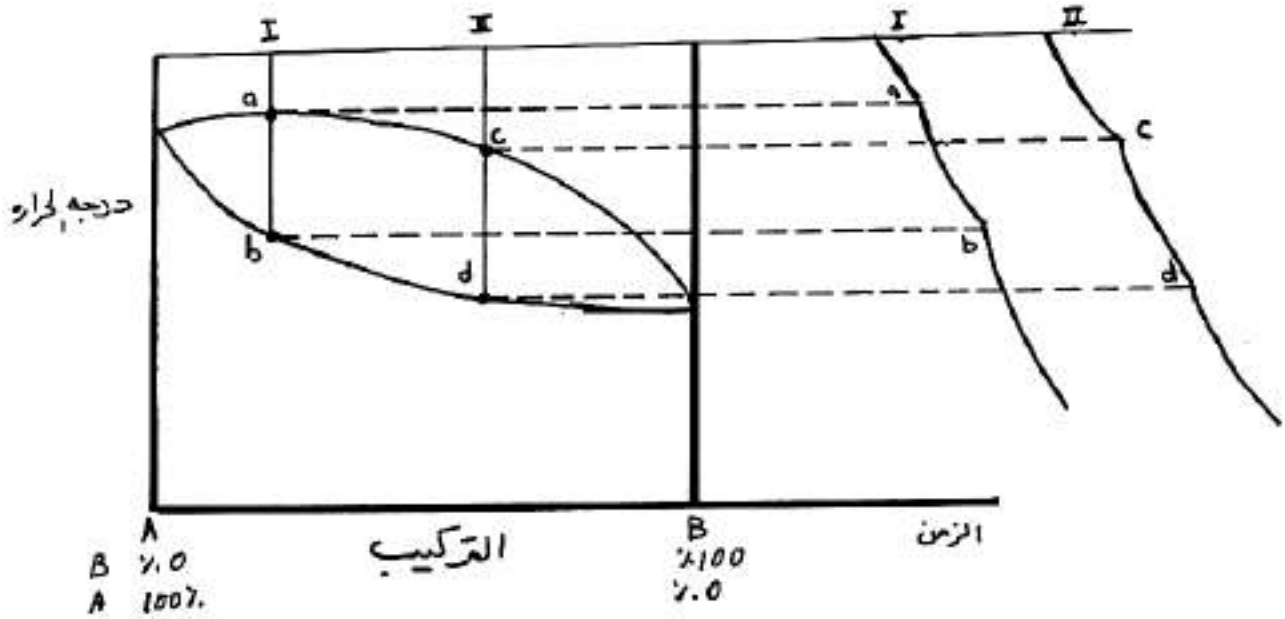
لدراسة السبائك دراسة علمية سليمة، لابد من دراسة ما يسمى بمخططات الإلتزان الحراري وسوف نقتصر هنا على مخططات الإلتزان الحراري للسبائك الثنائية. يمكن تعريف مخطط الإلتزان الحراري بأنه تمثيل تخطيطي للأطوار المستقرة عند درجات الحرارة المختلفة والتركيبات المختلفة للسبيكة. في أحيان قليلة يؤخذ الضغط في الاعتبار ولكنه في معظم الأحيان يهمل وفي دراستنا هنا سوف نهمل تأثير الضغط .

### 4-3-1 منحنيات التبريد ومخطط الإلتزان الحراري:

لرسم مخطط الإلتزان الحراري لسبيكة ما فإنه لابد من إيجاد منحنيات التبريد للسبيكة وهي ببساطة عمليات صهر للسبيكة بتركيبات مختلفة من عناصرها ثم نتركها تبرد ببطء ونرسم منحنيات تغير الحرارة مع الزمن (منحنيات التبريد) للتركيبات المختلفة. عند وجود تغير في حالة السبيكة (أطوارها) يظهر ذلك على شكل تغير فجائي في معدل التبريد. تسجل درجات الحرارة التي حدث عندها التغيرات مع تركيب

السيبكية وتوضع هذه النقاط على محورين. المحور الأفقي هو تركيب السببكية والمحور الرأسي هو درجة الحرارة وبإيصال هذه النقاط يمكن رسم مخطط الإتنان الحراري. شكل (3-4) يوضح طريقة رسم مخطط الإتنان الحراري.

كلمة اتنان هنا تعني أن المادة تصل إلى حالة الإتنان عند درجة حرارة معينة أي أنه تحدث كل التغيرات الواجب حدوثها وهذا يعلل عملية التبريد ببطء.

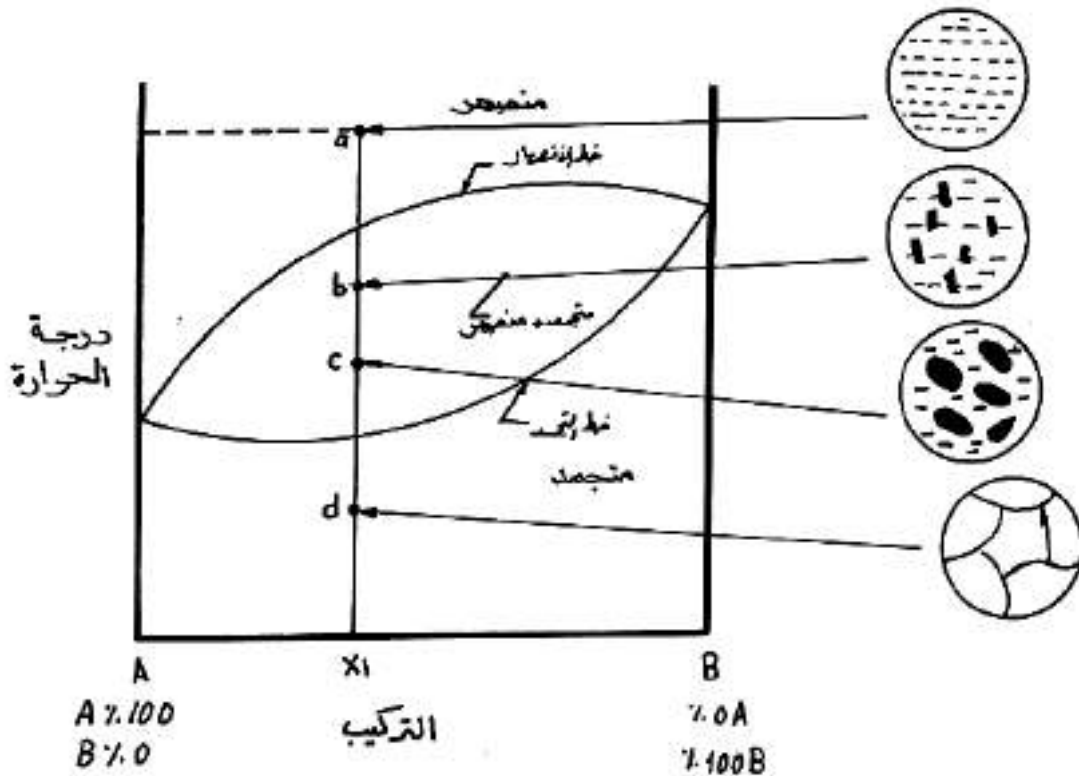


الشكل (3-4) : مثال لطريقة رسم مخطط الإتنان الحراري من منحنيات التبريد

بالإضافة إلى شكل مخطط الإتنان الحراري، فإنه يجب فحص عينات للبيئة الدقيقة للأطوار المختلفة لكي تبقى دراسة السبائك متكاملة. يمثل الشكل (4-4) مخطط للإتنان الحراري لمادتين تامتين الذوبان كالنيكل والنحاس مثلاً. هناك ما يسمى بخط الانصهار وهو الخط الذي أعلاه لا يوجد غير منصهر وخط التجمد وهو الخط الذي أسفله لا يوجد غير متجمد وما بينهما يكون خليط من منصهر ومتجمد. عند النقطة (a) تكون السببكية كلها منصهر وعند النقطة (b) يكون هناك بعض المتجمد والباقي منصهر. عند النقطة (c) تزيد نسبة المتجمد إلى المنصهر. عند النقطة (d) تكون كل السببكية متجمدة.

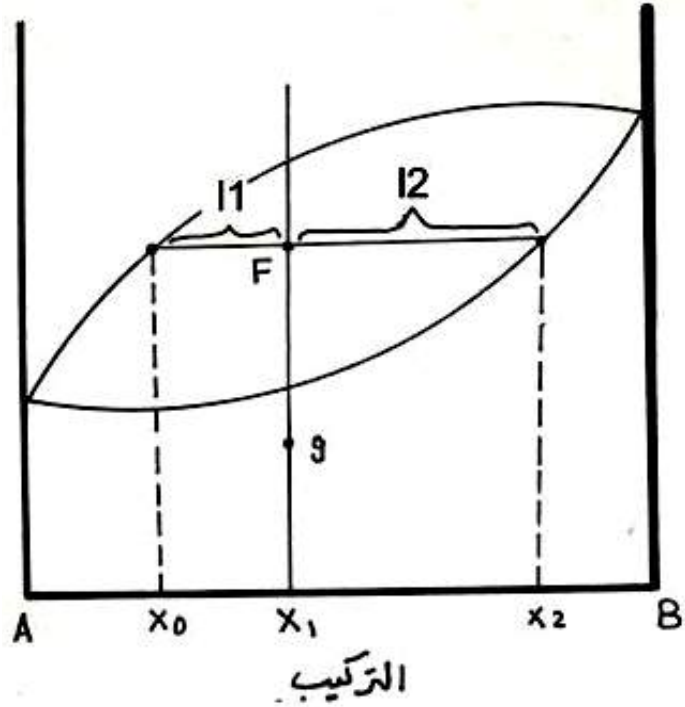
## 2-3-4 قاعدة الخط الأفقي :

في شكل (3-4) هناك طور واحد عند النقطة a, b وهناك طوران عند النقاط c, d. عند وجود طور واحد فإن نسبة الأطوار تكون 100 % والتركيب للطور هو نفس تركيب السبيكة. عند وجود أكثر من طور فإن هناك نسبة من كل طور له تركيبية الخاص الذي يختلف عن تركيب السبيكة ولإيجاد ذلك نتبع قاعدة الخط الأفقي كما هو موضح بشكل (4-5).



الشكل (4-4) : مخطط الإيزان الحراري لمادتي تامتي الذوبان

في هذا الشكل السبيكة مكونة من عنصرين a, b. عند الطرف الأيسر من المحور الأفقي يكون تركيب السبيكة 100% A أي 0% B وبالتالي يكتب الحرف A. في الطرف الأيمن يكون تركيب السبيكة 100% B و 0% A وبالتالي يكتب الحرف B. ما بينهما هو خليط من الاثنين (X).



الشكل (5-4) : قاعدة الخط الأفقي

عند النقطة F (تركيب  $x_1$ ) هناك طوران هما سائل ومتجمد. لإيجاد نسبة الأطوار وتركيب الأطوار، نرسم من نقطة F خطاً أفقياً ليتقاطع مع خط المنصهر وخط المتجمد ويكون تركيب السائل هو  $x_0$  وتركيب المتجمد هو  $x_2$  والنسبة بينهما هي:

$$\frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0} = \frac{l_1}{l_2} = \text{نسبة المتجمد}$$

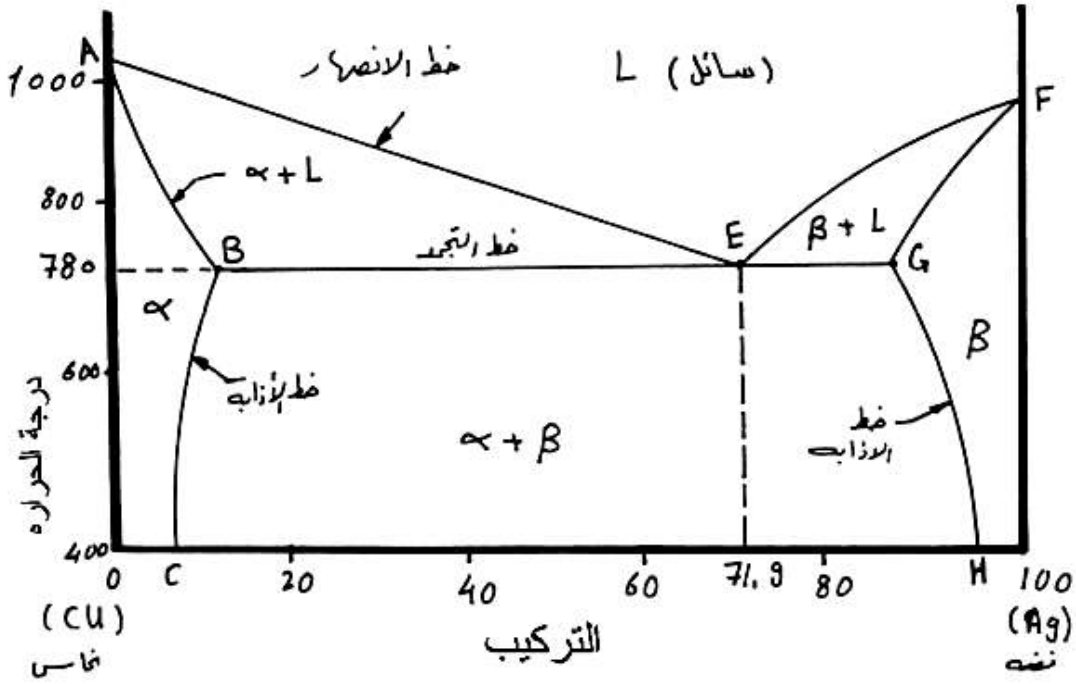
$$\frac{x_2 - x_0}{x_2 - x_0} = \frac{l_2}{l_1} = \text{نسبة السائل}$$

حيث أن  $l$  هي المسافة بين نقطتي تقاطع الخط الأفقي مع الخط المنصهر وخط المتجمد ( $l = l_1 + l_2$ ). تقسم هذه المسافة عند التركيب  $x_1$  إلى مسافتين  $l_1$  المسافة القريبة من السائل و  $l_2$  المسافة القريبة من المتجمد أي أن نسبة السائل والمتجمد تحسب بالمسافات العكسية وهذه قاعدة عامة.



### 3-3-4 مخطط اتزان حراري لمادتين تامتي الذوبان في الحالة السائلة ومحدودي الذوبان في الحالة المتجمدة :

المثال كما هو موضح بشكل ( 6-4) وهو شكل تقريبي لمخطط الإلتزان الحراري للنحاس والفضة. ويعرف هذا المخطط بالمخطط الثنائي اليوتكتيكي للاتزان الحراري. أما كلمة ثنائي فلأنه يتكون من مركبين (الفضة والنحاس) وكلمة يوتكتيكي هذه لما يحصل عند النقطة E وهي ما تسمى بنقطة اليوتكتيك وهذا ما سنتناوله بالشرح لاحقاً.



الشكل (6-4): شكل تقريبي لمخطط الإلتزان الحراري للنحاس و الفضة

هناك عدة سمات لهذا المخطط وهي :

هناك ثلاث أطوار موجودة في المخطط وهي السائل و  $\alpha$  و  $\beta$ . الطور  $\alpha$  هو محلول متجمد غني بالنحاس وهو يحتوي على نسبة من الفضة كمذاب في هذا المحلول. الطور  $\beta$  وهو غني بالفضة والنحاس مذاب فيه.

يمثل الخط cba حدود إذابة الفضة في النحاس كما يمثل الخط hgf حدود إذابة النحاس في الفضة.

تكون نسبة الإذابة (سواء فضة في نحاس أو نحاس في فضة) أقصاها على الخط الأفقي beg

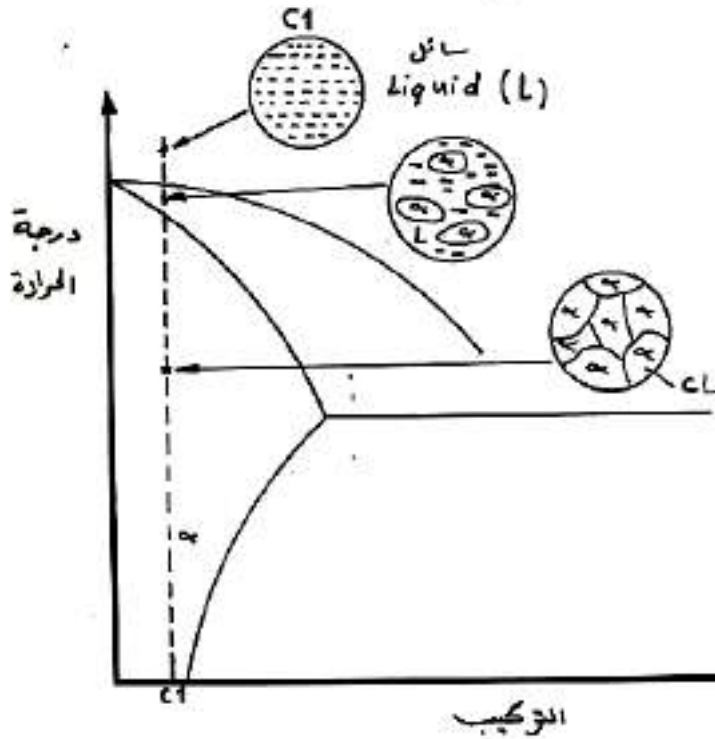
تكون أقل درجة انصهار (على نفس الخط beg) عند نقطة e. وهذا الخط الأفقي هو جزء من خط

التجمد.

هناك ثلاث مناطق حيث يوجد طوران فالمنطقة AEB بها  $\alpha+1$  و المنطقة EGF بها  $\beta+1$  والمنطقة تحت الخط CBEGH بها  $\beta+\alpha$  و يتم تعيين كمية كل طور و تكوينه بنفس قاعدة الخط الأفقي السابقة .

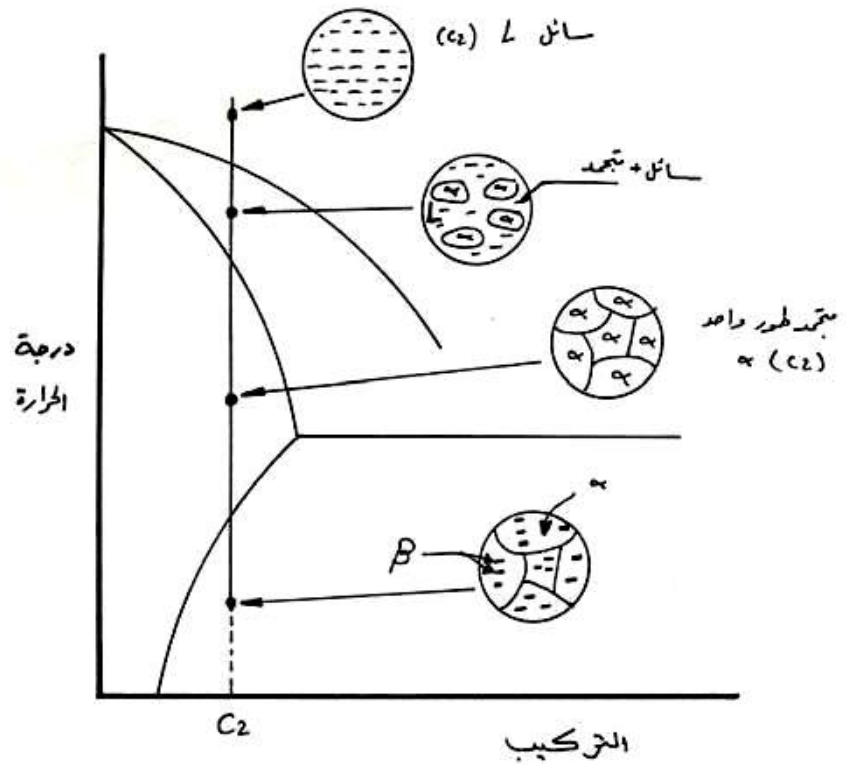
النقطة E يلتقي عندها ثلاثة أطوار  $\beta, \alpha, 1$  و يكون عندها أقل درجة انصهار و تسمى نقطة اليوتيكتيك وفي هذه الحالة ( أي في هذا المخطط ) فإن هذه النقطة تحدث عند درجة حرارة  $780\text{ }^{\circ}\text{C}$  و تركيب  $71.9\%$  فضا و إذا لاحظنا فإن هناك ثلاثة أطوار تتجمع عند هذه النقطة. الشكل (4-7) يوضح البنية الدقيقة عند تركيب C1

( الذي ينتهي بطور واحد  $\alpha$  ) عند درجات الحرارة المختلفة .

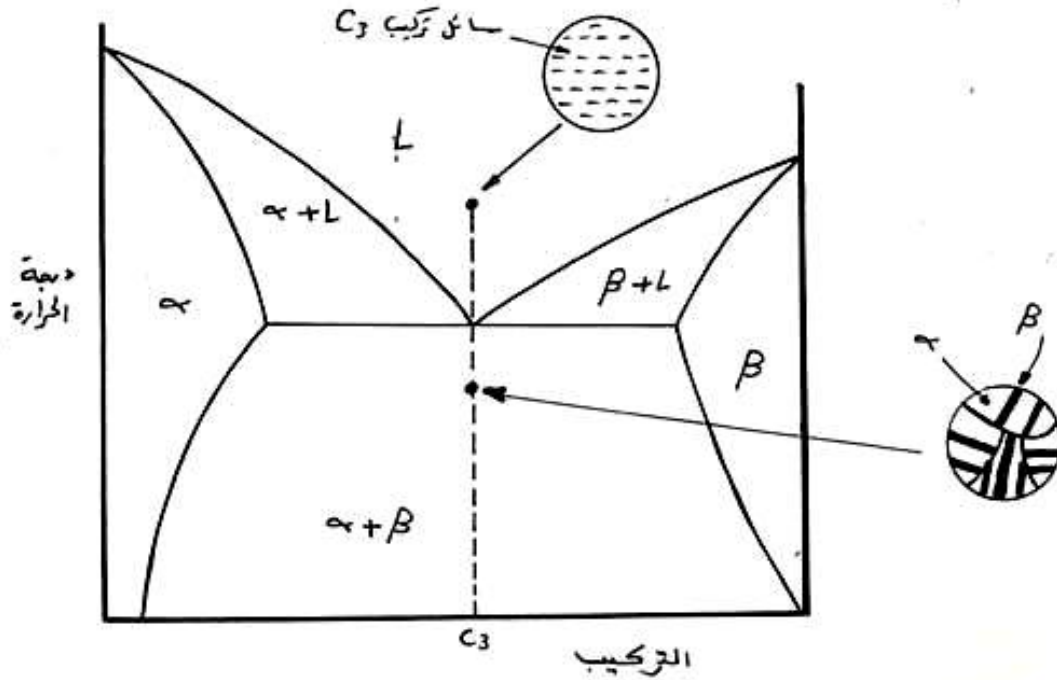


الشكل (4-7) : البنية الدقيقة عند تركيب C1 الذي ينتهي بطور واحد

يوضح الشكل (4-8) البنية الدقيقة عند تركيب C2 الذي ينتهي بطورين ( $\alpha, \beta$ ) عند درجات الحرارة المختلفة، كما يوضح الشكل (4-9) البنية الدقيقة عند التركيب اليوتيكتيكي .



الشكل (8-4) : البنية الدقيقة عند تركيب  $C_2$  الذي ينتهي بطورين

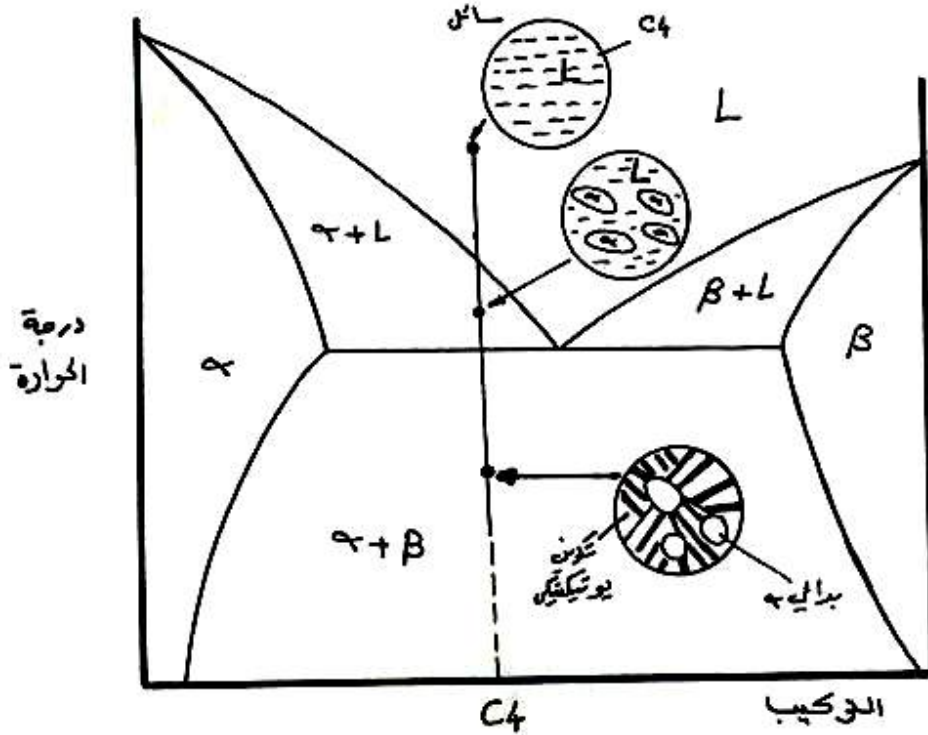


الشكل (9-4) : البنية الدقيقة عند التركيب اليوتكتيكي

عند درجات حرارة أقل من التيوكتيك نجد أن البنية الدقيقة مميزة الشكل فهي على شكل مخطط و

تسمى لاملاي (LAMELLAE) .

يوضح شكل (4-10) البنية الدقيقة عند تركيب C4 (الذي ينتهي بطورين  $\alpha$  ,  $\beta$  ولا يمر بالطور  $\alpha$ ) عند درجات الحرارة المختلفة. عند درجات حرارة أقل من اليوتيكتك نجد أن اللاملاي (lamellae) موجودة بالإضافة إلى  $\alpha$  ابتدائي. يمكن استنتاج البنية الدقيقة لباقي المخطط مع الأخذ في الاعتبار سيادة الطور  $\beta$  بدلا من  $\alpha$ .

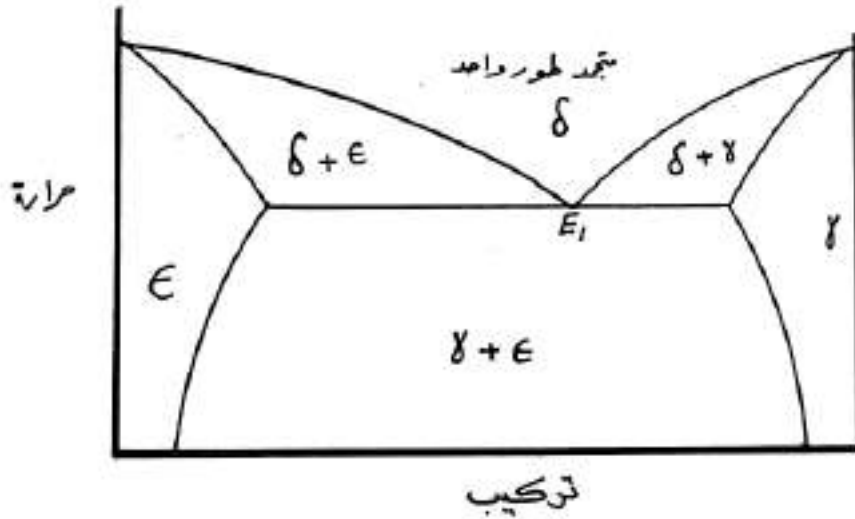


الشكل (4-10): البنية الدقيقة عند تركيب C4 الذي ينتهي بطورين  $\alpha$  ,  $\beta$  ولا يمر بالطور  $\alpha$

كما أنه يوجد تركيب يوتيكتيكي (نقطة بها ثلاث أطوار). هناك مخططات اتزان حرارية ثنائية أخرى فيها نقاط ذات ثلاث أطوار مثل

## 1- التركيب اليوتيكثويدي :

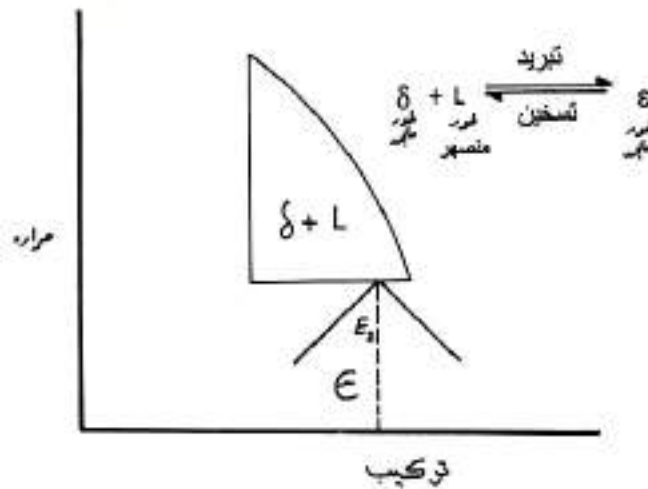
كما هو موضح في الشكل (4-11) والفرق عن التركيب اليوتيكثويكي هو أن جميع أطواره متجمدة. فالتركيب اليوتيكثويكي يكون سائلا فوق حرارة اليوتيكثيك ويكون طورين متجمدين تحت حرارة اليوتيكثيك. أما التركيب اليوتيكثويدي فيكون طوراً واحداً متجمداً فوق حرارة اليوتكتوئيد ويتحول إلى طورين متجمدين تحت اليوتيكثويدي.



الشكل (4-11) : التركيب اليوتكتويدي

## 2- التركيب البريتكتيكي :

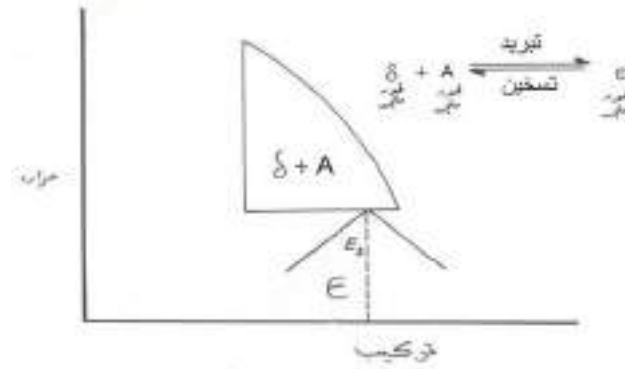
كما هو موضح بالشكل (4-12) فهو عبارة عن طورين أحدهما سائل فوق درجة حرارة البريتكتيكي وطور واحد متجمد تحت درجة حرارة البريتكتيكي.



الشكل (4-12): التركيب البريتكتيكي

## 3- التركيب البريتكتويدي :

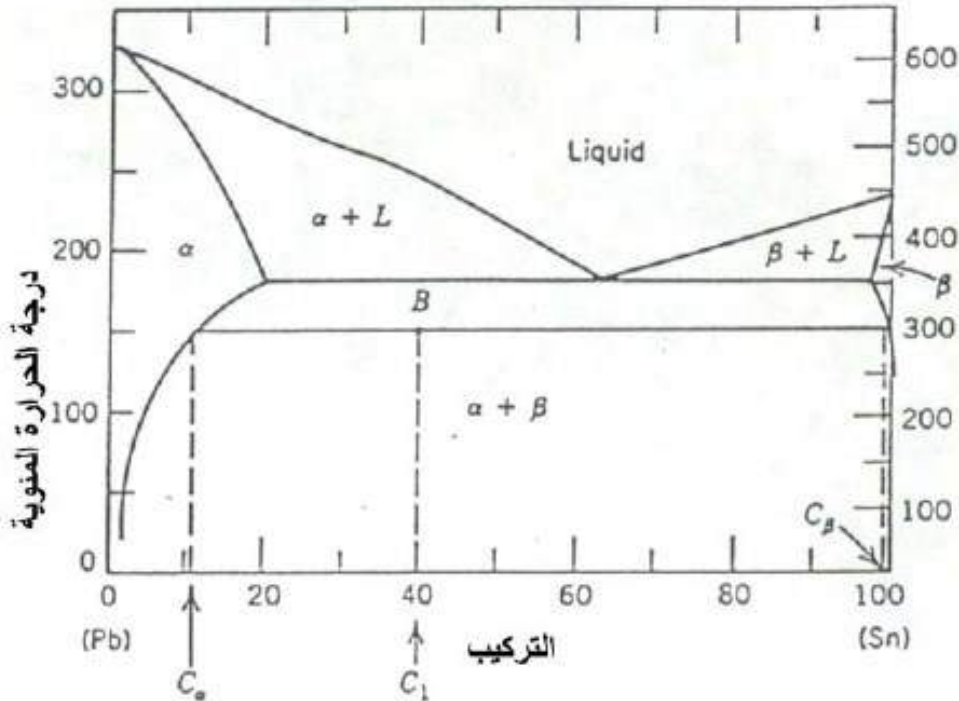
كما هو موضح بشكل (4-13) فهو عبارة عن طورين متجمدين في الحرارة فوق البريتكتويدي وطور واحد في درجة حرارة أقل من البريتكتويدي.



الشكل (4-13) : التركيب البريتكتويدى

مثال : في منحني الرصاص pb و القصدير Sn المبين في الشكل (4-14) عند تركيب 40% Sn ودرجة حرارة 150 درجة مئوية أوجد:

1. تركيب كل من الطورين  $\alpha$  و  $\beta$  ، 2. نسبة أوزان كل طور



الشكل (4-14) : مخطط الإتزان الحراري للقصدير و الرصاص

**الحل:** كما هو مبين على الشكل و بتطبيق قاعدة الخط الأفقي المذكورة سابقا نجد :

تركيب  $\alpha$  يساوي 89 % Pb و 11% Sn

تركيب  $\beta$  يساوي 1 % Pb و 99 % Sn

$$\alpha = \frac{99 - 40}{99 - 11} = 0.67 \text{ نسبة الطور}$$

$$\beta = \frac{40 - 11}{99 - 11} = 0.33 \text{ نسبة الطور}$$

## المعالجة ( المعاملة ) الحرارية للفولاذ

المقصود بالمعالجة الحرارية هو رفع درجة حرارة المعدن أو السبيكة إلى درجة حرارة معينة وتثبيت درجة الحرارة لفترة زمنية ملائمة ومن ثم التبريد بمعدل تبريد معين فهذه العوامل الثلاثة:

١/ درجة الحرارة التي يسخن إليها المعدن.

٢/ زمن تثبيت درجة الحرارة.

٣/ معدل التبريد.

لها تأثير بالغ على الخواص المراد تحقيقها من المعالجة الحرارية لذا ينبغي أن تحدد هذه العوامل بصورة دقيقة؛ وأن أي خطأ في تحديد هذه العوامل يؤدي إلى عدم تحقيق الخواص المطلوبة والغاية المتوخاة من المعالجة الحرارية.

### أهداف المعالجة الحرارية:

يمكن القول إن المعالجة الحرارية للمعادن والسبائك تهدف بشكل عام إلى:

أ- تحسين الخواص التشغيلية والتشكيلية للمعدن وذلك بزيادة لدونته مما يسمح بزيادة

إنتاجية التشغيل وعدم حدوث تشوهات أثناء عمليات التشكيل مثل الكبس

والسحب... الخ.

ومن المعتاد أن يتم ذلك على المواد الخام ونسف المصنعة قبل وأثناء عمليات التشغيل و

التشكيل.

ب- إكساب المعدن الخواص النهائية المرغوب فيها ويتم ذلك على قلع العمل المنتهية مثل

(التصليد، التصليد الغلافي).

ومن الممكن أن تتبع هذه العملية عمليات تشطيب نهائية لإزالة بعض تشوهات المعالجة

الحرارية.





## التآكل فى المعادن

### تعريف التآكل :-

يعرف التآكل بأنه التلف ( جزئى أو كلى ) الذى يحدث للفلز أو السبيكة من حيث المظهر أو الأداء بسبب التفاعل الذى يحدث بين الفلز أو السبيكة مع الأجواء المحيطة به سواء كانت غازية أو سائلة أو هو تلف المعدن نتيجة تدهور فى خواصه الطبيعية أثر التفاعلات التى تحدث له فى التربة المحيطة .

يعتبر التآكل احدى المشاكل التى تتعرض لها و تعاني منها الكثير من المنشآت البترولية كخطوط البترول و الغاز و الخزانات و أبراج التقطير كما يحدث فى الكثير من القطاعات الأخرى الهامة كقطاعات الصناعة و النقل البحرى و المعدات و المنشآت العسكرية و يحدث التآكل تلف شديد فى المنشآت مما ينتج عنه تكاليف ضخمة تتمثل فى فواقد الانتاج و بالتالى قلة الكفاءة بالإضافة إلى تكاليف الإحلال و تطبيق أساليب مقاومة التآكل و هذه التكاليف تشمل تكاليف مباشرة و تكاليف غير مباشرة كالتالى :-

### أولاً : التكاليف المباشرة :

- 1- انتهاء العمر الافتراضى للمعدة ( تلف كلى ) .
- 2- تكاليف عملية الحماية من التآكل و تنقسم إلى :
  - زيادة التصميم : عملية الزيادة فى التصميم تكون متمثلة فى زيادة السمك عن الحد العادى و ذلك لإطالة عمر المعدة للحماية من التآكل كما أن عملية الزيادة فى التصميم تؤدي إلى زيادة المكان المطلوب للمعدة و هذا فى حد ذاته يعتبر زيادة فى التكاليف .
  - تعديل مواد التصنيع باستخدام مواد أكثر مقاومة للتآكل و أعلى تكلفة .
  - تكاليف المواد المانعة للتآكل .
  - تكاليف الحماية الكاثودية .

### ثانياً : تكاليف غير مباشرة :

- 1- نقص الانتاج :عمليات الاصلاح و التجديد التى تجرى للأجزاء المتآكلة من المعدات تحتاج إلى إيقاف المصنع أو الوحدة لمدة معينة حتى إذا كان سعر تلك الأجزاء صغيراً كما أن زيادة معدل التآكل يؤدي فى كثير من الأحيان إلى حدوث إيقافات إضطرارية مما يؤدي إلى زيادة عمليات الصيانة للمعدات ووقف عمليات الإنتاج لمدد أطول من اللازم و هذا التوقف يؤدي إلى زيادة التكاليف و نقص الإنتاج .
- 2- تقليل الكفاءة : تؤدي عمليات التآكل إلى تقليل كفاءة المعدات أو الخطوط و ذلك نتيجة تراكم نواتج التآكل حيث يؤدي ذلك فى بعض الأحيان إلى زيادة القوة المطلوبة لدفع السائل داخل الخطوط و كذلك تقليل الحيز اللازم لمرور السائل و يمكن أن يؤدي تراكم التآكل إلى تقليل الانتقال الحرارى من خلالها أو إنتاج منتجات معينة .
- 3- التلوث بنواتج التآكل : بعض الصناعات مثل الصناعات الكيماوية أو صناعة الأغذية لا تسمح بتلوث منتجاتها بأكسيد المعدن و لتجنب هذا التلوث الناتج عن التآكل فإنه يتم تصنيع الأوعية و الخطوط من الصلب الذى لا يصدأ .
- 4- الفقد أو الخسارة العامة : التآكل يمكن أن يؤدي إلى حدوث خطورة على أرواح العاملين بالوحدة أو المصنع و هذه خسارة غير محسوبة فى التصميم و لكن يجب أن تؤخذ فى الاعتبار .

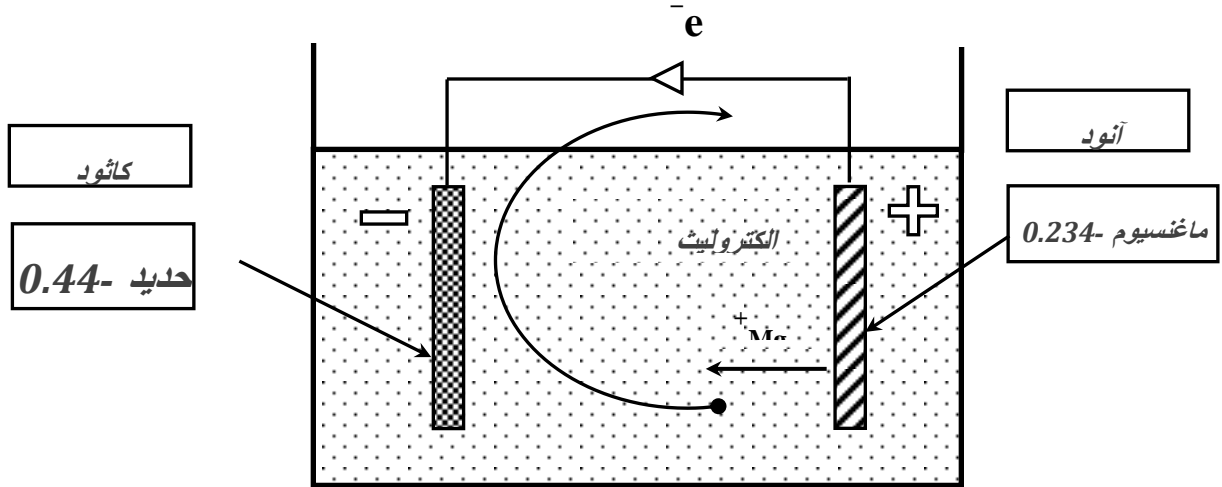
## ميكانيكية التآكل

أولاً : شروط التآكل : لكي يحدث التآكل فهناك شروط يجب توافرها لتكون خلية التآكل هذه الشروط هي :

- 1- لابد من وجود قطبي التفاعل ( الأنود - الكاثود ) .
  - 2- لابد من وجود فرق جهد كهربي بين الكاثود و الأنود لا يقل عن 50 مللي فولت ( هذا الفرق يتولد نتيجة لعدة أسباب مثل اختلاف التركيزات أو اختلاف المواد أو اختلاف نسب الأوكسجين ... الخ ) .
  - 3- لابد من وجود اتصال معدني أو مادي بين الأنود و الكاثود يساعد على مرور التيار الكهربي من خلاله .
  - 4- لابد من وجود وسط ينغمس به كلاً من الأنود و الكاثود و يجب أن تتوفر في هذا الوسط الموصلية الكهربية .
- في حالة توافر تلك الشروط مجتمعة تتكون خلية التآكل و يبدأ المعدن في التآكل و بذلك تبني نظريات منع التآكل على إحداث خلل في أحد الشروط السابقة بغرض منع حدوث التآكل كلية .

ثانياً : حدوث التآكل :

عند غمس قضيبين من الماغنسيوم و الصلب في وسط موصل للكهرباء ELECTROLYTE و عند توصيل القضيبين خارجياً بسلك يصبح قضيب الماغنسيوم أنود ANODE بينما قضيب الصلب يصبح كاثود CATHODE . حيث ينساب إلكترون  $e^-$  سالب الشحنة خلال سلك التوصيل من قضيب الماغنسيوم إلى قضيب الصلب و للاحتفاظ بحالة التوازن ينساب أيون موجب الشحنة  $Mg^+$  في الوسط الإلكتروليتي من قضيب الماغنسيوم متجه إلى قضيب الصلب و هكذا يحدث تآكل في قضيب الماغنسيوم و لا يحدث تآكل في قضيب الصلب .



## العوامل المؤثرة في اختلاف جهد المعدن :

عوامل تخص المعدن وهي :

1- طبيعة المعدن ( موقعه في السلسلة الكهروكيميائية ) .

2- تشطيب السطح .

3- درجة حرارة المعدن .

عوامل ترجع إلى المحلول و هي :

1- درجة تركيز المحلول .

2- درجة حرارة المحلول .

3- اختلاف التهوية .

## تصنيف عمليات التآكل ( Corrosion Processes )

إن التصنيف العام لظاهرة التآكل قد يركز على البيئة أو المسبب للهجوم بدلا من شكل الهجوم لذلك فإن التصنيف العام لتفاعلات التآكل

أ- تصنيف يعتمد على البيئة إلى رطبة وجافة يعتبر مقبولا بشكل عام

ب- تصنيف يعتمد على طبيعة العملية بواسطة استخدام صفات توضح البيئة أو النوع مثل التآكل الجوي أو التآكل ثنائي المعدن

ت- تصنيف يعتمد على وصف نواتج التآكل مثل فقدان البريق (Tarnishing) ، الصدأ (Rusting) ، أو التعفن (Green-rot)

ث- و بتصنيف أنواع التآكل على أساس شكل التأثير فإنه يوجد خمسة أنواع رئيسية هي :

1-تآكل منتظم (Uniform Corrosion)

2-تآكل موضعي (Localized Corrosion)

3-الإذابة الانتقائية (Selective Dissolution)

4-التأثير المشترك للتآكل والعوامل الميكانيكية

## (Conjoint Effect of Corrosion and Mechanical Factor)

### 5-التآكل الجلفاني أو ثنائي المعدن (Galvanic Corrosion)

#### 1- التآكل المنتظم

وفي هذا النوع تتآكل جميع المناطق في المعدن بنفس السرعة ويحدث التفاعل بانتظام على السطح كله وقد يؤدي إلى فقدان المعدن ، ويعتبر أكثر الأنواع انتشاراً في البيئة الرطبة التي تتراوح بين طبقات الرطوبة الرقيقة المتكثفة إلى المحاليل بشكل عام كما تشمل الهواء الجوي والمياه الطبيعية والأمثلة على ذلك هي:

□ التآكل الجوي ( Atmospheric Corrosion )

□ التأكسد وفقدان البريق ( Tarnishing )

□ الأكسدة المصعدية للمعادن ( Anodic Oxidation )

ويكون المعدن منتظم التركيب وتصل البيئة المسببة للتآكل إلى جميع أجزاء المعدن بالتساوي مما يؤدي إلى ترقيق المعدن ومن الجدير بالذكر انه في هذا النوع لا يوجد منطقة على سطح المعدن تعتبر مصعداً أو مهبطاً كما في باقي أنواع التآكل

#### 2 - التآكل الموضعي

وهنا تتآكل مساحات معينة من سطح المعدن بسرعة أكبر من باقي المناطق بسبب عدم تجانس سطح المعدن والمحيط وهندسة الشكل و يرتبط هذا النوع بكميات صغيرة من المحلول الراكد في الشقوق ، و وصلات التركيب ، الشقوق أسفل

المزلاج والمسمار و يتراوح الهجوم على المعدن من الموضعي القليل إلى النقري والأمتلة على ذلك هي:

- التآكل النقري (Pitting Corrosion)
- تآكل الشقوق أو الصدوع (Crevice Corrosion)
- تآكل بين الحبيبات (Intergranular Corrosion)
- هجوم الرواسب (Deposit Attack)
- تآكل الوصلات الملحومة (Weld Decay Corrosion)
- التآكل شبه الخيطي (Filliform Corrosion)

وهناك قاعدة عامة هي أنه في أي نظام يوجد فيه اختلاف في تركيز الأكسجين فإنه يتكون خلية تآكل ويعتبر بعض الباحثين أن جميع أنواع التآكل الموضعي هي مثال على التآكل الهوائي التفاضلي (Differential Aeration Corrosion). فمثلا يعتبر التآكل النقري هجوما موضعيا مركزا على مناطق محددة ينتج عنه نقر صغيرة تخترق المعدن ويكون اتجاهها باتجاه الجاذبية من الأعلى إلى الأسفل وقد يكون التآكل النقري أكثر خطورة من التآكل المنتظم بالرغم من أن الجزء المتضرر في التآكل النقري صغير وذلك لأنه يسبب تعطل الأجهزة المفاجئ بسبب انثقابها ويحدث التآكل الموضعي كقاعدة على معدن مغطى سطحه بأكسيد عند وجود أيونات مختلفة مثل  $(Cl^-, Cu^{+2})$  على معدن كالألومنيوم والحديد الصلب . وقد دارت تساؤلات كثيرة عن العوامل المسببة لانتشار النقر وقد اتفق العديد من الباحثين أن تكوين النقر عملية محفزة ذاتيا فعندما تكون المادة عليها غشاء أكسيد شديد الحماية فإن النقر غالبا ما تظهر عند المناطق المشوهة (Flaw) في ذلك الغشاء مثل التشققات والصدوع.

### 3 الإذابة الانتقائية أو التآكل الانتقائي

وهنا يحدث إذابة لأحد مكونات السبائك الأكثر نشاطا فمثلا بالنسبة لسبائك النحاس-الخرصين المحتوية على أقل من 85% من النحاس فانه عند تعرض هذه السبيكة لبيئة رطبة لمدة طويلة فان الخرصين (25%) قد يذوب في المحلول ويصبح النحاس المتبقي ذو قوة ميكانيكية أضعف بكثير والأمثلة على الإذابة الانتقائية هي:

1- إزالة الخرصين (Dezincification)

2- إزالة الألمونيوم (Dealuminification)

### 4 التأثير المشترك للتآكل و العوامل الميكانيكية

وفي هذا النوع يحدث هجوم موضعي أو كسر بسبب التأثير المشترك (Synergistic Effect) للعوامل الميكانيكية وعوامل التآكل ويشمل الأنواع التالية :

تآكل التعرية (Erosion Corrosion)

التآكل النقشي الشبكي ( Fretting Corrosion )

التآكل التصدعي الاجهادي ( Stress Corrosion Cracking )

التآكل التصدعي الهيدروجيني ( Hydrogen Cracking Corrosion )

إجهاد التآكل (Corrosion Fatigue)

فلو أخذ تآكل التعرية كمثال لوجد أنه يسرع بوجود محلول مسبب للتآكل بالإضافة للسرعة والاحتكاك ووجود جزيئات صلبة

## 5 التآكل الجلفاني أو ثنائي المعدن

في هذا النوع يكون هناك معدنان مختلفان أو سبيكة وعند وجودهما في محلول اليكتروليتي أو بيئة مناسبة لحدوث التآكل فإن فرق الجهد الذي يوجد بينهما عند تلامس هذين المعدنين يؤدي إلى مرور تيار من الإليكترونات بينهما ويصبح المعدن الأقل مقاومة هو المصعد (Anode) أما المعدن الأكثر مقاومة فيكون المهبط (Cathode) وبالرجوع إلى جداول السلسلة الكهرو كيميائية (Electrochemical Series) يمكن التنبؤ بأن المعدن الذي سيتأكسد هو الذي يكون له جهد أكسدة أكبر أو جهد اختزالي أقل وقد تم قياس هذه الجهود للمعادن في حالتها النقية عند ظروف قياسية ، أما السلسلة الجلفانية فهي صحيحة للسبائك والمعادن عند ظروف محددة من الضغط ودرجة الحرارة ، و يوجد تشابه بين موقع العنصر في السلسلة الكهروكيميائية و السلسلة الجلفانية . هناك قاعدة عامة هي عدم جمع المعادن التي تبعد كثيرا عن بعضها البعض في السلسلة الجلفانية (في نفس السبيكة) لأنه كلما زاد الفرق بينهما كلما زادت خطورة التآكل الجلفاني ، ويمكن إهمال التآكل الجلفاني عندما يكون فرق الجهد أقل من (50 mV).

### **- طرق الحماية من التآكل في المعادن**

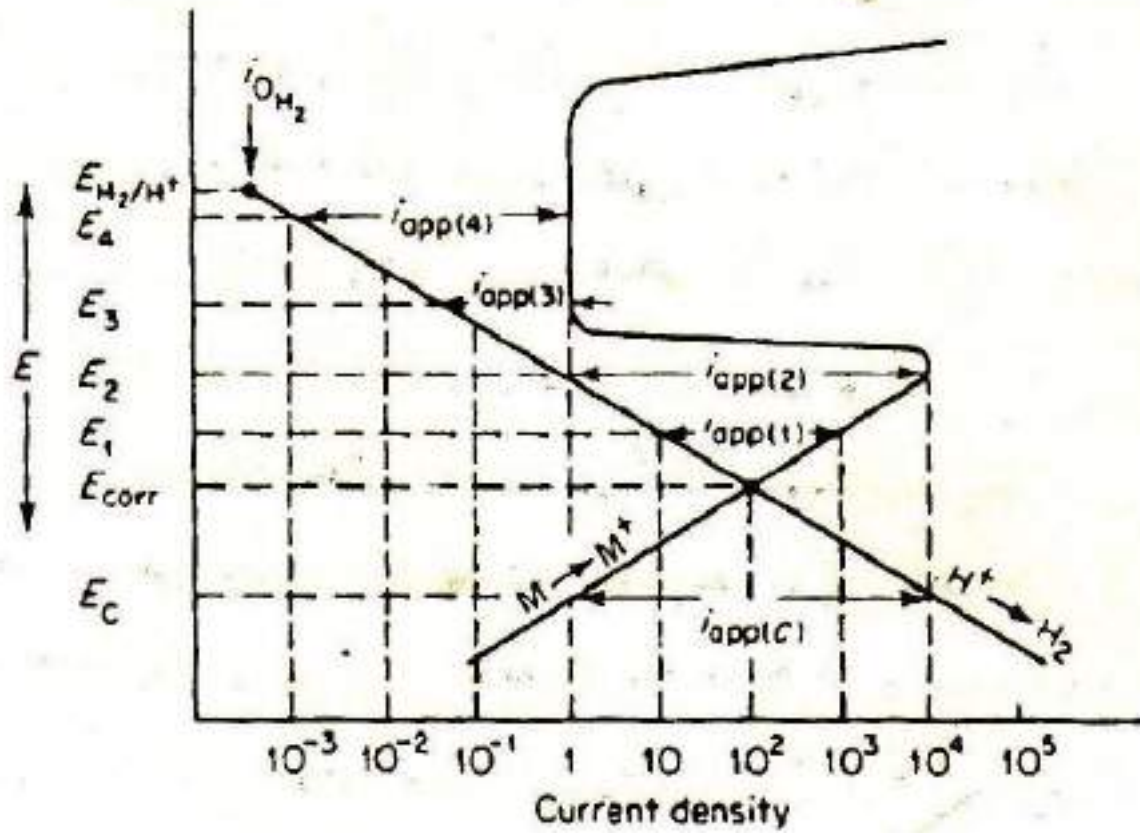
- 1- الحماية المهبطية Cathodic protection
- 2- الحماية المصعدية Anodic protection
- 3- المثبطات Inhibitors
- 4- التصميم Design
- 5- اختيار المواد Materials selection
- 6- الطلاء Coating

## 1- الحماية المهبطية و المصعدية Cathodic and Anodic protection

يوضح الشكل ادناه كيفية حساب التيار اللازم تجهيزه لحماية المعدن M والذي يكون سلوكه المصعدي من النوع نشط - خامد. يوضح الشكل ان مقدار معدل التآكل ( $i_{corr}$ ) لهذا المعدن هو ( $100 \mu A/cm^2$ ) وجهد التآكل هو ( $E_{corr}$ ). لغرض حماية المعدن مهبطيا، يتطلب تسليط تيار مهبطي بحيث ينخفض جهد التآكل ويصبح أقل من ( $E_{corr}$ ). فلو اريد تخفيض كثافة تيار التآكل الى ( $1 \mu A/cm^2$ ) فان الجهد الذي يجب ان يكون عليه المعدن في هذه الحالة هو ( $E_c$ ), وان كثافة التيار المهبطي اللازم تسليطها في هذه الحالة هي ( $i_{app(c)}$ ) وتكون ( $10^4 \mu A/cm^2$ ) مطروحا منها قيمة كثافة التيار الأنودي عند نفس الجهد ( $1 \mu A/cm^2$ ), وتكون في هذه الحالة هي نفسها تقريبا كثافة التيار المهبطي ( $10^4 \mu A/cm^2$ ).

اما اذا اردنا حماية المعدن أنوديا ( وهذا ينطبق على المعادن من النوع نشط - خامد ) فانه يجب رفع جهد التآكل ( $E_{corr}$ ) من المنطقة النشطة الى قيمة أعلى تكون في منطقة الخمود حيث يمكن من خلالها تخفيض كثافة تيار التآكل ( ويساوي تيار الخمود). يمكن حساب كثافة التيار المصعدي الواجب تسليطه من خلال نظرية الجهود المختلطة ايضا وكما مبين في الشكل. ان رفع جهد المعدن الى قيمة ( $E_1$ ) يؤدي الى زيادة كثافة تيار التآكل الى ( $10^3 \mu A/cm^2$ ) وكذلك زيادة الجهد الى قيمة اكبر هي ( $E_2$ ) يؤدي الى زيادة كثافة تيار التآكل الى قيمة ( $10^4 \mu A/cm^2$ ), ذلك لان كثافة تيار التآكل عند كلا الجهدين ( $E_1$ ) و ( $E_2$ ) يبقى واقعا في منطقة النشاط, اي ان المعدن يسلك سلوكا نشطا حيث يزداد كثافة تيار التآكل بزيادة الجهد. أما عندما يزداد الجهد الى ( $E_3$ ) فانه يكتسب الخمود ويصبح كثافة تيار التآكل مساويا الى كثافة تيار الخمود اي ( $1 \mu A/cm^2$ ). وكذلك فان رفع جهد المعدن الى اي قيمة واقعة في منطقة الخمود يؤدي الغرض نفسه. ومن المفضل في هذه الحالة ان يرفع الجهد الى القيمة واقعة عند منتصف مدى الخمود مثل الجهد ( $E_4$ ) ذلك كي يبقى التآكل واقعا في منتصف الخمود عند حصول أي زيادة أو نقصان لا يمكن السيطرة عليهما في قيمة هذا الجهد وكما في الشكل. ان قيمة كثافة التيار اللازم تجهيزها لرفع الجهد الى القيم ( $E_1$ ) و ( $E_2$ ) و ( $E_3$ ) و ( $E_4$ ) هي ( $i_{app(1)}$ ) و ( $i_{app(2)}$ ) و ( $i_{app(3)}$ ) و ( $i_{app(4)}$ ) على التوالي. حيث ان قيمة التيار المصعدي اللازم تجهيزها هي كثافة التيار المصعدي مطروحا منها كثافة التيار المهبطي, ولحماية المعدن مصعديا يجب ان تكون كثافة المصعدي هي ( $i_{app(4)}$ ) وقيمتها هنا تساوي ( $1 \mu A/cm^2$ ) تقريبا. ولغرض مقارنة متطلبات الحماية المهبطية بالحماية المصعدية في مثالنا أعلاه من حيث مقدار كثافة التيار اللازم تجهيزه لحماية المعدن, نرى بانه لخفض كثافة تيار التآكل الى ( $1 \mu A/cm^2$ ) عن طريق الحماية المهبطية فإبنا نحتاج الى تجهيز كثافة تيار خارجي قيمته حوالي ( $10^4 \mu A/cm^2$ ), في حين انه لتحقيق نفس الغرض عن طريق الحماية المصعدية يتطلب منا تجهيز كثافة تيار قدرها ( $1 \mu A/cm^2$ ) فقط, يتبين من ذلك بان الحماية المصعدية في هذه الحالة هي أفضل لأنها تحقق نفس المتطلبات وبكافة أقل.





## 2- المثبطات Inhibitors

هي مواد تضاف الى وسط التآكل لغرض تقليل معدل التآكل. عند اضافة بعض المثبطات تتفاعل مع سطح المعدن وتكون طبقة لحماية السطح. ان اضافة المثبطات بمقادير محددة وصغيرة تؤدي الى تقليل شدة الوسط. عند اضافة المثبطات بمقدار اقل من الحد الادنى لأداء وظيفتها يؤدي الى نتيجة عكسية (اي زيادة معدل التآكل) وذلك بسبب زيادة مساحة الكاثود على حساب الأنود حيث ان الطبقة المتكونة لاتغطي سطح المعدن بالكامل, اي ان المنطقة المغطاة تكون كاثود والمكشوفة تكون أنود.

أنواع اخرى من المثبطات تعمل ككاسحات للأوكسجين مثل ( sulfites, hydrazine ) حيث يمتص الأوكسجين يتفاعل مع الهيدروجين ليكون الماء.

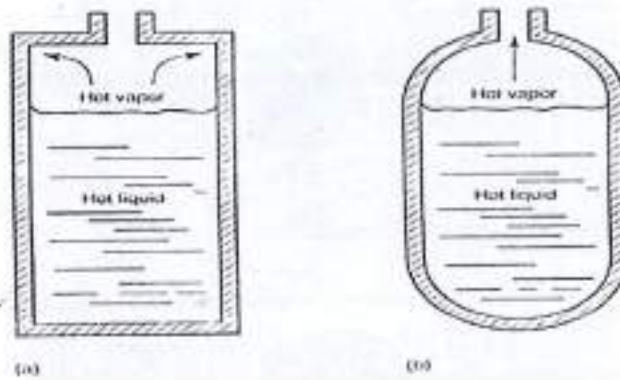
يمكن تقسيم المثبطات الى نوعين :

- مثبطات غير عضوية Inorganic inhibitors تكون اكثر كلفة . يكون عمل المثبط اما على التفاعل الأنودي أو التفاعل الكاثودي أو كليهما ويمكن تحديد اي من التفاعلين ( الأنودي او الكاثودي) قد تآثر وذلك من خلال اجراء اختبار الأستقطاب للمعدن في ذلك الوسط.  
Nitrate تعمل على التفاعل الأنودي.  
Chromate تعمل على التفاعل الكاثودي.
- مثبطات عضوية Organic inhibitors تمتاز بشكل عام بتوفرها ورخص ثمنها و خلوها من السموم وعملها التثبيطي يستند على الامتزاز الفيزيائي physical adsorption حيث ان جزيئات المادة المثبطة تحيط بسطح القطب المراد حمايته وهذا الانجذاب أو الاحاطة نحو سطح القطب يتم باواصر فاندر فالز بسبب قطبية الجزيئات.

#### 5- التصميم Design

التصميم هو خط الدفاع الأول ضد التآكل. البنائيات والهياكل والمحطات تصمم لأداء وظيفتها، ومن خلال هذه التصاميم يجب أخذ اعتبارات التآكل، وفي حالة كون هذه الاعتبارات غير كافية فانه سوف يكون هناك هدر للوقت والاموال، وكما موضح في الاشكال.

15.2 / Designing to Prevent Corro



#### 4- اختيار المواد Materials selection

اختيار مواد ذات مقاومة تآكل مناسبة في أوساط اكاله معينة هي اكثر طريقة فعالة لمنع حدوث التآكل.

#### 5- الطلاء Coating

يوفر الطلاء حاجز ما بين سطح المعدن والوسط الاكال.

