

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- 4th 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 Hondros , M.P. seah, S.hofmann , and P.Lejcek , inphysical Metallurgy , edited by R.W. Cahn and P.haassen , 3rd 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, 2nd edition.
34. American Society for Metals (1987), "**Heat Treatment**". Vol. 4, 2nd 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 الى درجة انصهاره ثم اعادة 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 الى 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 الى قانون التكافؤ وتكون على ثلاثة أنواع اعتماداً على النسبة بين مجموع إلكترونات التكافؤ (في المدار الخارجي) الى عدد الذرات الكلي في الجزيئات المكونة للمركب ويسمى النوع الأول صنف β وهو بنسبة $\frac{3}{2}$ ويسمى النوع الثاني بصنف γ وهو بنسبة $\frac{13}{21}$ ويسمى النوع الثالث صنف ϵ 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 إذا هي $\frac{2}{3}$ (الصنف β). أما المركب $Cu_{31}Sn_8$ حيث يكون تكافؤ النحاس 1 وتكافؤ القصدير 4 أي ان مجموع التكافؤ 63، عدد الذرات $39=8+31$ ، فالنسبة إذا هي $\frac{21}{39} = \frac{63}{13}$ (صنف γ).

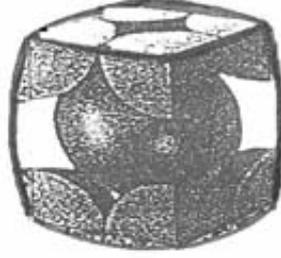
ومن المركبات السبائكية المهمة التي توجد في السبائك المستخدمة صناعياً الكاربيدات التي تتميز بصلادة عالية ومقاومة عالية للاحتكاك الميكانيكي ومثال على ذلك Cr_3C , Mn_3C , Fe_3C وغيرها.

3-2 المحاليل الجامدة (Solid Solution) :-

في الحالة المنصهرة تقبل معظم المعادن الذوبان بعضها ببعض طالما كانت أوزانها النوعية متساوية أو متقاربة، اما اذا 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. واذا 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 ان 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:

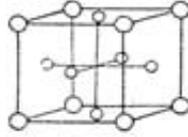
1 المحلول الجامد الإحلالي (Substitutional Solid Solution) :-

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.



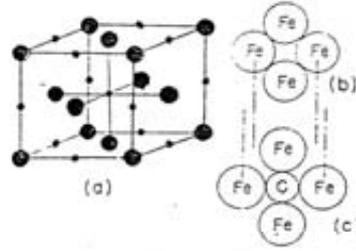
الشكل (2-2) محلول جامد احلالي مثالي لسبيكة النحاس والذهب،
الدوائر الصغيرة تمثل ذرات النحاس والدوائر الكبيرة ذرات الذهب

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 (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 α (B.C.C).



الشكل (2-3) يمثل محلول جامد بيني للكربون في الحديد γ (F.C.C) حيث يمكن للحيز الموجود بين ذرات الحديد ان يحتضن ذرة من الكربون محدثاً تشوهاً في الشبكة البلورية كما في c , b

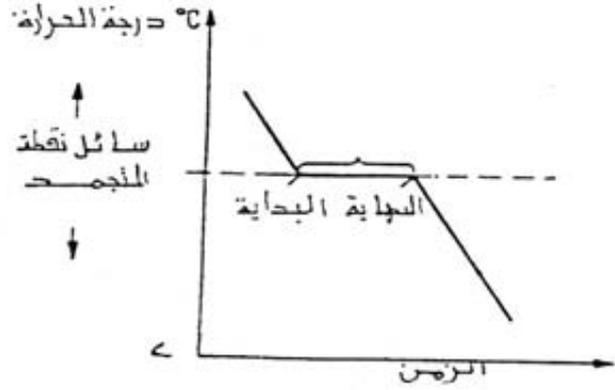
4-2 العوامل المؤثرة في قابلية الذوبان في الحالة الصلبة :-

- 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 :-

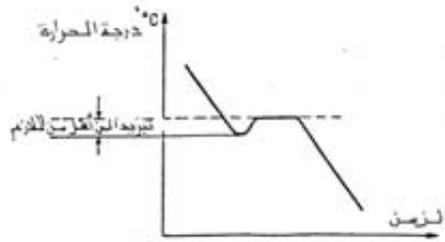
في بداية تسخين المعادن النقية يحصل في أبعادها قليل من التمدد وتبقى المادة على حالها من حيث الصلابة، بينما ترتفع درجة الحرارة بشكل مستمر حتى تصل الى درجة معينة تحصل عندها ظاهرتان جديدتان مرتبطتان مع بعضهما، اذ يبدأ المعدن بالانصهار ويتوقف الارتفاع في درجة الحرارة الى ان يتحول كل المعدن الى سائل. ان المواد 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



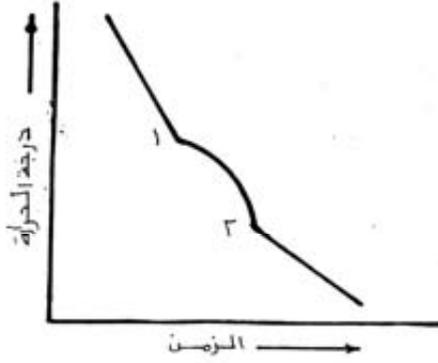
الشكل (4-2) منحنى تبريد معدن نقي

عملية نموها، ويتوقف النمو في اماكن تصادمها، ويكتسب الجسم بنية حبيبية، ان الذرات لا تستطيع ان تكوّن نويات التبلور في الوقت المناسب، فتتخفص 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)



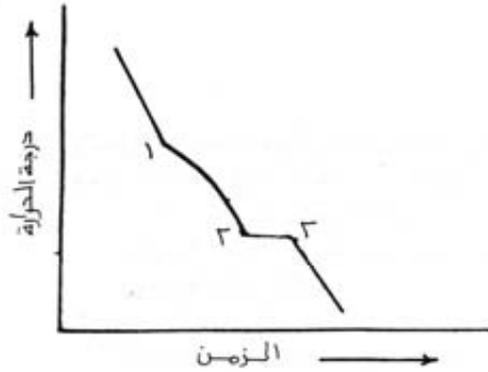
الشكل (5-2) منحنى تبريد فيه تبريد منخفض الى أقل من درجة حرارة التجميد بقليل، ترتفع درجة الحرارة مرة أخرى حتى درجة حرارة التجميد

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) ،



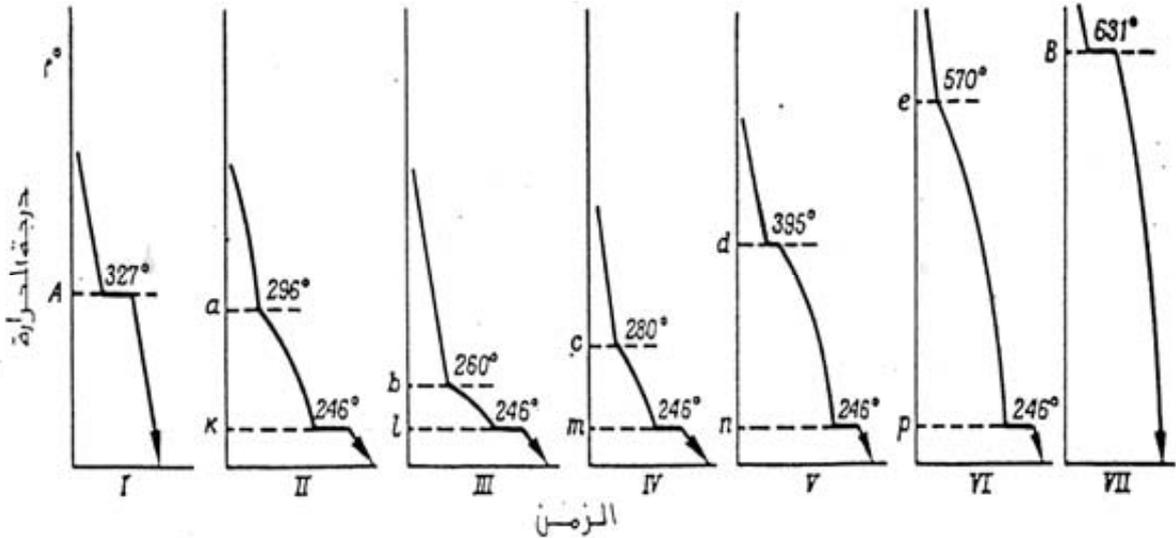
الشكل (8-2) منحنى تبريد في السبائك الثنائية تكون اليوتكتك

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 المعدنيين 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

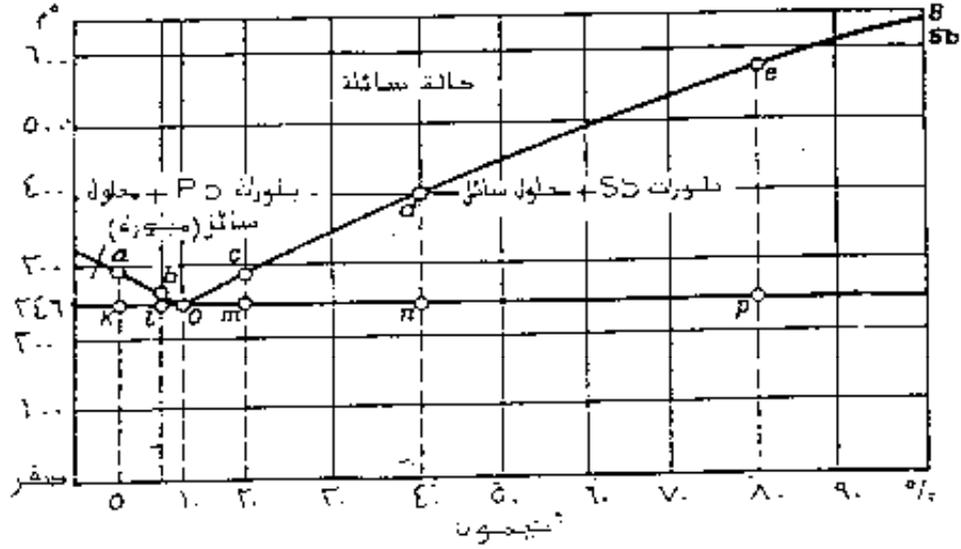
طريق رسوم تسمى مخططات التوازن للأطوار، وتعرف هذه المخططات بانها رسوم توضح العلاقة بين التركيب ودرجة حرارة السبائك في حالة الاتزان. ولغرض إنشاء مخطط الاتزان نأخذ على سبيل المثال سبيكة من الرصاص والأنتيمون (pb-Sb) ذات تراكيب مختلفة. وكما هو موضح في الشكل (2-11).



Pb ٪١٠٠ و Sb ٪٠	I - المكون النقي
Pb ٪٩٠ و Sb ٪٠	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 ٪٣٠ 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).

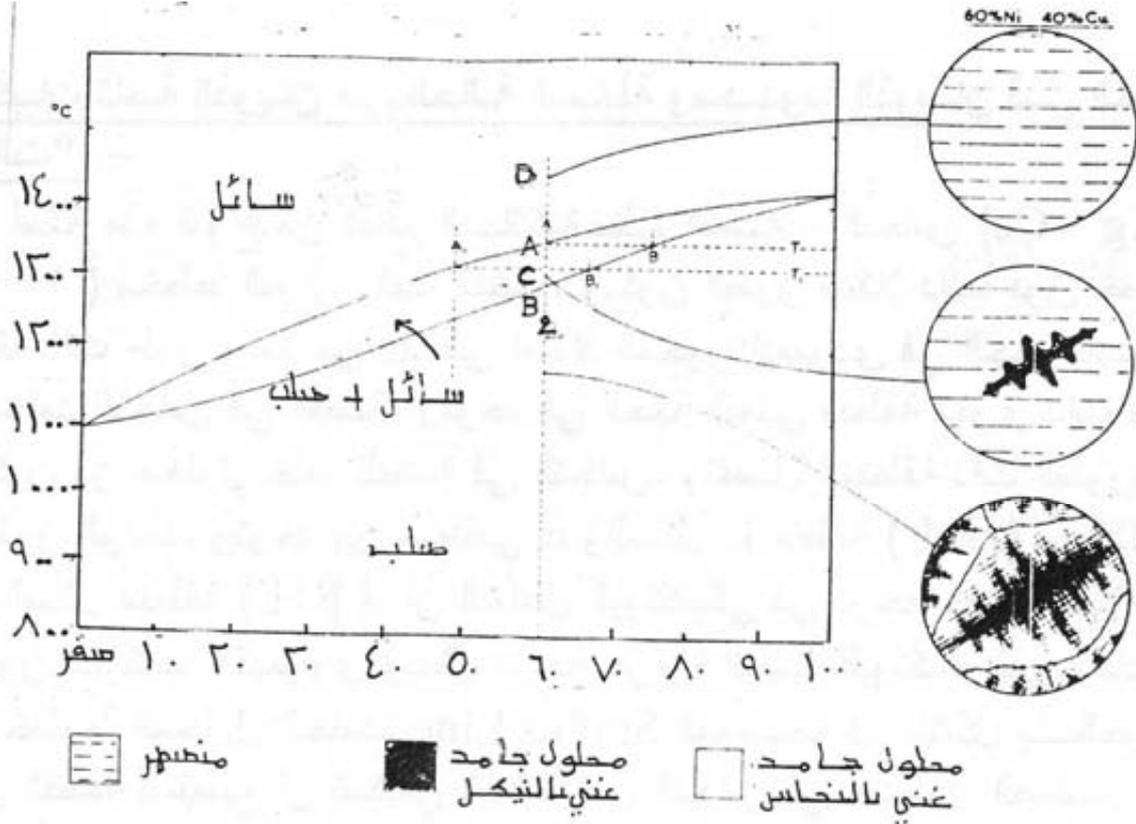


المشكل (2 - 13) إنشاء بياني حالة النظام بواسطة النقط الحرجة المحددة من منحنيات تبريد سبائك الرصاص والنيكل كيميون .

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 طورين 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 المحاور 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:

$$\text{وزن المعدن الأول في السبيكة} \times [\text{التركيب الكيمياوي للسبيكة (نسبة المعدن الأول فيها)}] =$$

$$\text{وزن الطور السائل} \times [\text{التركيب الكيمياوي للطور السائل}] + \text{وزن الطور الجامد} \times$$

$$[\text{التركيب الكيمياوي للطور الجامد}]$$

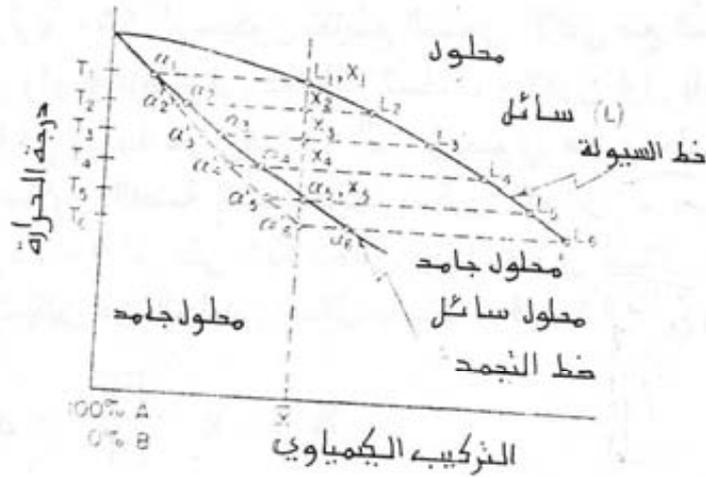
$$W * C \% = W_\ell + C_\ell + W_s * C_s \%$$

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 منسأ العزل المجهري
 أثناء التبريد المتوازن للمعدن المنصهر .

يظهر قسم من النظام المتماثل، وعندما يبرد سائل يمثل تركيبه الكلي بنقطة \bar{X} الى
 درجة حرارة T_1 ، يبدأ الانجماد بتكوين بلورات α_1 بتغيير تركيب السائل الى L_2 وعند هبوط
 درجة الحرارة الى T_2 تتكون بلورات α_2 . وعلى اي حال فان α_1 لا تتوفر له الفرصة لتعديل
 التركيب الى α_2 بسبب عدم توفر الزمن الكافي للانتشار وحصول التوازن، لذلك يكون معدل
 تركيب الطور الجامد ما بين α_1 ، α_2 ولنقول α'_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 7.70 (البلورات الأولية) 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 البرموث - 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.

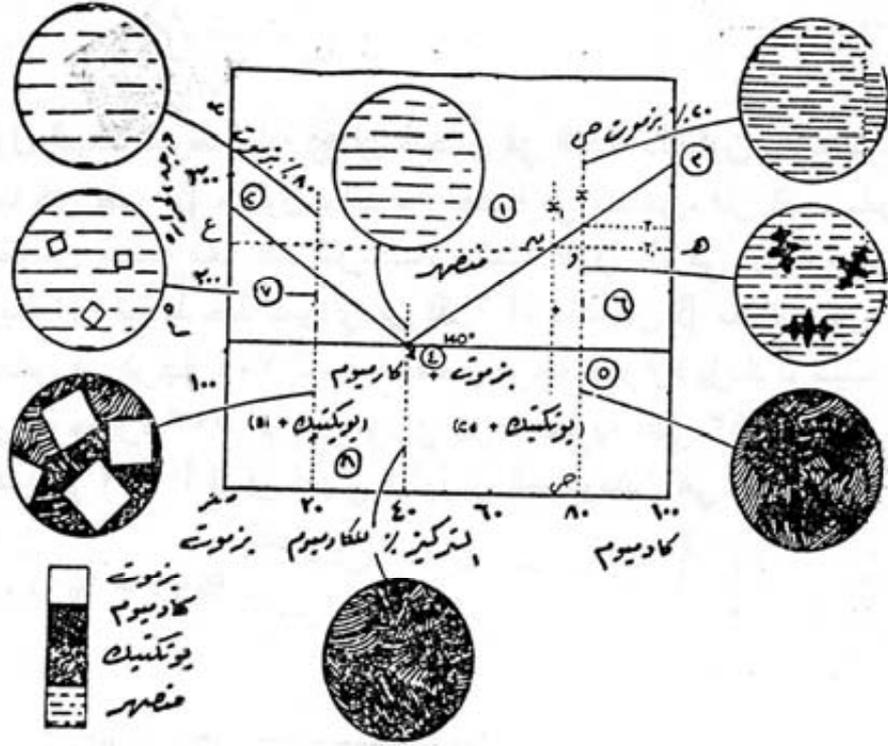
$$\frac{75-80}{80-100} = \frac{\text{ون (ه)}}{\text{هو (ن)}} = \frac{\text{كمية المحلول الجامد (وتركيبه)}}{\text{كمية المحلول السائل (وتركيبه)}}$$

وعند درجة الحرارة 140 °م تصبح:

$$\%100 \times \frac{40-80}{40-100} = \text{Cd النسبة المئوية للكادميوم}$$

$$\%100 \times \frac{80-100}{40-100} = \text{النسبة المئوية لليوتكتيك}$$

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 سترسب 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 α على امتداد المحور العمودي في الجهة اليسرى يتكون من محلول جامد للنحاس في الفضة، وتوجد في الجهة اليمنى منطقة أخرى ذات طور واحد من β تتكون من محلول جامد للفضة في النحاس، وتفصل المنطقة ذات الطورين ($\alpha + \beta$) ، منطقتا الطور الواحد، وتوجد بين منطقتي α والسائل L منطقة ($\alpha + L$) ، وكذلك توجد بين طور β 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°C . 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°C ، بينما تستطيع ايضاً وفي درجة حرارة 316°C 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°C الى اقل من 1% في درجة حرارة 316°C . ولغرض دراسة هذا النوع من النظام نأخذ سبيكة تحتوي على 7% نحاس و 93% فضة، فعند درجة الحرارة 960°C سيكون تقاطع المحور الافقي مع المحور العمودي في نقطة A مما يؤدي الى وقوع النظام في المنطقة السائلة، وتتكون اول بلورات من المحلول

تصل درجة الحرارة الى 746 م° حيث يدخل منطقة ثنائية الطور ليظهر طور β' ، ويوضح خط المحلول الجامد هبوط قابلية ذوبان النحاس في الفضة، لتتكون جسيمات β' من النحاس الزائد. ولما كان طور β' محلولاً جامداً من الفضة في النحاس، فإن النحاس الزائد يأخذ في الواقع قسماً من الفضة معه عند الترسيب. ويتحدد طور β' في درجة حرارة 704 م° بتكوين خط الربط II واسقاط خط عمودي من نقطة J، لذلك فإن β' ستتكون من 5% فضة مذابة في 95% نحاس في درجة حرارة 704 م°، وانخفاض درجة الحرارة يزداد ترسيب β' من α ، وسنحصل في درجة حرارة 593 م° على توازن بين α حاوية على 3% نحاس و β' حاوية على 2% فضة جدول (2-1-أ). ان كميتي الطورين الموجودتين هي :

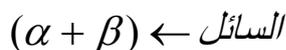
$$\%96 = \%100 \times \frac{7-98}{3-98} = \alpha$$

$$\%4 = \%100 \times \frac{3-7}{3-98} = \beta$$

وفي اثناء التبريد الحقيقي غير المتوازن لهذه السبيكة سيحدث فيها تغير ضئيل في البنية تحت درجة الحرارة هذه بسبب ترسيب β' من α 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 α	100% سائل	7% نحاس	سائل	916
	قليل من α	2.5% نحاس	جامد	
سائل + محلول جامد α	50% سائل	9% نحاس	سائل	900
	50% α	5% نحاس	جامد α	
سائل + كمية كبيرة من المحلول الجامد α على الحدود الحبيبية	قليل من السائل	14% نحاس	سائل	852
	100% α	7% نحاس	جامد α	
كمية كبيرة من المحلول الجامد α مع ترسيب رقيق من المحلول الجامد β	98% α	5% نحاس	جامد α	704
	2% β	95% نحاس	جامد β	
كمية كبيرة من المحلول الجامد α مع ترسيب رقيق من المحلول الجامد β	96% α	3% نحاس	جامد α	593
	4% β	98% نحاس	جامد β	

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 α الى β ثابتة في حين ان نسبة الجامد الى السائل تعتمد على محتوى الطاقة للنظام.

وفي درجة الحرارة 779 م° يكون النظام من α ، β بحيث يكون تركيب α النقطة K وهو 8.8% نحاس في حين يكون تركيب β النقطة M وهو 92% نحاس (8% فضة) وعليه تكون الكميات النسبية من α ، β 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 β كطبقات متتالية في اليوتكتك	α 77%	8.8% نحاس	جامد α	اقل من 779
	β 23%	92% نحاس	جامد β	

$$77\% = 100\% \times \frac{28.1-92}{8.8-92} = \alpha$$

$$23\% = 100\% \times \frac{8.8-28.1}{8.8-92} = \beta$$

وفي درجات حرارة اقل من 779 م° تترسب α من محلول الجامد β لمزيج اليوتكتك وتترسب β من المحلول الجامد α بحيث يصبح تركيب α حاوياً على 1% نحاس في حين يكون β حاوياً على اقل من 1% فضة في درجة حرارة 316 م° ، بينما يصبح كل من α و β 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 α 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 α 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 α ، 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°م هي نفسها للسائل الذي كان في درجة حرارة اعلى بقليل من 779°م والمساوية الى $\%58$. وعند هبوط درجة الحرارة تحت درجة حرارة اليوتكتك يترسب طور β من طور α ويترسب طور α من طور β 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

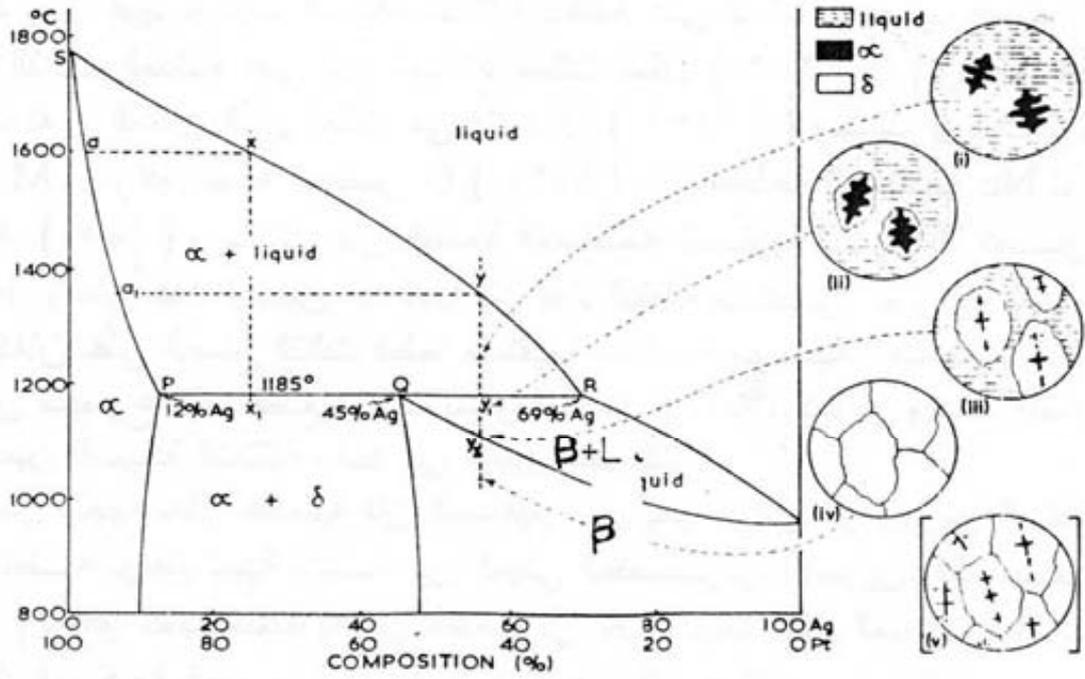
التركيب المجهرية	الوزن الكلي لكل طور	تركيب الاطوار	الاطوار المتواجدة	درجة الحرارة $^\circ\text{م}$
منصهر متجانس	$\%100$ سائل	$\%20$ نحاس	سائل	871
α سائل + محلول جامد α	$\%20$ α	$\%8$ نحاس	جامد α	801
	$\%80$ β	$\%23$ نحاس	سائل	
α سائل + محلول جامد α	$\%42$ α	$\%8.8$ نحاس	جامد α	779 قليل من اليوتكتك
	$\%58$ 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 α وحولها بلورات β [الناتجة من التفاعل بين α والمنصهر عند درجة حرارة 1185°م] ولكون β تحيط بالبلورات α فقد سميت حولية. ولتفسير هذا المخطط نتبع مثلاً تبريد سبيكة X فعند الوصول الى درجة حرارة 1600°م تبدأ بلورات α بتركيز (a) [عنصر الفضة ذائب في عنصر البلاطين] بالانفصال من المنصهر وتتجمد. وعند الوصول الى درجة الحرارة 1350°م سيتغير تركيب البلورات

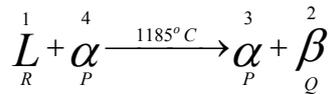
من a الى a_1 وستكون نسبة المنصهر الى المتجمد $\frac{X_o a_1}{X_o y}$ وتزداد عند هذه



الشكل (٢ _ ٢) مخطط الاتزان الحراري Pt-Ag (النوع الرابع) .

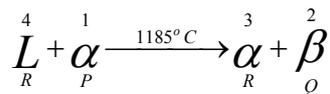
الدرجة درجة ذوبان الفضة في البلاتين حتى تصل الى اقصاها عند درجة حرارة 1185°م

(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_1) ، 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:



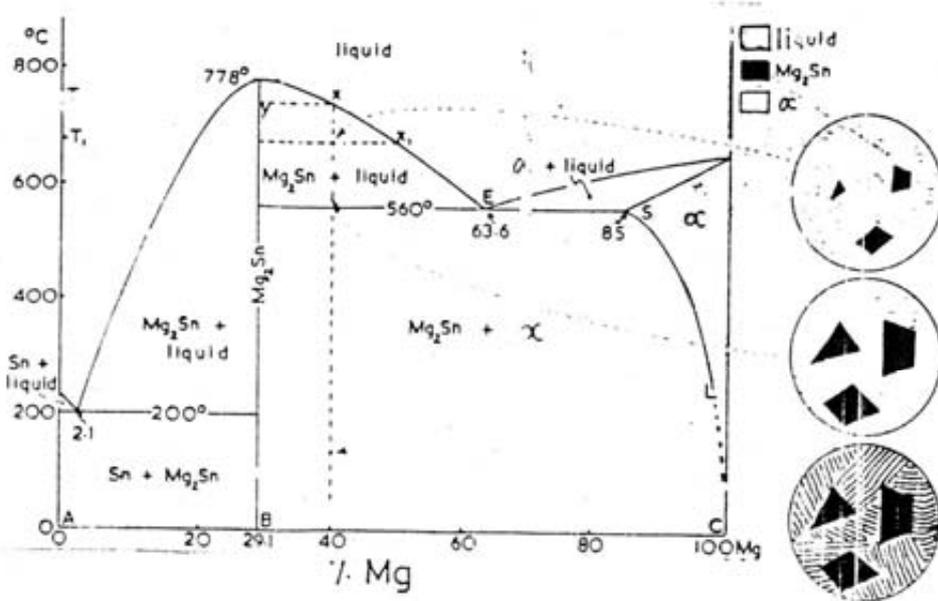
حيث نجد ان البلورات α المتجمدة تستهلك كلها بسبب ضآلة كميتها نسبة للمنصهر وتتحول الى بلورات متجمدة من β بتركيب النقطة Q (45% Ag) وعند الهبوط بدرجة الحرارة تدخل المجال RFQ ، حيث يقل المنصهر ويتحول الى β بينما تزداد بلورات β

الأولية حتى نصل إلى نقطة y_2 التي تتحول عندها كل السبيكة إلى بلورات β 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 α بالترسيب من β 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 α). ويظهر مخطط التوازن الحراري لهذه السبيكة وكأنه مؤلف من قسمين:

أ. مخطط السبيكة Mg-Mg₂Sn ويحتوي على نقطة يوتكتك توافق التراكيب 63.6% مغنيسيوم ودرجة حرارة 560° م.

ب. مخطط السبيكة Sn-Mg₂Sn 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 α (وهو محلول جامد من القصدير والمغنيسيوم) مع بلورات المركب Mg₂Sn. بينما لا يوجد في الأطوار للسبيكة الحاوية على أقل من 29.1% Mg الطور α بل تتألف من بلورات القصدير وبلورات المركب Mg₂Sn 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 Fe₃C. ولغرض تسهيل دراسة هذا المخطط سنجزئه الى ثلاثة أجزاء وحسب درجات الحرارة.

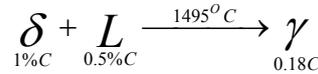
1. الجزء الخاص بالتفاعل الحولي :-

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 δ ، 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:

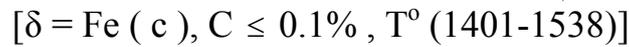


أي سنحصل على الطور الجديد (γ) بتركيب 0.18% كربون من تفاعل السائل الذي يحتوي على 0.5% كربون مع الطور δ الحاوي على 0.1% كربون.

اما السبيكة الحاوية على 0.14% كاربون فاننا سنحصل على (δ) 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 (δ) بتركيب 0.1% كاربون. ويتفاعل جميع السائل مع جزء من δ لنحصل على الطور (γ) في درجة حرارة التفاعل الحولي 1495 °م في ظروف التبريد المتوازن. ويتكون الناتج عند درجة حرارة مباشرة تحت 1495 °م من الطور (δ) بتركيب 0.1% كاربون مع الطور (γ) بتركيب 0.18% كاربون، وعند الهبوط بدرجة الحرارة فإن الطور (δ) سيختفي ليظهر بدلاً منه الطور (γ).

اما السبيكة الحاوية على 0.34% كاربون فانها تتألف من الطور (δ) والسائل عند درجة 1497 °م ويكون 60% منه سائلاً والباقي من طور (δ) الجامد. وعند درجة الحرارة 1495 °م يتفاعل جزء من السائل مع كل من الطور (δ) لإنتاج طور (γ) 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 (γ)، ثم يختفي الطور السائل ليظهر بدلاً منه الطور (γ) عندما تهبط درجة الحرارة.

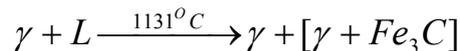
لقد لاحظنا بصورة عامة أن الطور (δ) وهو محلول جامد من الحديد والكاربون، ونسبة الكاربون فيه لا تتعدى 0.1% وقد تكون في درجات حرارية ما بين 1538 °م - 1401 °م.



2. الجزء الخاص بالتفاعل اليوتكتيكي :-

أ. سبيكة قبل اليوتكتك :

إذا تأملنا سبيكة تحتوي على 3% كاربون بردت من درجة 1370 °م فسلاحظ حسب الشكل (2-24) أن الطور (γ) 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 (γ) و 50% طور ذو تركيب يوتكتك [$\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$] الذي ندعوه بالليديبيوريت (Led).

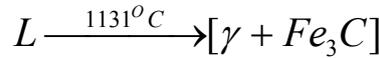


ونجد هذا واضحاً في مخطط الشكل (2-24) ويتكون هنا الطور (γ) قبل أن يتكون اليوتكتك، وهو طور يحتوي على 2% كاربون، وعندما تنخفض درجة الحرارة وبتبطيء من 1131 °م فان قابلية ذوبان الكاربون في (γ) ستقل وحسب الخط AcM بحيث تصبح النسبة 0.8% كاربون عند درجة الحرارة 723 °م تقريباً،

وعليه فان البنية عند هذه الدرجة تتكون من 85.1% من الطور (γ) ذو التركيب اليوتكتويدي (0.8% كربون) و 14.9% من السمنتايت Fe_3C .
ان الطور (γ) ذا التركيب اليوتكتويدي سرعان ما يتحول الى الخليط اليوتكتويدي عند درجة 723 م° مكوناً بنية من الطور ألفا (α) 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° فسلاحظ أن هذه السبيكة ستتحول الى خليط يوتكتيكي فيه 47.7% من الطور (γ) اليوتكتيكي و 52.3% من السمنتايت وحسب المعادلة

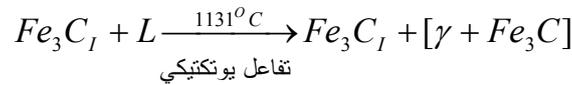


ويحتوي طور (γ) اليوتكتيكي على 2% كربون عند هذه الدرجة ولكن سرعان ما تقل هذه النسبة عند هبوط درجة الحرارة لتصبح 0.8% كربون عند درجة 723 م° تقريباً.

وسرعان ما يتحول الطور (γ) ذو التركيب اليوتكتويدي (0.8% كربون) عند درجة 723 م° الى الخليط اليوتكتويدي مكوناً بنية من الطور ألفا (α) 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 :

$$\%29.54 = \%100 \times \frac{4.3-5}{4.7-6.67}$$

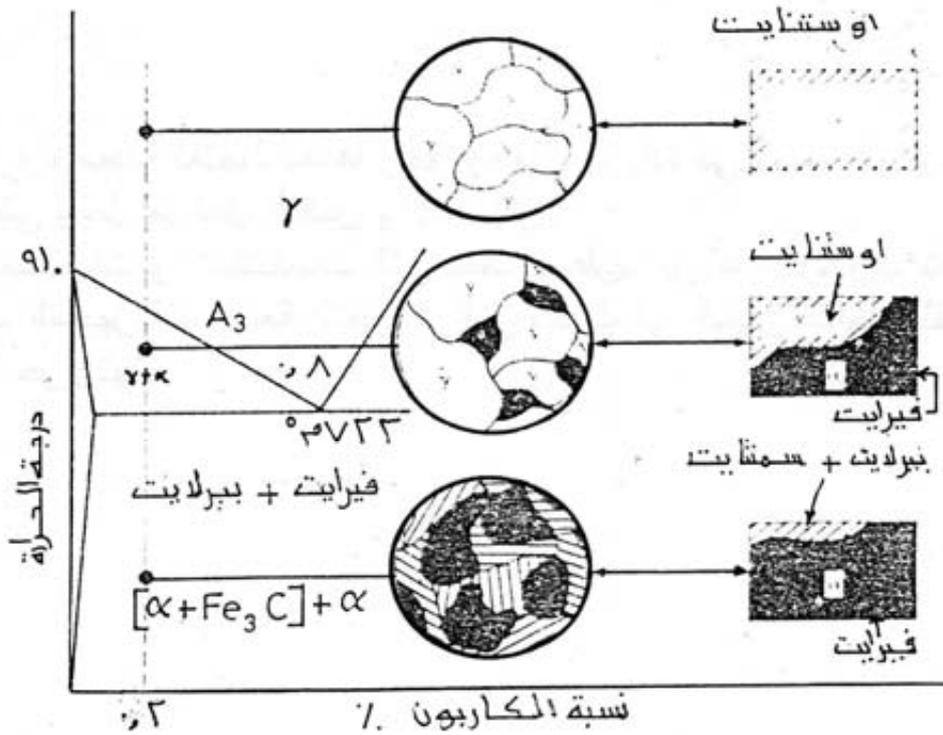
أما عند درجة 723 م° فإن بنية السبيكة ستتكون من Fe_3C_I الأولي وخليط يوتكتويدي من $[α + Fe_3C]$. لقد لاحظنا في الجزء الخاص بالتفاعل اليوتكتيكي ظهور المركب الكيميائي Fe_3C_I وهو مركب صلد يتكون من اتحاد الحديد مع الكربون، ويوجد أما بصورة منفصلة على شكل شبكة في مناطق حدود الحبيبات أو ان يدخل في تركيب الخليط اليوتكتويدي (البيرلايت). ولاحظنا كذلك ظهور الطور (γ) وهو محلول جامد من الحديد والكربون تكون نسبة الكربون فيه لا تتعدى 2% ويظهر في درجات حرارية مابين 1400 – 910 م° ، وقد انفق 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 (γ) 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 α والطور γ ، وعليه فإن α يبدأ بالتكون عند درجة الحرارة المناظرة لهذا الخط، ويستمر بالتكون حتى تصل درجة الحرارة إلى 723 م° حيث يتحول الطور (γ) 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 α 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).

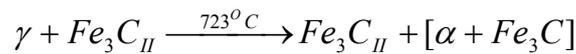
أما السبائك الحاوية على أكثر من 0.8% كربون كما في الشكل (2-25 ب) (سبائك فوق اليوتكتويدي) فإنها ستتجمد حسب النمط الآتي:

تتفصل بلورات من الطور (γ) أولاً عند بلوغ الحرارة المناظرة لخط السيولة، وعند بلوغ درجة الحرارة المناظرة لخط الانجماد يستكمل بقية المنصهر تجمده مكوناً المحلول الجامد من الطور (γ) الاوستنايت، وباستمرار عملية التبريد فإنه لا يلاحظ حدوث أي تغيير طوري حتى تصل درجة الحرارة إلى الخط A_{cm} وعنده تظهر

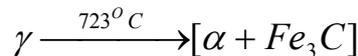


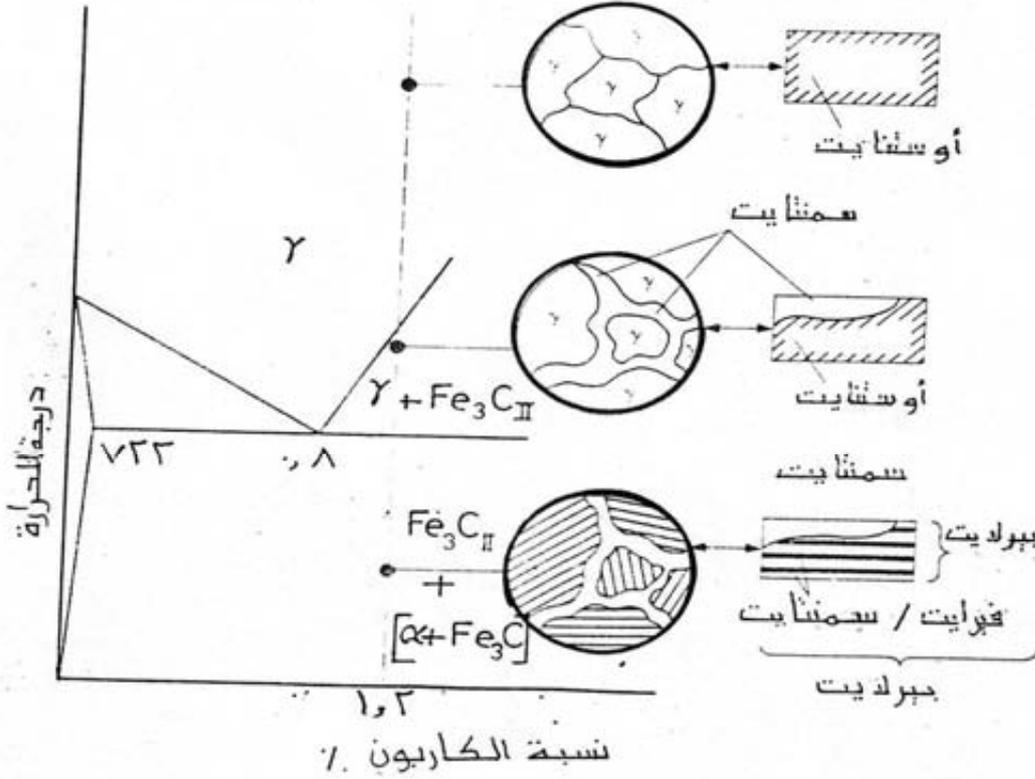
الشكل (2-25) مخطط الحديد - الكربون لسبيكة تحتوي على 0,3% كربون

منطقة تحتوي على السمنتايت الثانوي Fe_3C_{II} والطور (γ) شكل (2-25 ب) ومع انخفاض درجة الحرارة $723^\circ C$ فإن المتبقي من الطور (γ) الذي يحتوي على 0.8% من الكربون سوف يتحول الى الخليط اليوتكتويدي $[\alpha + Fe_3C]$ وحسب المعادلة الآتية:



ان الطور α 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 (α) والسمنتايت Fe_3C ، ويحتوي البيرلايت على نسبة من الكربون مقدارها 0.8% ، وهو يتكون من تحول الاوستنايت (γ) الى فيرايت وسمنتايت حسب المعادلة الآتية:





الشكل (25-2 ب) مخطط الحديد - الكربون لسبيكة تحتوي على 1,2% كربون

مثال (1) :-

فولاذ قبل اليوتكتويدي يحتوي على 0.3% كربون وتتركب بنيته من α والخليط اليوتكتويدي $[\alpha + Fe_3C]$ ، المطلوب تحديد كمية α والخليط اليوتكتويدي لهذا الفولاذ. [يمكن اهمال احتواء الفيرايت على الكربون بنسبة 0.025% في الحسابات العملية].

الحل :-

بالاستعانة بالشكل (25-2 أ) وبتطبيق قاعدة الذراع نحصل على :

$$\alpha = \frac{0.3 - 0.8}{-0.6 - 0.8} \times 100\% = 62.5\%$$

$$[\alpha + Fe_3C] = \frac{-0.3 - 0.8}{-0.8 - 0.8} \times 100\% = 37.5\%$$

مثال (2) :-

تتركب بنية الفولاذ فوق اليوتكتويدي المحتوي على 1.2% كربون من $[\alpha + Fe_3C]$ والسمنتايت الثانوي المطلوب تحديد كمية $[\alpha + Fe_3C]$ وكمية السمنتايت الثانوي .

الحل :-

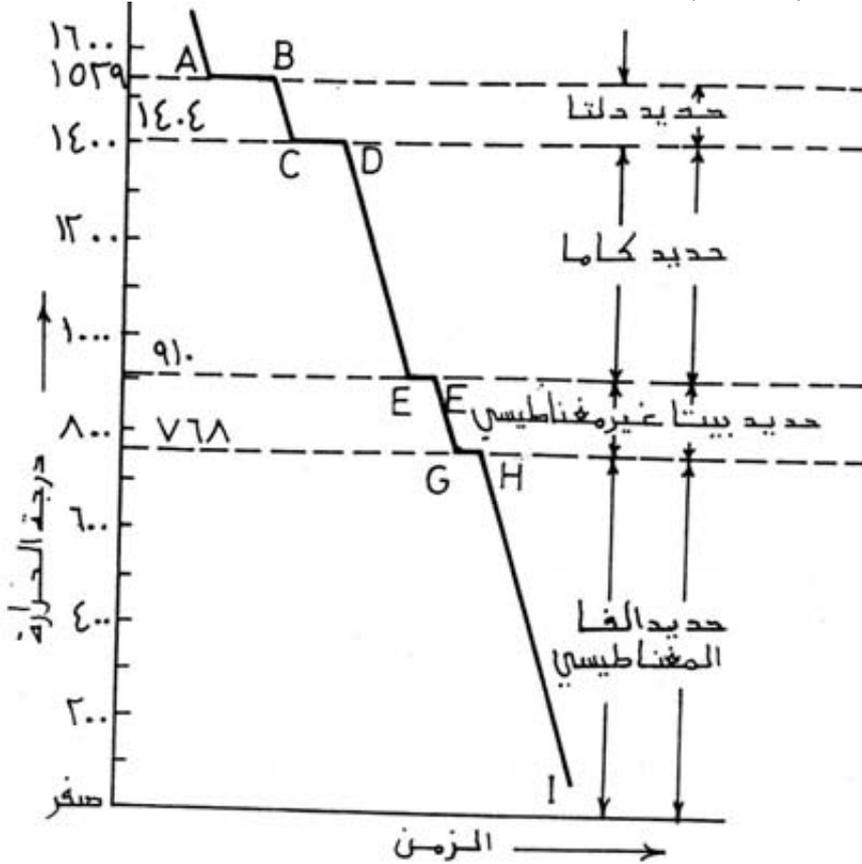
بالاستعانة بالرسم (2-25 ب) وتطبيق قاعدة الذراع نجد ان :

$$\%93.18 = \%100 \times \frac{1.2-6.67}{0.8-6.67} = [\alpha + \text{Fe}_3\text{C}]$$

$$\%6.82 = \%100 \times \frac{0.8-1.2}{0.8-6.67} = \text{Fe}_3\text{C}$$

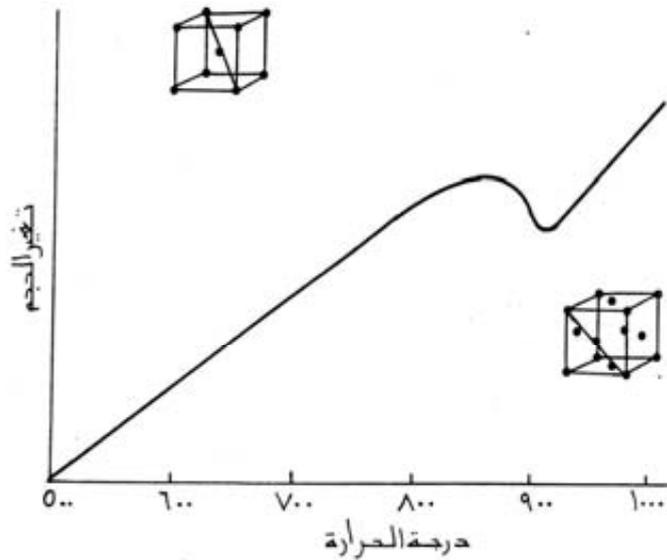
1-7-9-2 تأصل الأطوار في الحديد :-

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

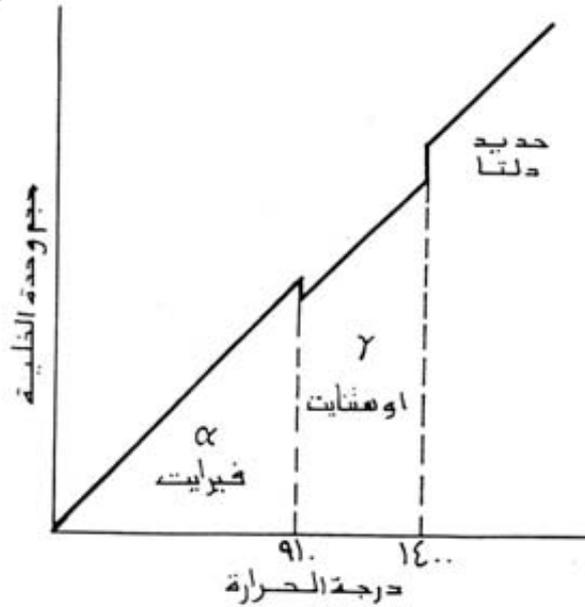
إذا سخنا قطعة من الفولاذ قبل اليوتكتويدي التي تحتوي على نسبة 0.15% كربون ستحدث زيادة في حجمها، وتستمر هذه الزيادة مع ارتفاع درجة الحرارة حتى نصل الى درجة 910 م° حيث نفاجاً بظاهرة غير متوقعة، فعلى الرغم من الاستمرار في تسخين قطعة الفولاذ فانها ستعرض الى تقلص لحظي شكل (27-2) كما ان درجة حرارة القطعة ستنبت 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 .



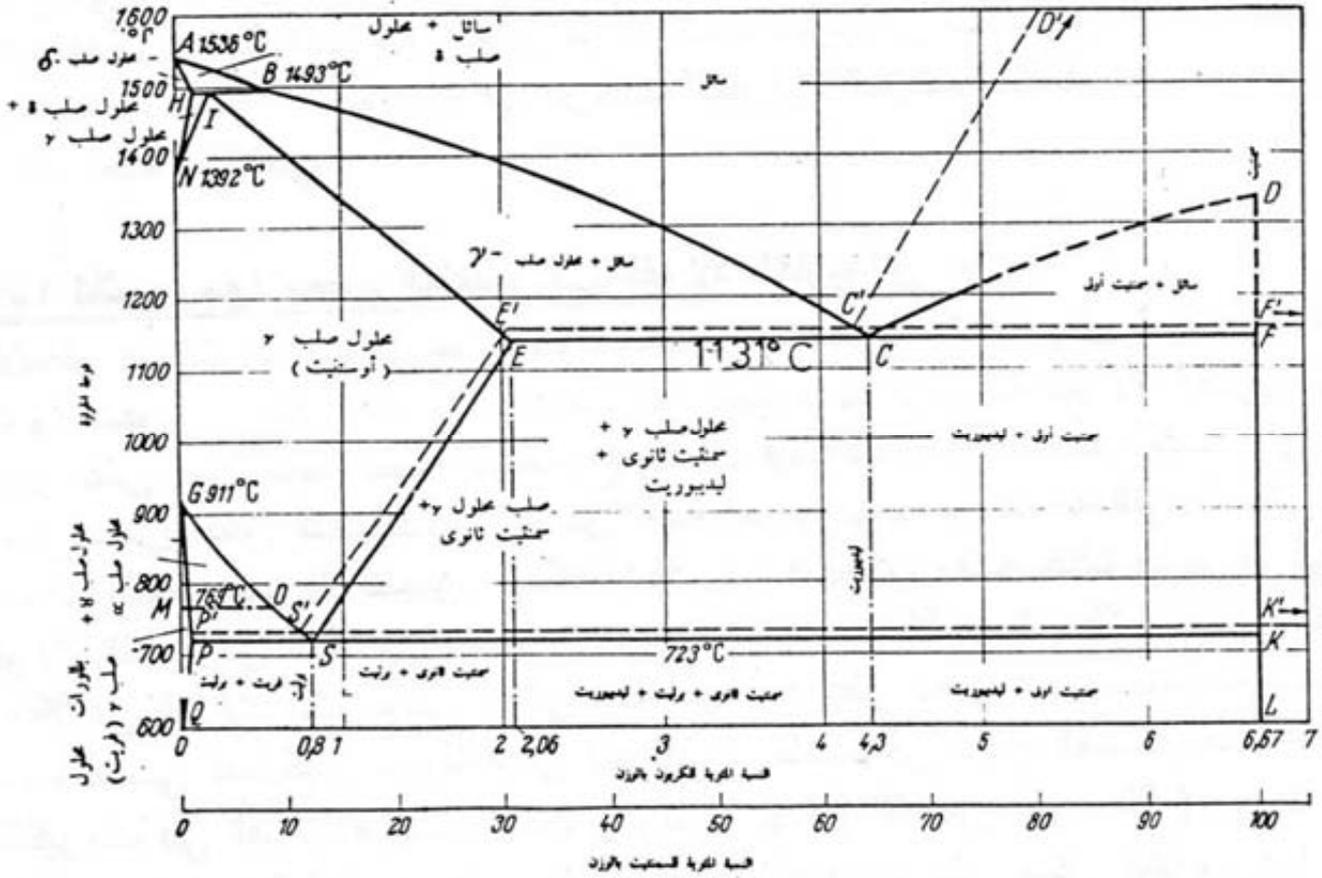
الشكل (28-2) تأصل الاطوار في الفولاذ

اما الفولاذ الذي يحتوي على نسبة اكثر من 0.8% كربون (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 والكربون :-

يعد التركيب الداخلي المكون من الحديد و الكرافيت من اثبت صور سبائك الحديد مع الكربون، 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 كربون 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% كربون وعلى يمين الخط ES من بلورات المحلول الصلب (γ) (الأوستنايت)، أما السمنتايت الثالث فانه ينفصل تحت درجة حرارة 723 °م من بلورات α (الفيرائيت) وبتراكيب من 0.025% - 0.0025% كربون.



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.

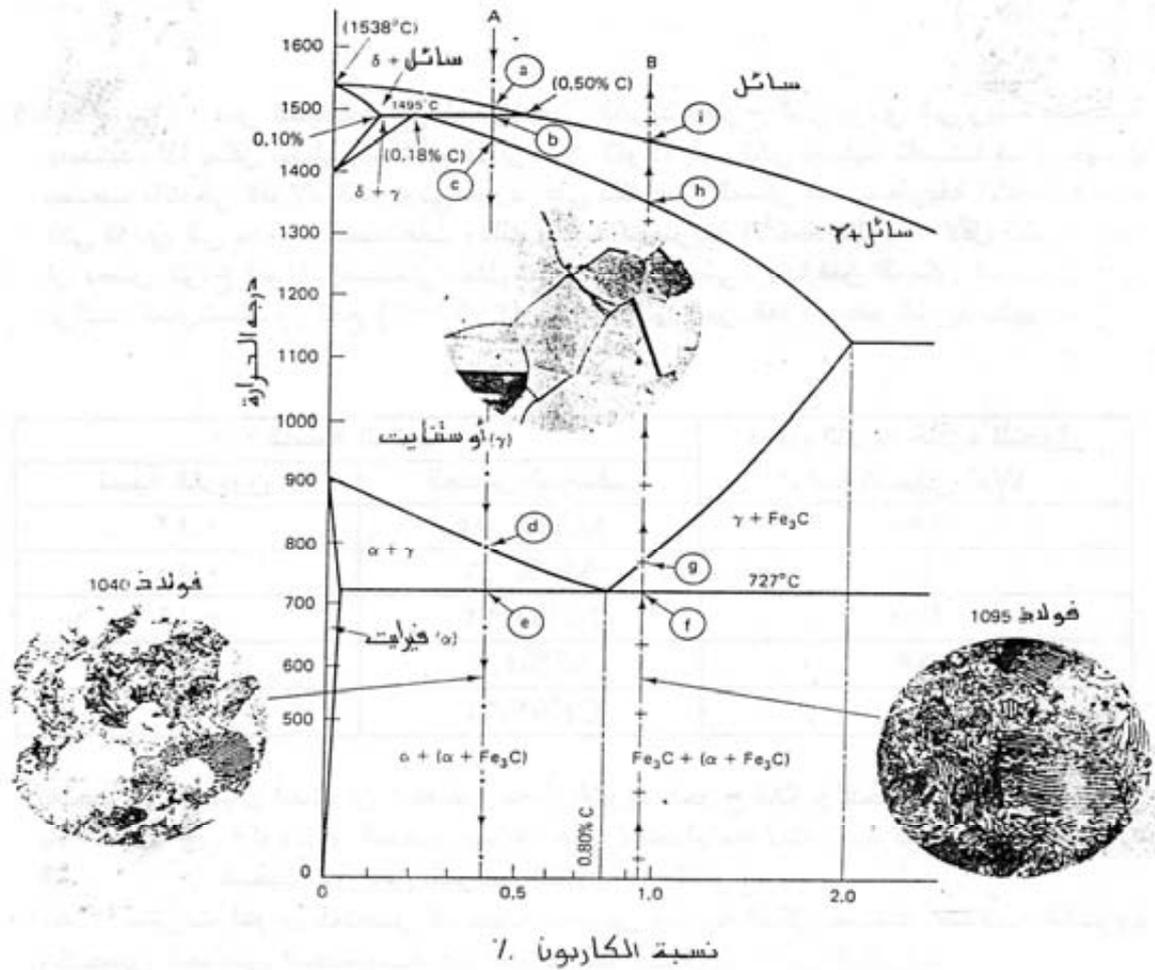
1. **الفولاذ الكربوني**:- وهو الفولاذ الذي يلعب فيه الكربون دوراً أساسياً في تحديد خواصه

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 الإنشائية بسبب مقاومته العالية ومطيلته المنخفضة.

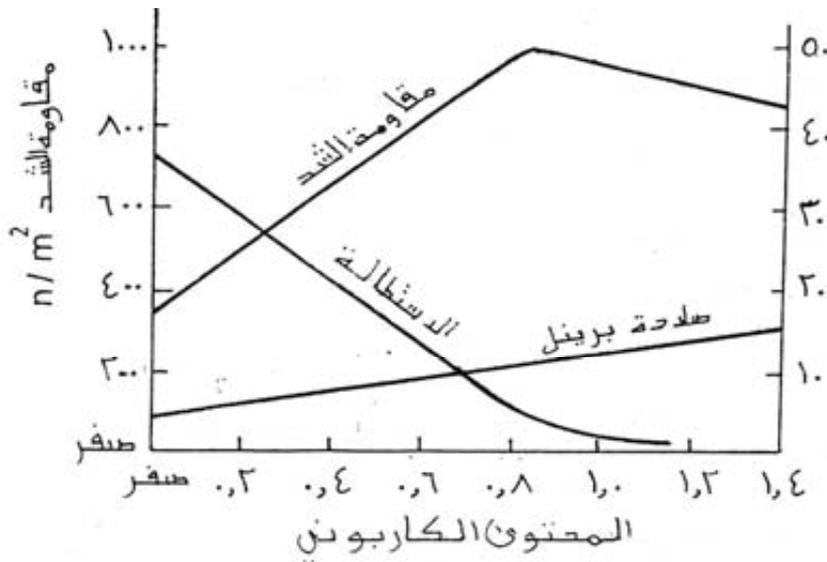


الشكل (2-31) مخطط الفولاذ A - سبيكة قبل اليوتكتك B - سبيكة فوق اليوتكتك

- ب. فولاد 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. فولاد 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. فولاد 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 فولاد العدة الكربوني محدود الاستخدام بسبب صلابته ومقاومته المنخفضة في درجات الحرارة المرتفعة بالمقارنة مما هو عليه في فولاد 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 (σ) 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) :-

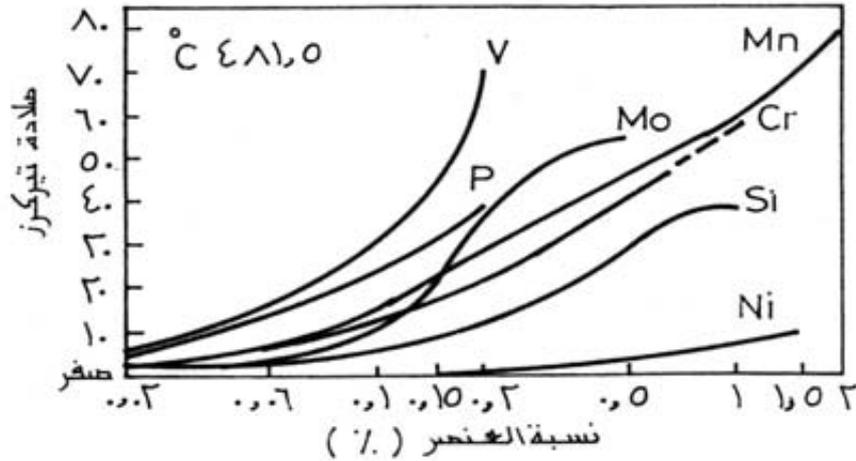
هو الفولاذ الذي يحتوي على نسب قليلة من عناصر الـ (S , p , Si , Mn) وعلى نسب اخرى من عناصر خاصة مثل (Cu, Co, W, Mo, Cr, Ni) او على نسب عالية من عناصر مثل (Mn, Si).

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/م² 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 :-

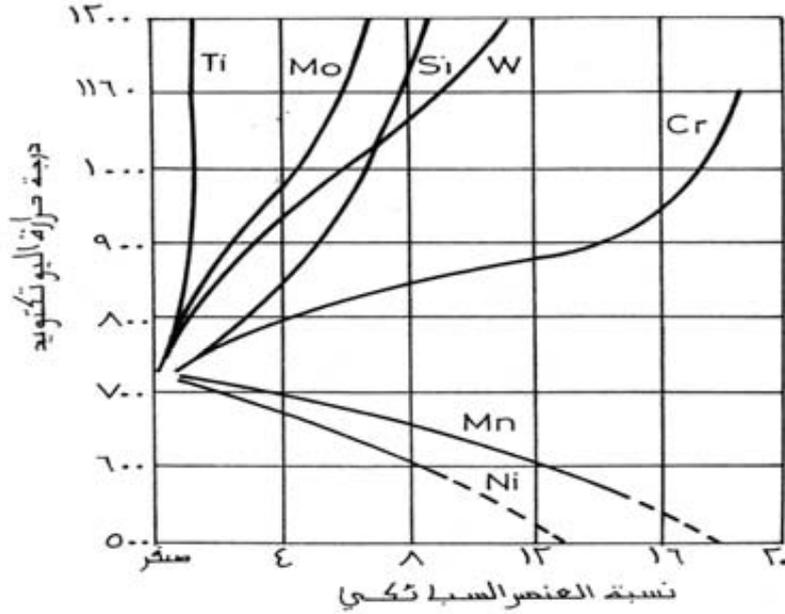
1. تؤدي العناصر السبائكية المضافة الى زيادة الصلادة للفولاذ بسبب تكوين المحلول الجامد الذي يؤدي الى حدوث تشويه في بنية الشبكة البلورية كما في الشكل (2-35).
- 2.



الشكل (2-35) تأثير العناصر المضافة على صلادة الفولاذ السبائكي

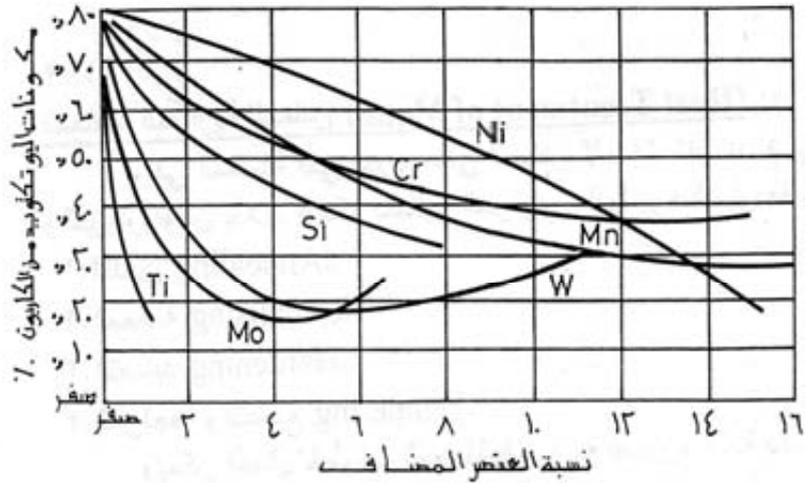
3. ان وجود نسبٍ من العناصر مثل (W, Cr, Mn, Mo, Ti, V) تفوق حد الذوبان في الحالة الجامدة يؤدي أحياناً الى تكوين الكربيدات الصلدة مثل (Cr₇C₃, Mo₂C, WC) وعادة ما تكون هذه الكربيدات مقترنة مع السمنتايت.
4. تؤدي بعض العناصر المضافة الى تكون مركبات وسطية مثل (FeCr, Fe₃W₂).
5. تؤدي بعض العناصر المضافة مثل (Cu, Co, Al, Ni, Si) الى تحلل الكربيدات 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 البينكتويدي)، فإضافة 3% نيكل على سبيل المثال تؤدي الى خفض A_1 بمقدار 30°C . كما في الشكل (2-36) وعند اضافة 1% Cr ترتفع A_1 الى 880°C .



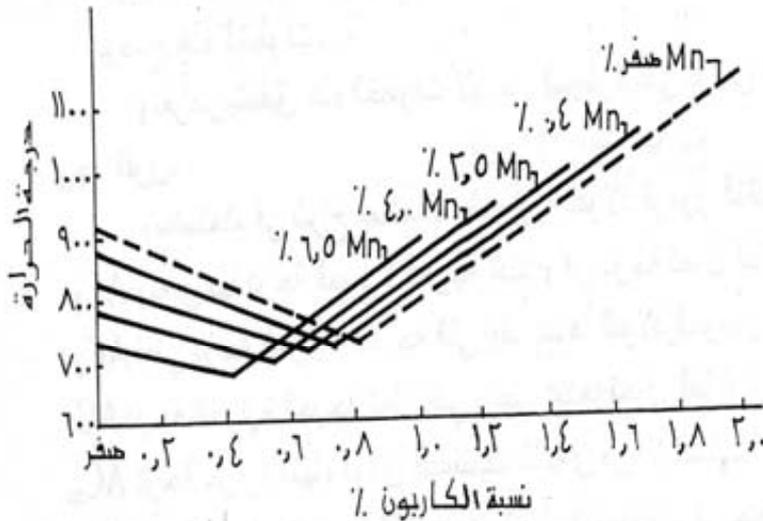
الشكل (2-36) تأثير العناصر المضافة على درجة حرارة البينكتويد

8. تؤدي العناصر السبائكية أيضاً الى خفض نسبة الكربون في تركيب البينكتويد (البيرلايت) شكل (2-37) فإضافة 4% Ni ستصبح نسبة الكربون في البينكتويد 0.7% كربون وعند اضافة 4% Cr ستصبح هذه النسبة 0.55% كربون.



الشكل (2-37) تأثير العناصر المضافة على تركيب اليوتكتويد

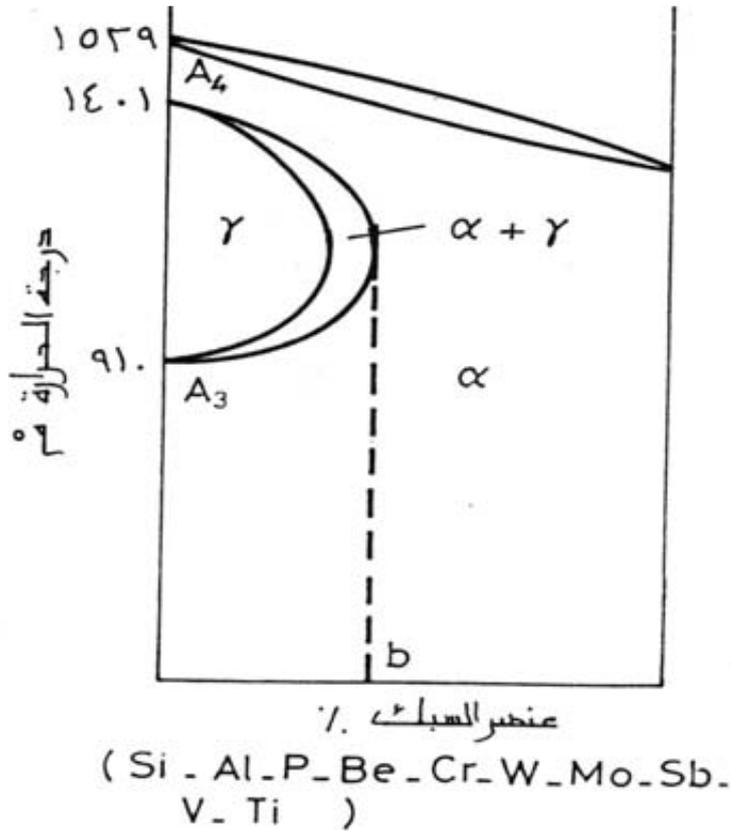
اما الشكل (2-38) فيوضح تأثير النسب المختلفة للمغنيز في نسبة الكربون في اليوتكتويد وفي درجة حرارة اليوتكتويد معاً.



شكل (2-38) تأثير نسب المغنيز على تركيب اليوتكتويد و درجة حرارة اليوتكتويد

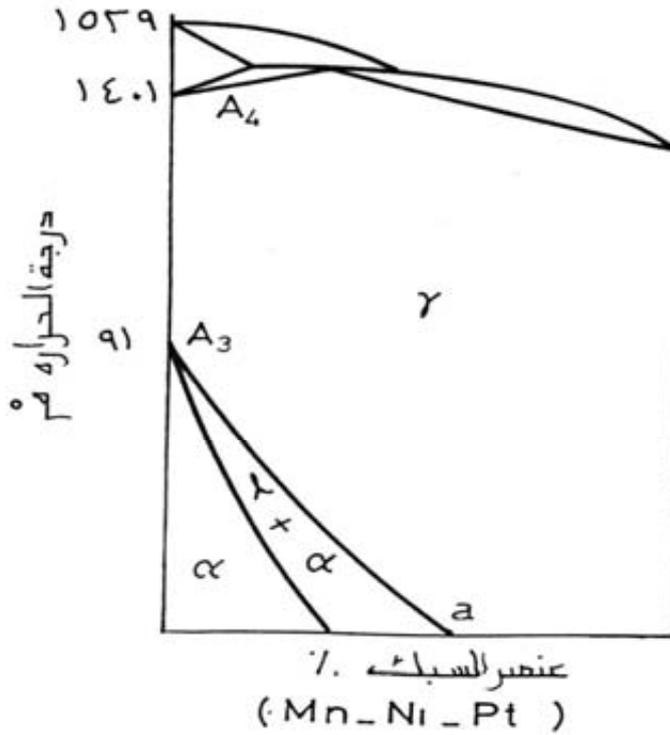
9. ترفع بعض العناصر السبائكية درجات الحرارة الحرجة او تخفضها (A_4 , A_3) اذ يرمز لتحويل α الى γ بـ (A_3) ولتحويل γ الى δ بـ (A_4)، فالعناصر [Mo, Cr, Si, W, V, Al] تزيد من قيمة A_3 حتى تندمج بنقطة A_4 مكونة ما يسمى بحلقة كاما المغلقة شكل (2-39)، وعندما تصل نسبة هذه العناصر في الفولاذ حداً معيناً سيصبح 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 لفعل درجات الحرارة العالية كما في الشكل (2-40).



الشكل (40-2) الفولاذ الاوستنتيني

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 اوستنتيتية 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 التتكتون:- يوجد التتكتون 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 التتكتون 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 التتكتون والمولبدنيوم والفناديوم والتيتانيوم والبورون ولكن بنسب ضئيلة لغرض اضافة تحسينات اخرى في الخواص. وتنتمي غالبية انواع هذا الفولاذ الانشائي الى الفولاذ البيرلاييتي 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 18 الى 8، 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 والمارتنسايت 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 المارتنسايت 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 المارتنسايت 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 المارتنسايتية 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 التتكتستن الحاوي على 6% تتكستن، 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.

2-10-3-3 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:

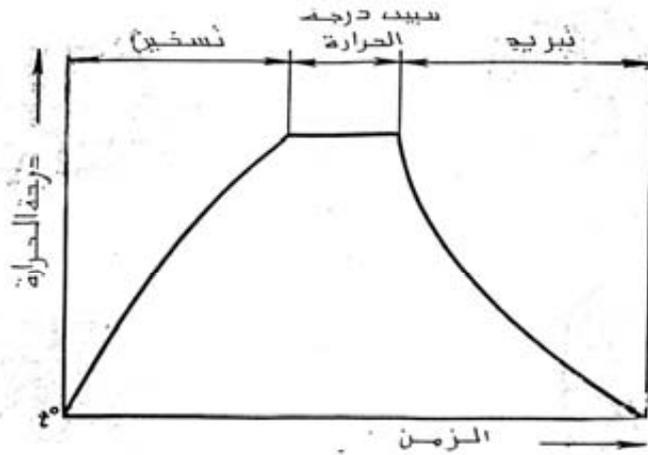
Cr-V	:6	C	:1
W	:7	Ni	:2
Ni-Cr-Mo	:8	Ni-Cr	:3
Si-Mo	:9	Mo	:4
		Cr	:5

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.

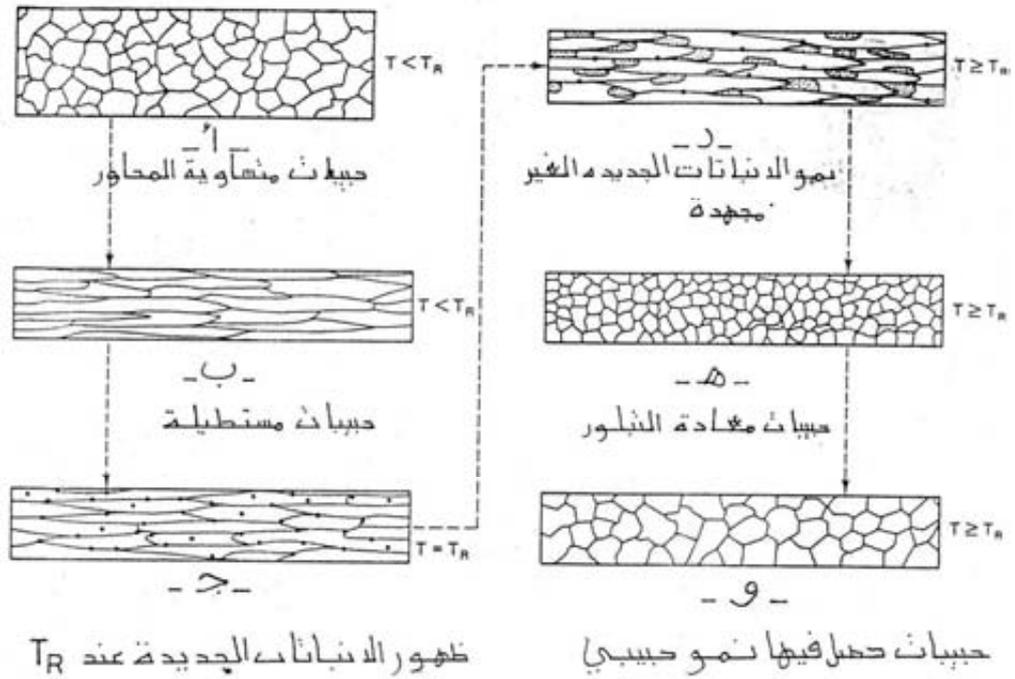
AC_4 درجة الحرارة الحرجة التي عندها يتحول الأوستنايت الى حديد دلتا ويرمز الحرف C

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:-

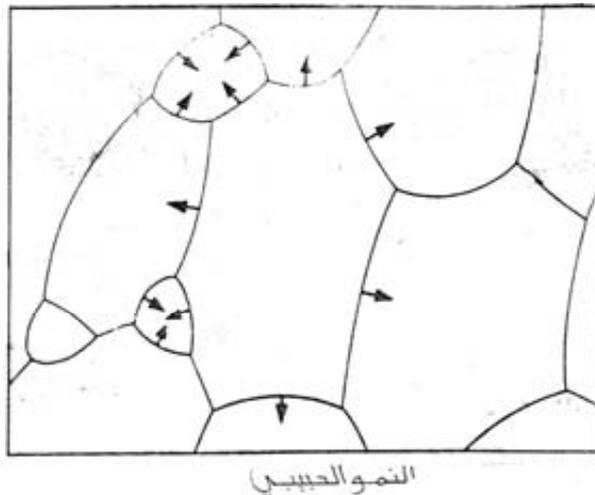
ان الغرض الأساسي من التلدين التخلص من عدم الاستقرار الذي ينجم عن التصليد في اثناء التشكيل اللدن او في اثناء عملية السباكة لذا يتطلب الأمر تسخين المعدن او السبيكة المشكلة الى درجة من الحرارة تعادل ($T_m 0.3$) (T_m هي الدرجة المطلقة لانصهار المعدن) ، ولا تغير هذه الدرجة من شكل وأبعاد الحبيبات المشكلة الا 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} / سم² الى 10^8 / سم²) 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)

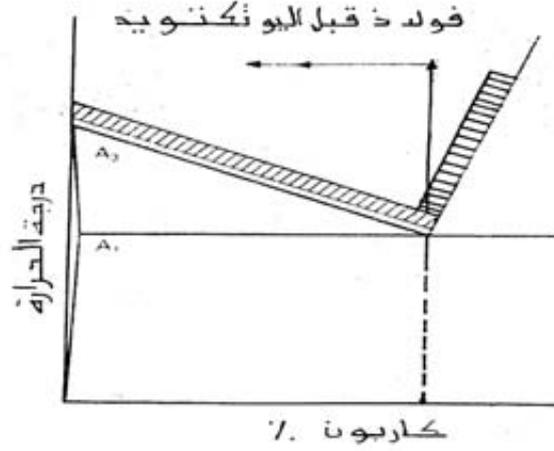


شكل (2-45) تنتقل الحدود الحبيبية نحو مركز التقعر فتلاشي الحبيبات الصغيرة

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)

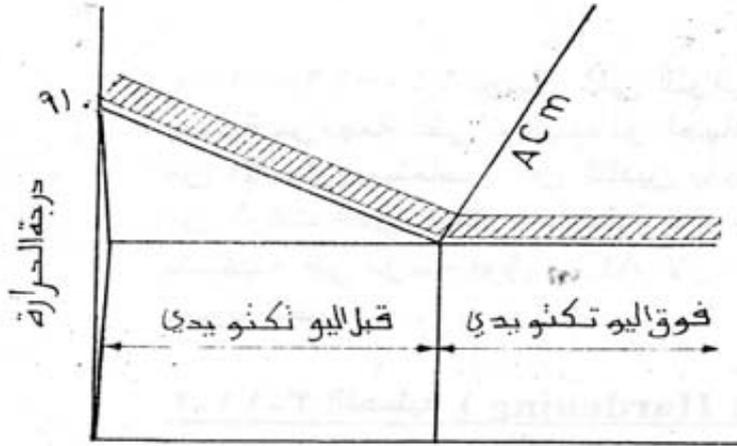


الشكل (2-53) معادلة الفولاذ متوسط - عالي الكربون

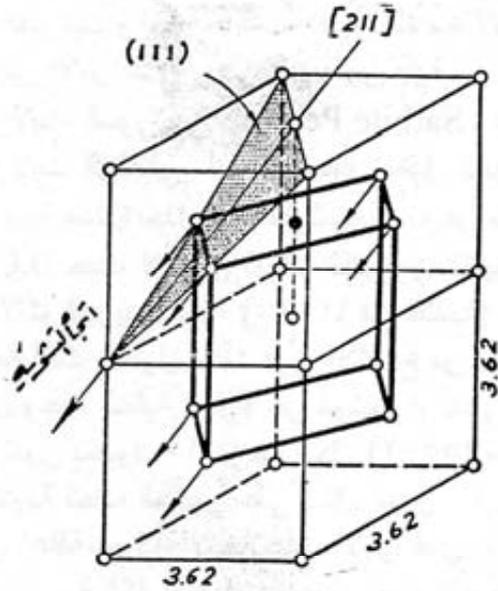
و يساعد التبريد في الهواء على تكون بنية من البيرلايت الناعم و الفيررايت بحبيبات صغيرة ، وهي بنية تتصف بصلادة عالية مقارنة مع البنية الملدنة .ومثال على ذلك ،تقدر صلادة انواع الفولاذ المحتوية على 0.2% ، 0.45% ، 0.8% من الكربون بعد عملية التلدين بحوالي 120،160،180 برينل HB على التوالي ،وبعد عملية المعادلة تقدر بحوالي 130-190-240 برينل على التوالي .

3-11-2 التصليد (Hardening) -:

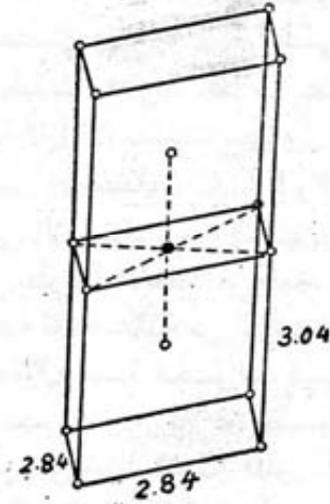
نعني بالتصليد تسخين الفولاذ الى درجة حرارة فوق AC_3 تكون كافية لتكوين اوستنايت متجانس من حيث التركيب الكيماوي ودرجة الحرارة ،ثم ابقائه عند تلك الدرجة لفترة زمنية مناسبة تعتمد على سمك المقطع والتركيب الكيماوي ثم اخماده بعد ذلك باستخدام الماء او الزيت شكل (2-54). اذا تجاوز معدل التبريد قيمة حرجة فان الاوستنايت سيتحول مباشرة الى بنية صلدة جدا هي المارتنسايت .وهو مركب انتقالي بين الاوستنايت F.C.C والفيررايت 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 (54-2) التصليد للفولاذ الكربوني



الأوستنايت - الفيراييت
(وحدة خلية مكعب)



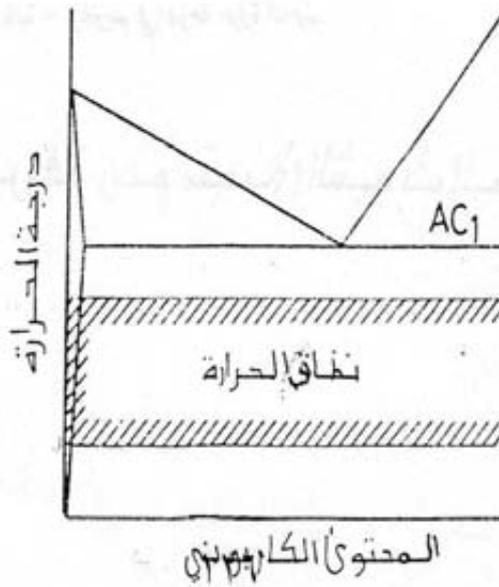
المارتنسايت
(وحدة خلية موشور رباعي)

الشكل (55-2)

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 .

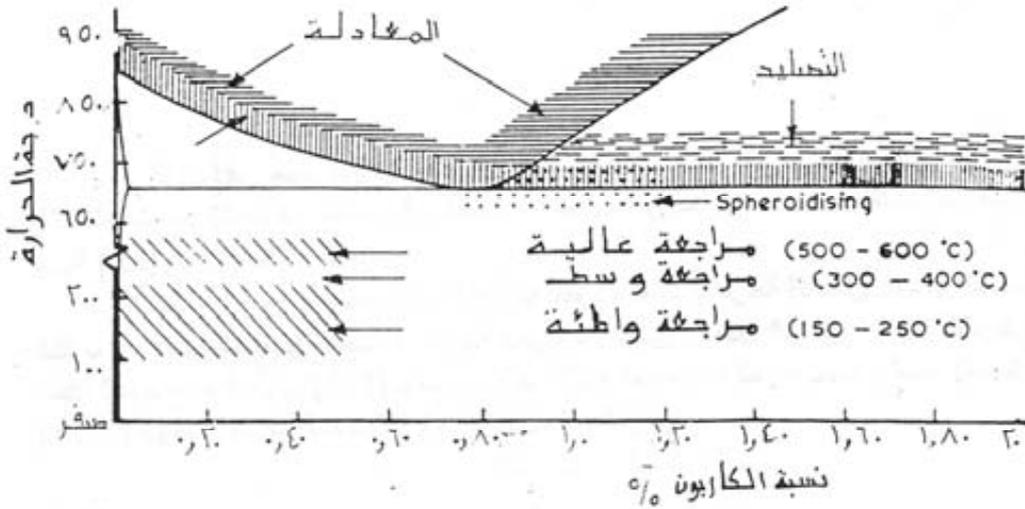
4-11-2 المراجعة (Tempering) :-

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 .



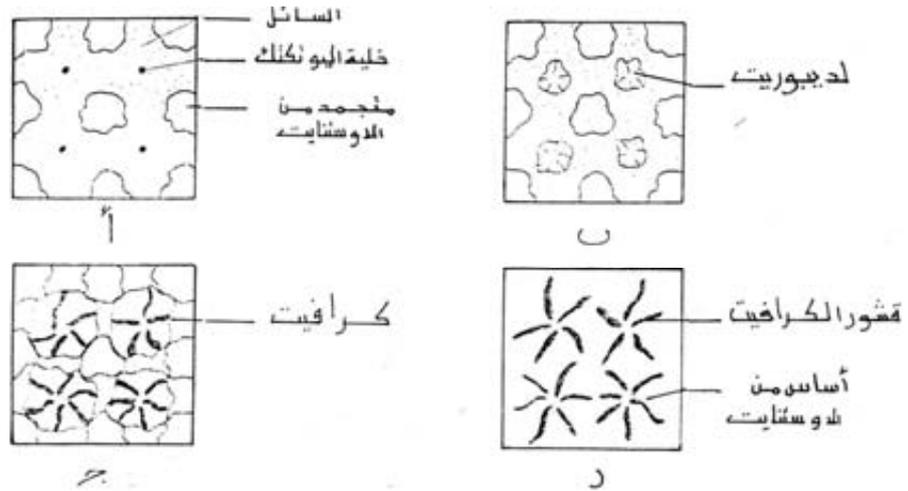
الشكل (2-61) توزيع درجات الحرارة للمعاملات الحرارية للفولاذ الكربوني

12-2 حديد الزهر (cast Iron) :-

تسمى سبائك الحديد الحاوية على نسب كاربون من 2% الى 6.67% حديد الزهر ، ومن الناحية العملية يحتوي حديد الزهر 2.5% - 4.5% كاربون ، 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% كاربون 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 ستتكون 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 اليونكتك 7.3,5% كربون

- الشكل (2-62) تبريد حديد الزهر قبل اليونكتك 2,5% كربون
- أ- تكون خلايا اليونكتك
 - ب- نمو اللديبوريته
 - ج- تفاعل يونكتكي شبه متكامل مع نجوم الكرافيت
 - د- تجمد متكامل مع نجوم الكرافيت في أساس من الأوستينايت

مثال :-

حديد زهر يحتوي على 3% كربون تتكون بنيته عند التجمد في درجة 1131م من اللديبوريته W_{Led} والأوستينايت γW ، 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 الأوستينايت سيفرز سمنتايت ثانوي ، وعند درجة 723م سيتكون البيرلايت ، وعندها ستتكون البنية من اللديبوريته 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 :-

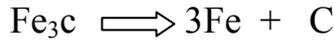
حديد زهر يحتوي على 5% كاربون تتكون بنيته في درجة حرارة 1131م من الليديبوريت والسمنتايت الاولي جد النسبة المئوية لهذين المكونين ؟

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 :

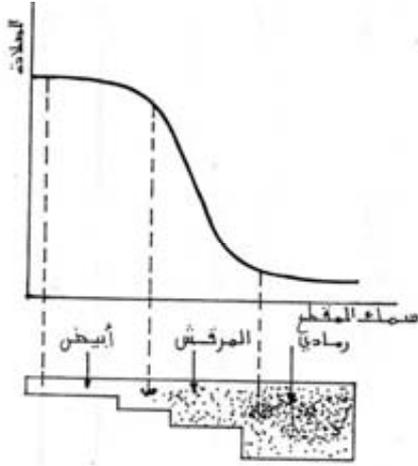
1- معدل التبريد :-

اذا كان معدل التبريد بطيئاً فإنه يؤدي الى تكون الكرافيت وبالتالي تكون حديد

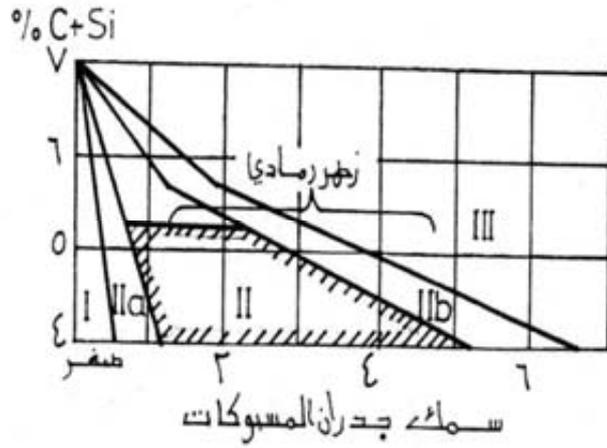
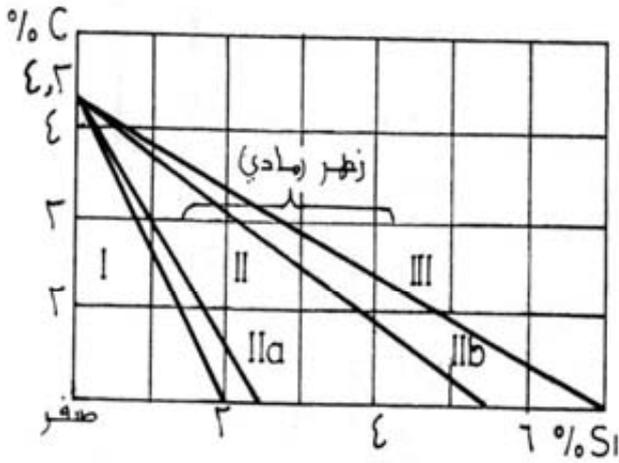
الزهر رمادي ، اما اذا كان سريعاً فان السمنتايت سيستقر ويتكون بذلك حديد الزهر

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 :-

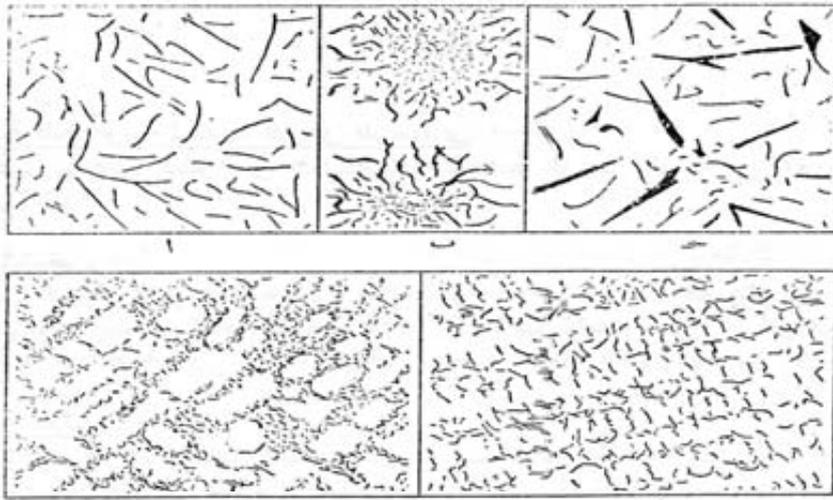
يتميز هذا النوع بوجود كمية كبيرة من الكربون الحر على شكل قشور من الكرافيت الذي يشغل من 6-10% من حجم حديد الزهر الرمادي . ويمتاز هذا النوع من الزهر بسهولة التحضير ورخص الثمن , ومن اهم خواصه الميكانيكية سهولة تشغيله ومقاومته لدرجات الحرارة والكهربائية والصداء والتأكسد , وتتراوح صلابته ما بين 180 و 240 برينل ومقاومته للتشد بحدود 200 نيوتن /مم² .

الحديد الزهر الرمادي	الحديد الزهر الأبيض	
كربون حر ، (كرافيت)	متحد ، كسمتايت	الشكل الذي يوجد فيه الكربون
نسبة الماسكون عالية . نسبة الكبريت واطنة .	نسبة السليكون واطنة . نسبة الكبريت عالية .	التركيب الكيميائي
بطيء .	سريع	معدل التبريد في قالب الصب
طري نسبياً وقابل للتشغيل صلاده برنيل (١٨٠ - ٢٤٠)	صلد وهش وغير قابل للتشغيل ، صلاده برنيل (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 للبي (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 رئيسية كما موضح في الشكل (2-65) مع اتجاه

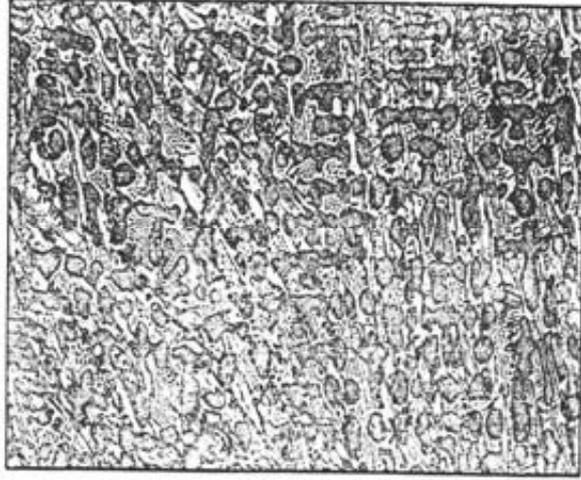


الشكل (2-65) يبين نوع قشور الكرافيت

- توزيع منتظم و اتجاه جزافي
- تجمعات كالورد و اتجاه جزافي
- قشور بمقاسات فوق بعضها مع اتجاه جزافي
- عزل داخل التكوين الشجيري مع اتجاه جزافي
- 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 وبعدهم 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) .

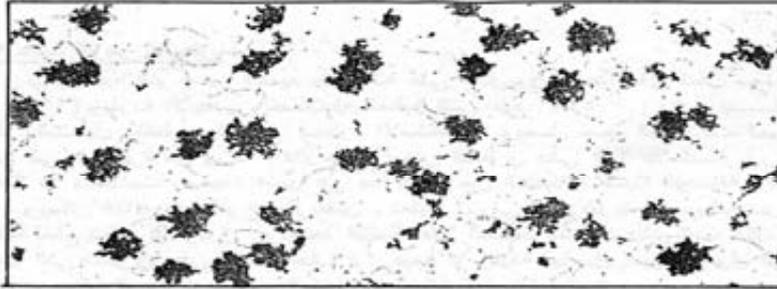
2-12-4- حديد الزهر الطروق Malleable Cast Iron :-

يصنع هذا النوع من الحديد عن طريق تلدين 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

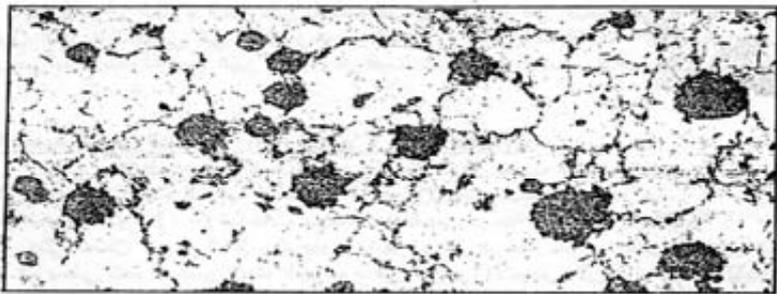
على 6.67% كاربون ، وبالاحتفاظ بالمسبوكة مدة اطول نجد ان السمنتايت سيبدأ بالتحلل الى حديد و كرافيت ، ويترسب الكرافيت الناتج من التحلل على شكل انبثاتات تنمو بمعدلات منتظمة وفي جميع الاتجاهات ، لتبدو في النهاية على شكل عقد او كرات غير منتظمة كما في الشكل (2-68)



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 /مم²

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 /مم² , وانخفاض النسبة المئوية للاستطالة لتصل الى ما بين 2-10 % فقط .

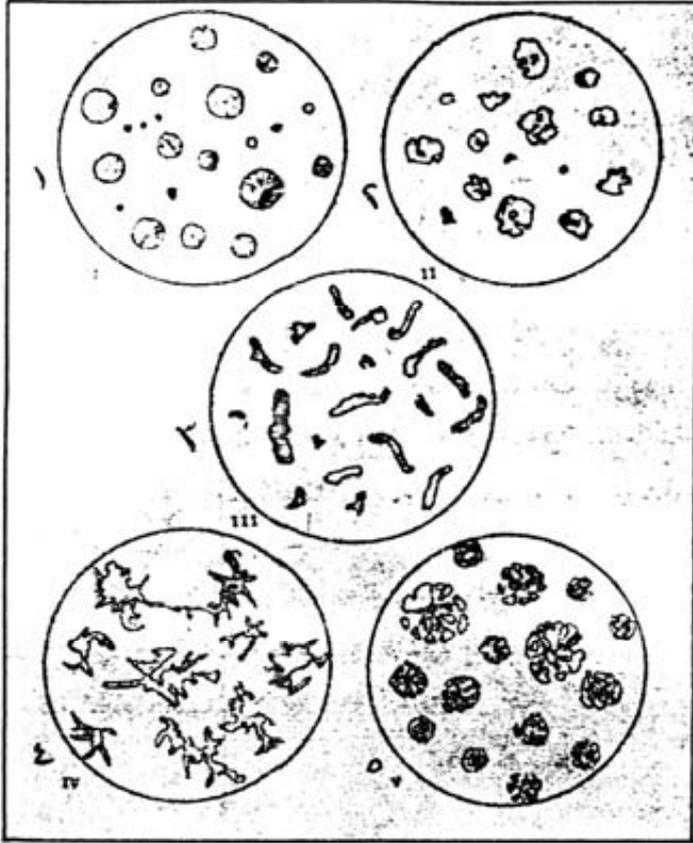
5-12-2- حديد الزهر الكروي :-

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 :-

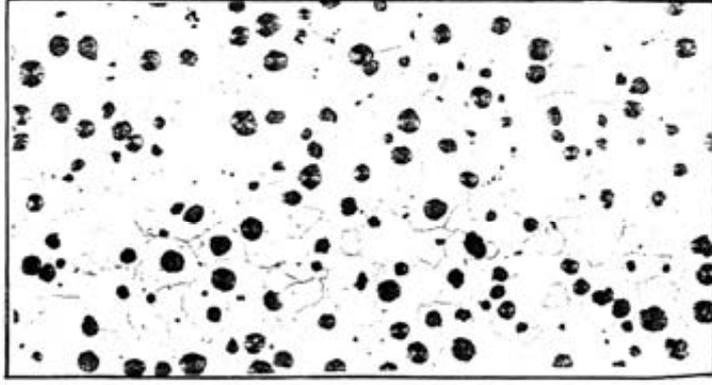
ذكرنا ان شكل الكرافيت في هذا النوع هو كروي , الا انه وفي الأنواع غير الجيدة منه توجد أشكال أخرى وكما موضح في الشكل (2-69) اما الأشكال الأخرى فأن لها

- 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 :-

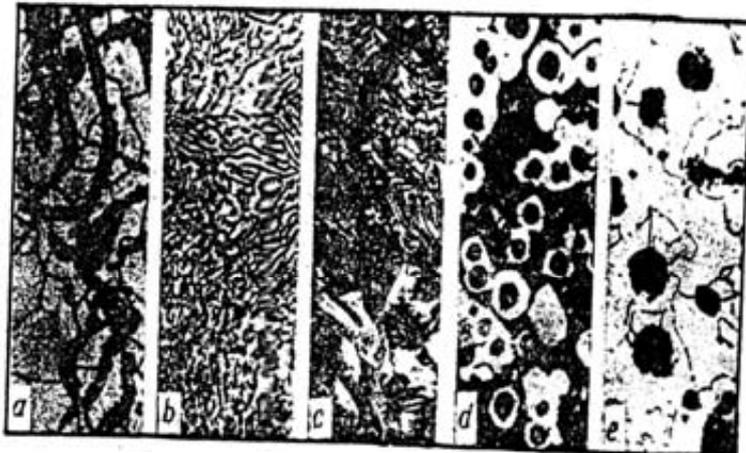
أ- حديد زهر بيرلايت + سمنايت (P+led) وهو زهر خال من الكرافيت وينتج من التبريد العنيف للزهر الأبيض

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 الميكروسكوبية 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 :-

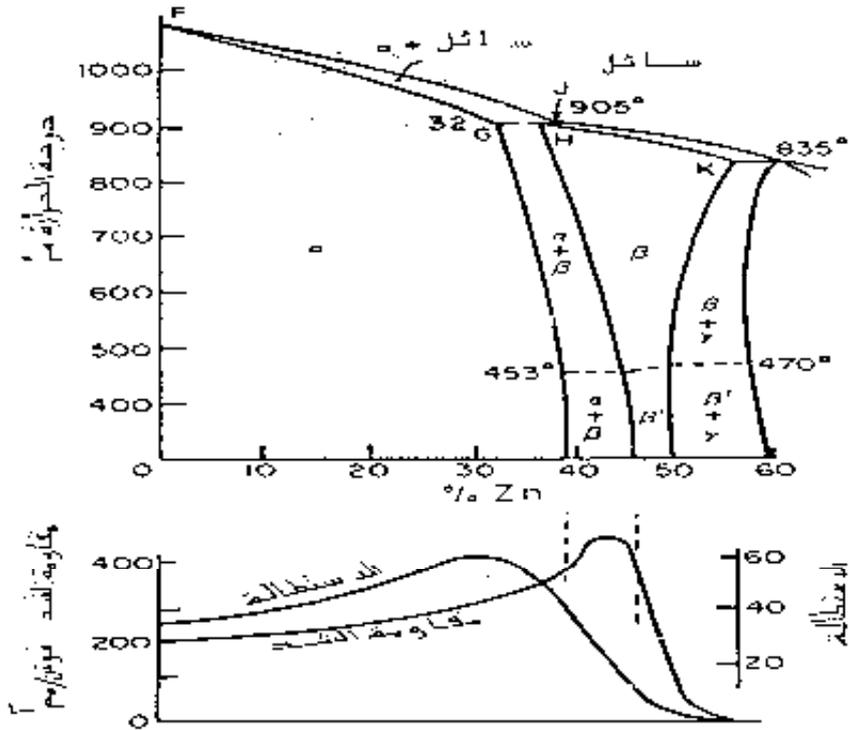
ويمكن تصنيف سبائك النحاس الشائعة الى ما يأتي :

- 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 (α) 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 (β) 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 (γ) والدلتا (δ) 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 α مع الذي يمتاز بلليوننة والمطيلية العاليتين بينما يظهر الطور (β) 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 (β) 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 (β') وهو طور يتميز بالصلادة والقصفة معاً .



الشكل (3-73) 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 خارصين فزيادة محتوى خارصين 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 الى أقصى قيمة لها عندما يصل محتوى خارصين الى 45% وستقل متانة النحاس الأصفر بشدة في مجال الطور (β) ولهذا السبب فإن سبائك النحاس الأصفر التي يزيد فيها محتوى خارصين على 42% لا تستخدم في الصناعة أما الأستطالة النسبية فإنها تصل الى أقصى قيمة لها عندما تكون نسبة خارصين بحدود 30-32% .

الخواص الميكانيكية والأستخدام :-

تستخدم سبائك النحاس الأصفر التي تحتوي على 30% خارصين في صناعة الصفائح المشككة 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/مم² والشكل (2-73) يبين التركيب المجهرى لهذه السبيكة .



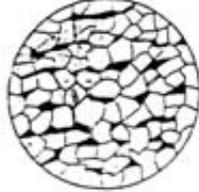
ب- مشكل على البارد وملدن



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 /مم² وصلادة ما بين 75 و 150 فيكرز ، وأستطالة نسبية تبلغ 35% والشكل (2-74) يبين التركيب المجهرى لهذا النوع من السبائك .



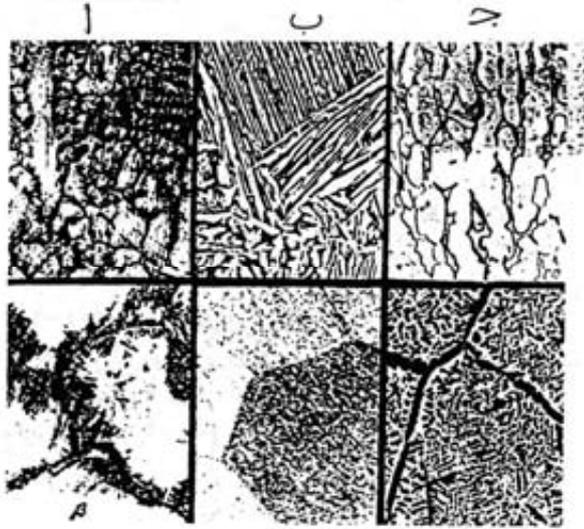
(ب) مشكلة على الساخن (مبنوقة)



(أ) كمسبوكة

الشكل (2-74) البنيان الدقيقتان للنحاس الأصفر 60/40

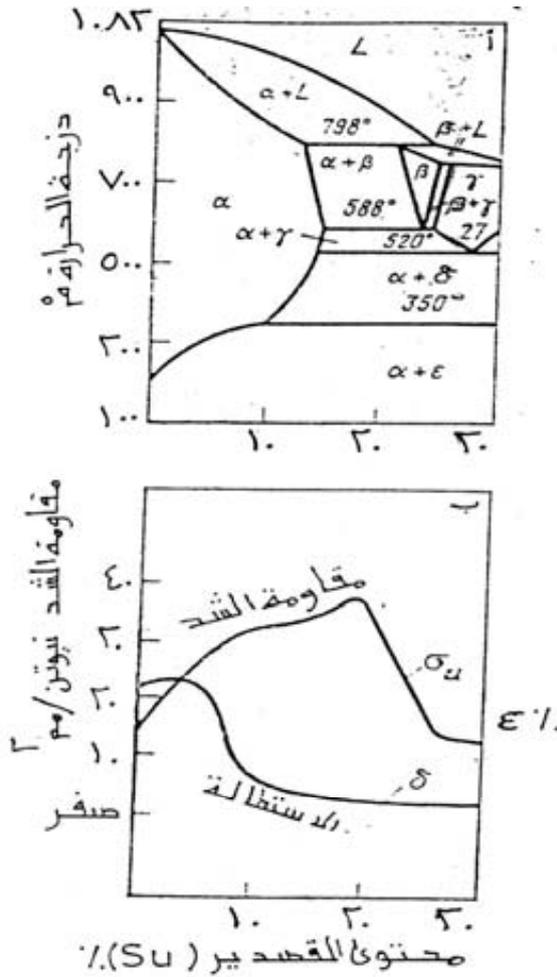
وأذا أضيفت لهذا النوع من السبائك عناصر أخرى مثل المنغنيز والألمنيوم والقصدير ، والحديد ، والنيكل ، ستتكون سبائك تمتاز بالمقاومة العالية للتآكل ، ومقاومة شد عالية قد تصل الى 740 نيوتن /مم² والشكل (2-75) يبين التراكيب المجهرية لبعض أنواع النحاس الأصفر المختلفة .



- الشكل (2-75) يبين التراكيب المجهرية لبعض أنواع النحاس الأصفر المختلفة .
- أ- نحاس اصفر مسبوك (الجزر طور β) و(القلب طور α)
- ب-نحاس اصفر مسبوك (الطور الغامق β) و(الطور الفاتح α)
- ج- نحاس اصفر ميثوق يلاحظ استتالة β
- د- نحاس اصفر أجريت عليه عملية تسخين و أحماد في الماء يلاحظ الواح α مترسبة على الحدود الحبيبية β
- ه- نحاس حاوى على 45% خارصين يلاحظ حبيبات β المنتظمة
- و- نحاس حاوى على 57% خارصين يلاحظ شبكة (γ) و الجسيمات في الاساس β

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 (α) وتتكون في هذه السبيكة مركبات الكترونية متعددة مثل Cu_2Sn (الطور β ذو النسبة 2/3) ، والمركب $Cu_{31}Sn_8$ (الطور δ ذو النسبة 13/21) ، والمركب Cu_3Sn (والطور ϵ ذو النسبة 4/7) ، كما توجد مجموعة من التحولات الحولية (البريتكتيكية) وتحولات من النوع اليوتكتويدي ، فعند درجة 588م يحدث تحول يوتكتويدي بالطور β مع تكوين خليط من الطور (α) والطور (γ) ، اما عند درجة 520م فستتحول بلورات المحلول الجامد (γ) الى خليط من الطورين (α) و(δ) وعند درجة حرارة 350م تقريباً ، سيتحول الطور (δ) الى المحلول الجامد (α) والمركب (ϵ) ، ويحدث هذا التحول عند التبريد البطيء جداً فقط . اما في ظروف التبريد الواقعية فإنه سيتكون البرونز من الطور (α) والمركب (δ) .



الشكل (٢ - ٧٦) الرسم البياني لظوار

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 (α) وتتكون بنيته من حبيبات متعددة الاسطح , اما اذا زاد محتوى القصدير على 5% , فستتكون بنيته من الطور (α) 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 δ 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 /مم² , 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 α . 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 /مم² , 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 .



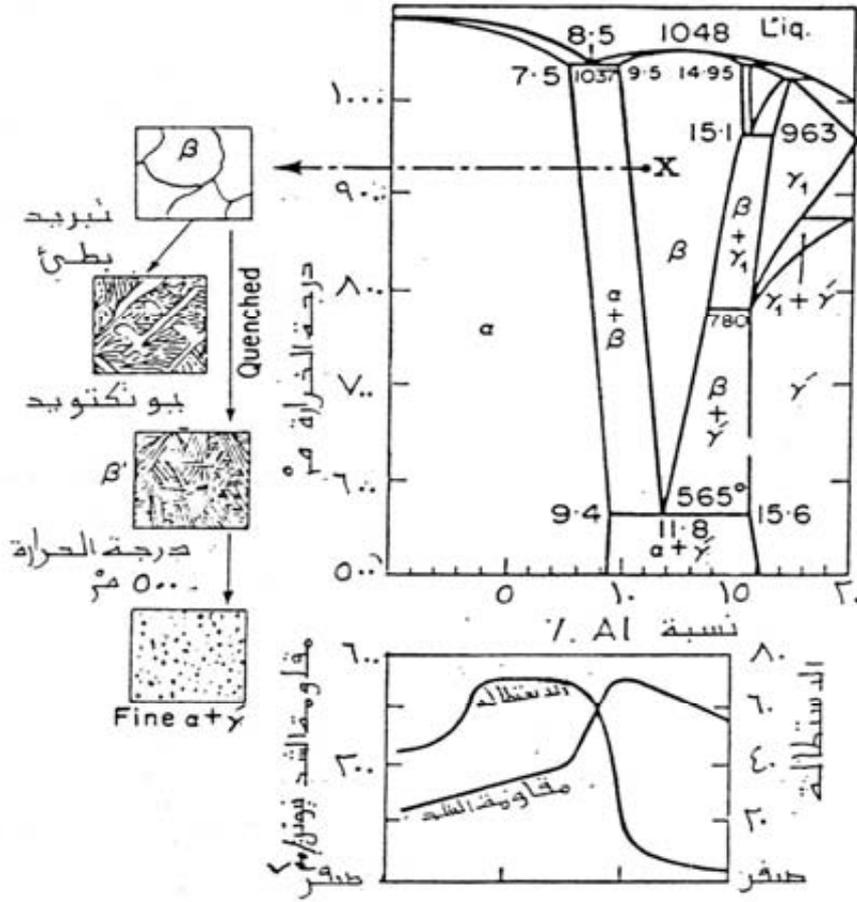
الشكل (2-77) البنية المجهرية للبرونز القصديري

أ- بعد السباكة

ب- بعد التشكيل و التلدين

ج- سبائك النحاس الالمنيوم :-

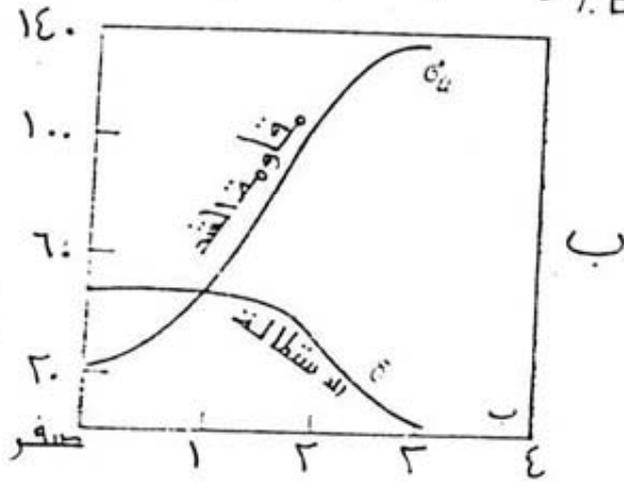
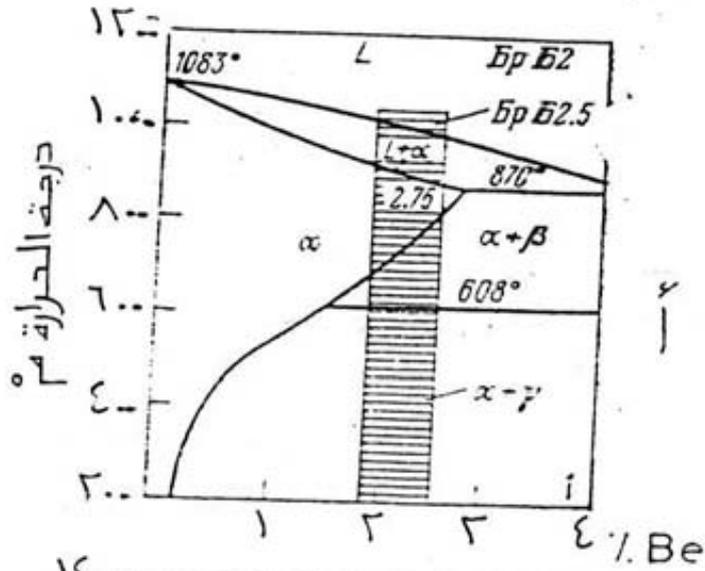
الشكل (2-78) يمثل مخطط التوازن الحراري للنحاس-الالمنيوم ، اذ يتكون محلول جامد من الطور (α) عندما تكون نسبة الالمنيوم اقل من 9%. اما البرونز الذي يحتوي على نسب اعلى من ذلك ،فانه يتكون من خليط من الطورين ($\alpha + \gamma'$) (الطور γ' هو مركب الكتروني $Cu_{32} Al_{19}$). وعندما تزيد نسبة الالمنيوم على 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 γ' 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 /مم²، 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 (α) 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 α 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 /مم² ، واستطالة



محتوى البيريليوم (بالوزن) % Be

الشكل (٢ - ٧٩) أ - الرسم المبياني لاطوار

النحاس - بربليوم

ب - الخواص الميكانيكية بعد

الذخام 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 /مم² 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/مم² ، 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 ايضاً الى نوعين هما :

1. سبائك غير قابلة للتعامل الحراري.
2. سبائك قابلة للتعامل الحراري

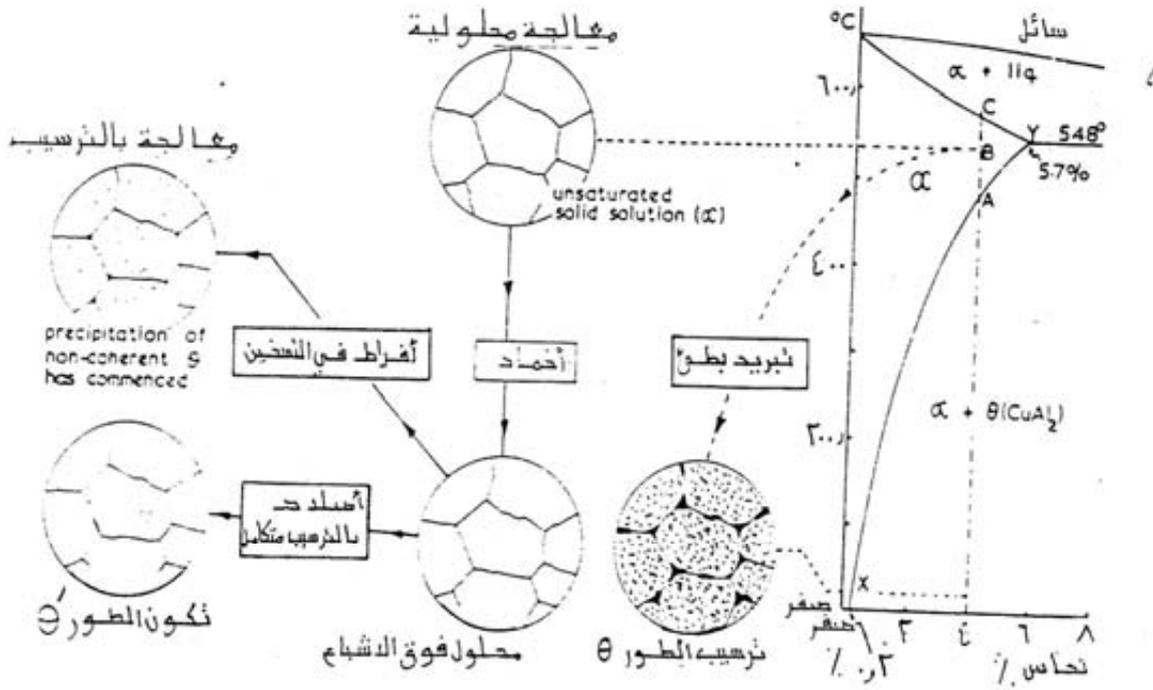
ثانياً - السبائك المشكلة **wrought alloys** (على يسار النقطة E) وتقسم ايضاً الى :

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 :-

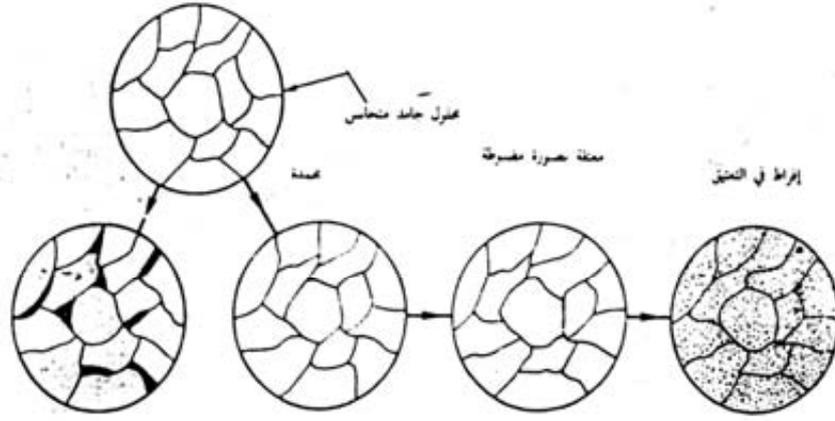
تدخل مرحلتا المعاملة المحلولية والتعتيق في عملية تصليد السبائك عن طريق ترسيب الاطوار وهو ما يسمى (التصليد بالترسيب precipitation hardening) . ويمكن توضيح هاتين المعاملتين على سبيكة الدور الومين (AL-4%Cu) والمبينة في الشكل (2-81) حيث تذوب نسبة 5.7% من النحاس في الالمنيوم عند درجة 548م° ليتكون المحلول الجامد (α) ، 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 α 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 التغييرات في البنية أثناء التصليد بالتعتيق .

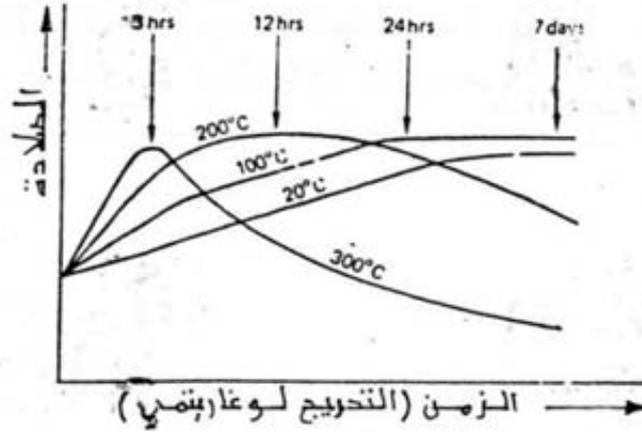
وتتم المعاملة المحلولية برفع درجة حرارة هذه السبيكة الى درجة 500م° , والابقاء عليها لفترة تسمح بأذابة المركب الكيميائي $Cu Al_2$ وتكوين المحلول الجامد α المتجانس , ثم الاخمد بالماء من هذه الدرجة الى درجة حرارة الغرفة وستمنع عملية الاخمد من ترسيب المركب $Cu Al_2$ والابقاء على المحلول الجامد α وهو محلول فوق الاشباع 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 α مما يجعلها عائقاً لحركة الانخلاعات , مما يؤدي الى زيادة مقاومة السبيكة الميكانيكية وصلادتها , وهذا ما يعرف بالتصليد بالتبريد واحيانا التصليد 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 :-

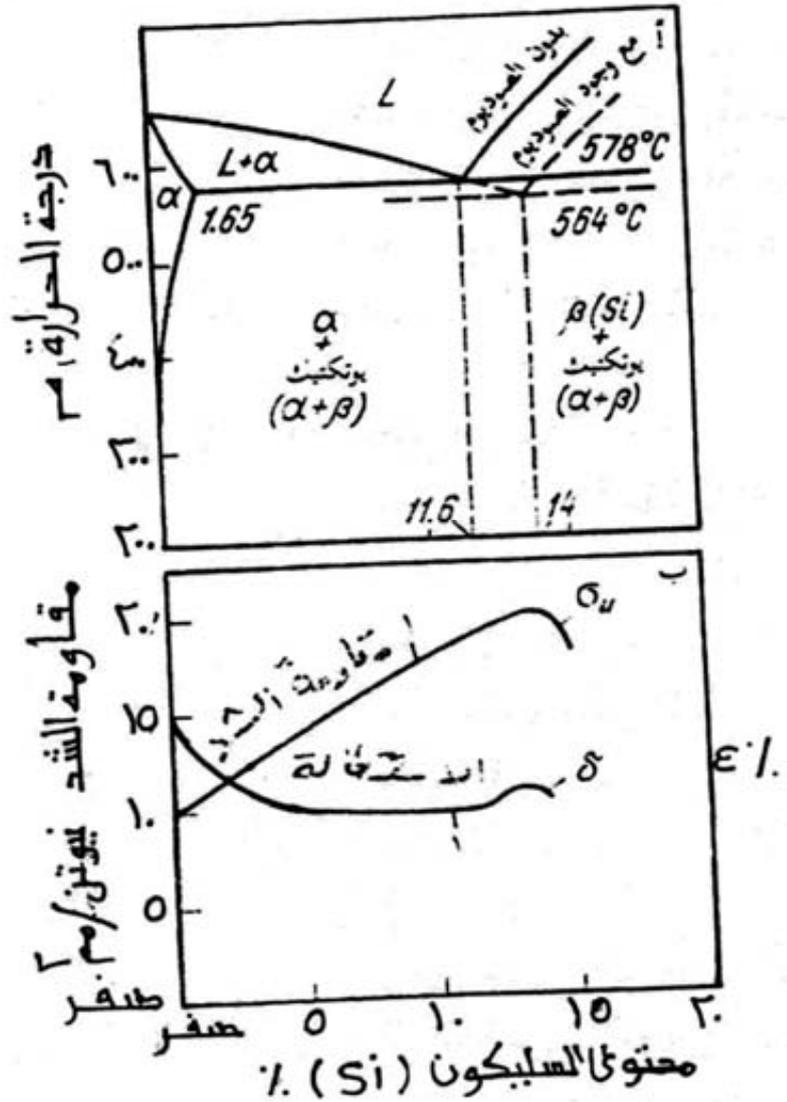
ويشمل هذا النوع السبائك التي تحتوي على نسبة ما بين 10 و 13% سليكون وتمتاز بالسيولة العالية و الانكماش الواطئ ، وتتكون بنيتها من اليوتكتي. شكل (2-84) .

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 α شجيري في أساس من اليوتكتي الدقيق كما في الشكل (2-85) .

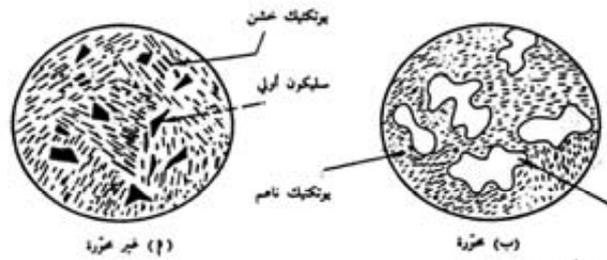
ان اضافة الصوديوم من شأنه ان يزيح تكون اليوتكتك الى 14% بدلا من 11.6% كما في الشكل (2-84-أ) والى خفض درجة حرارة اليوتكتك من 578م° الى 564م° .وتستخدم مثل هذه السبائك في صناعة المقاطع الرقيقة والمسبوكات المعقدة مثل اغلفة المقاييس والمحركات وصناديق المفاتيح الكهربائية .وتمتاز هذه السبائك بعد اضافة الصوديوم بمقاومة شد تبلغ 200 نيوتن /مم² ، 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 α من المنغيز في الالمنيوم مع كمية قليلة من طور اضافي من دقائق المركب $AL_6 Mn$. اما المحلول الجامد α 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

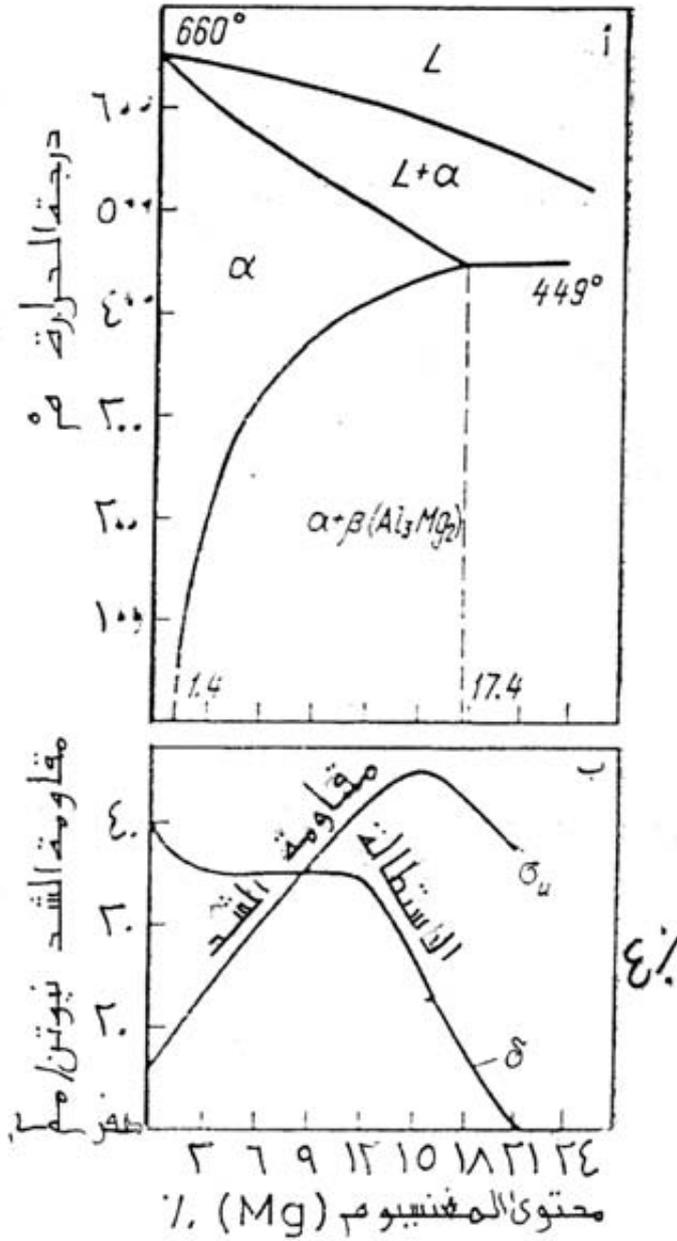
ويمكن تصليد هذه السبائك بالمعاملة المحلولية والتعتيق ، وهي تغطي عادة بطبقة من معدن الالمنيوم النقي لحمايتها من التآكل . وتستخدم السبيكة الاولى في العديد من الصناعات الهندسية خاصة في بناء الطائرات . وهي متوفرة كمطروقات والواح وانابيب . وتتميز السبيكة الثانية بصعوبة تشكيلها ، كما انها تكون عرضة لتشقق التآكل 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 والوانوي 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

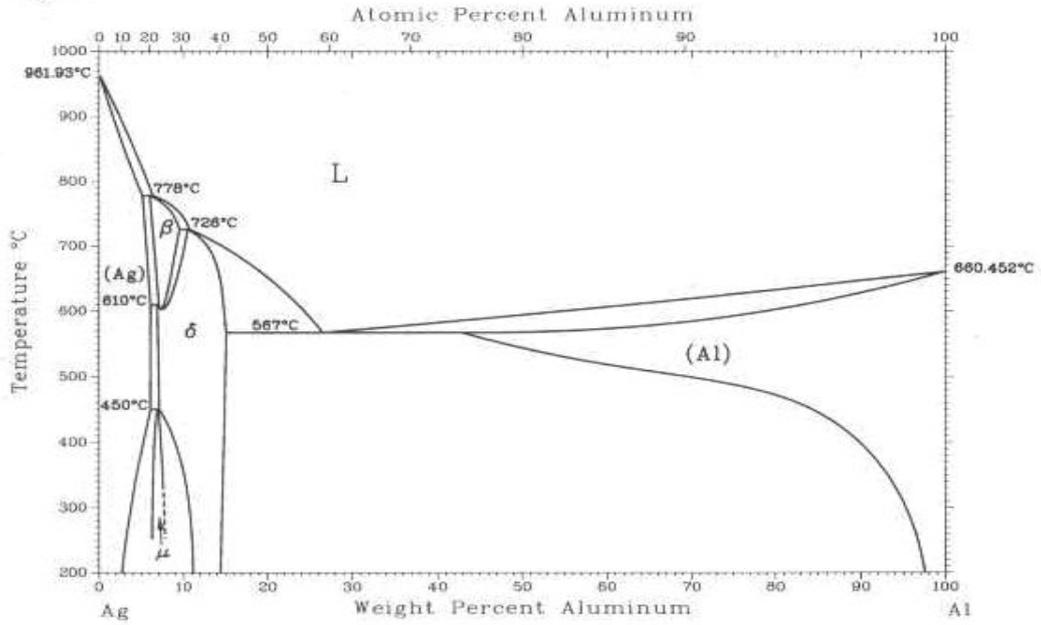
وأحياناً تضاف احرف اخرى مثل H-T-F-O وتضاف لهذه الاحرف اعداداً اخرى
تعني نوع المعاملة الحرارية التي مرت بها السبيكة .



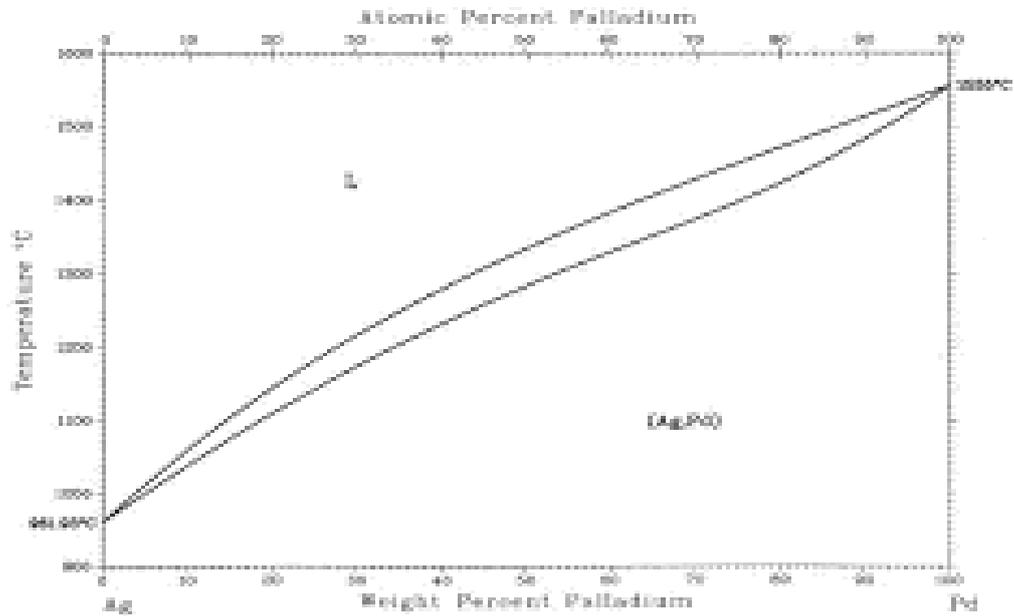
الشكل (2-86) أ- الرسم البياني لاطوار سبائك الالمنيوم - المغنيسيوم
ب- تأثير المغنيسيوم على الخواص الميكانيكية للالمنيوم

نماذج من السبائك الشائبة

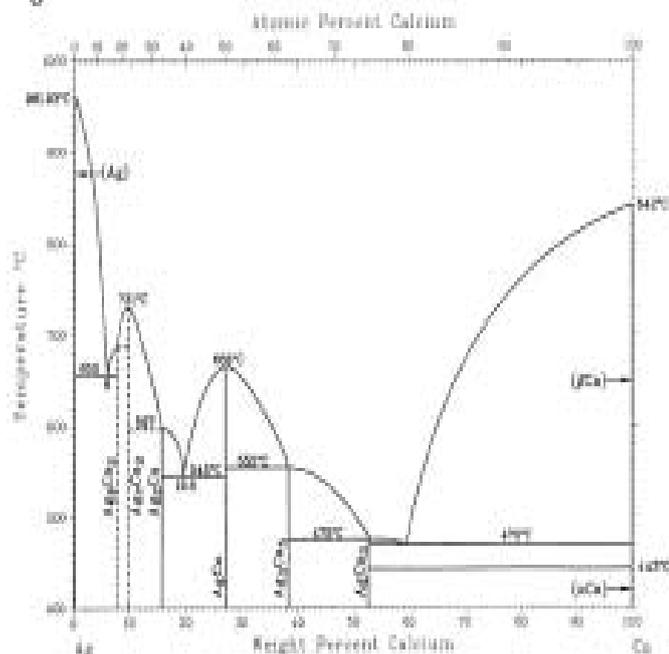
Ag-Al



Ag-Pd



Ag-Ca

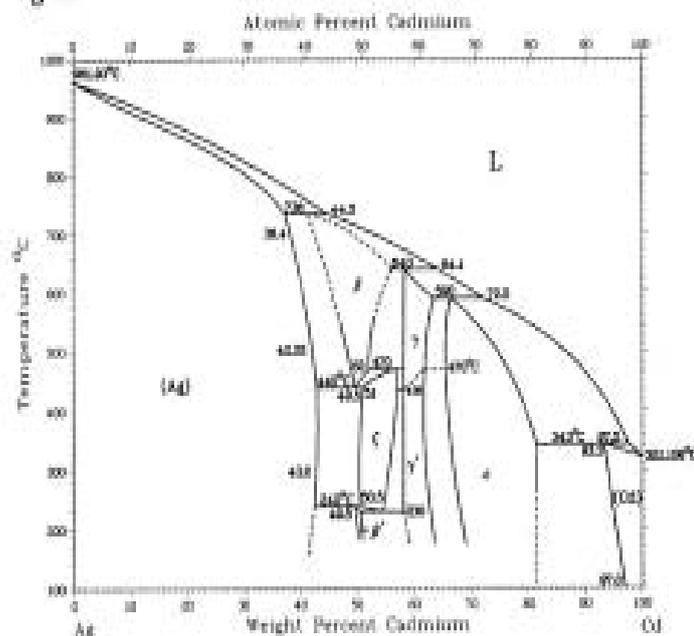


Phase	Composition, wt% Ca	Pearson symbol	Space group
(Ag)	0	cF4	$Fm\bar{3}m$
Ag ₂ Ca ₂	7.7
Ag ₂ Ca	9.6	bP18	$P6_322$
Ag ₂ Ca	15.6	cF12	$Fm\bar{3}m$
AgCa	27.1	cC8	$Cmcm$
Ag ₂ Ca ₂	38.2	bF32	$Fm\bar{3}m$
AgCa ₂	52.7
(αCa)	100	cF4	$Fm\bar{3}m$
(βCa)(α)	100	cI2	$Ic\bar{3}m$

(α) Above 443 °C

Binary Alloy Phase Diagrams/2•27

Ag-Cd

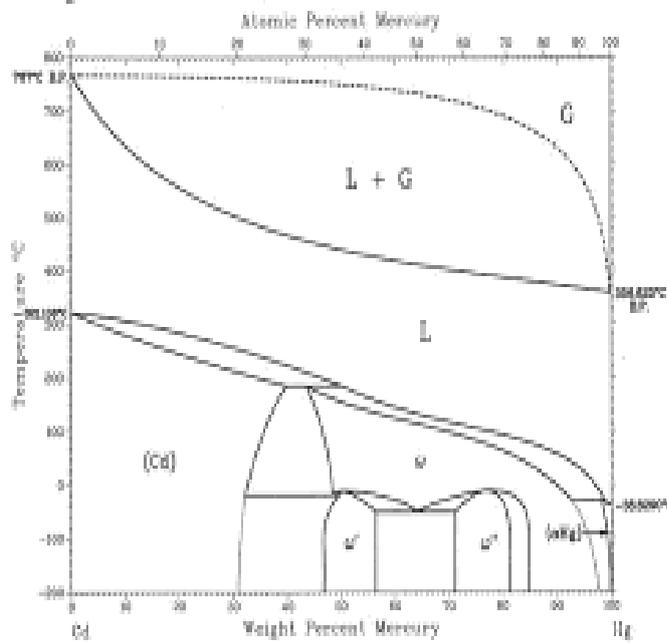


From [Hansen]

Phase	Composition, wt% Cd	Pearson symbol	Space group
(Ag)	0 to 41.2	cF4	$Fm\bar{3}m$
β	41 to 56	cI2	$Ic\bar{3}m$
β'	49.5 to 51.0	(a)	...
γ	50.5 to 57	(b)	...
γ'	58 to 63.5
δ	58 to 63.5	cF2	$F\bar{4}3m$
ε	65.4 to 82	AP2	$P6_3/mmc$
(Cd)	93.3 to 100	AP2	$P6_3/mmc$

(a) Ordered bcc. (b) cph

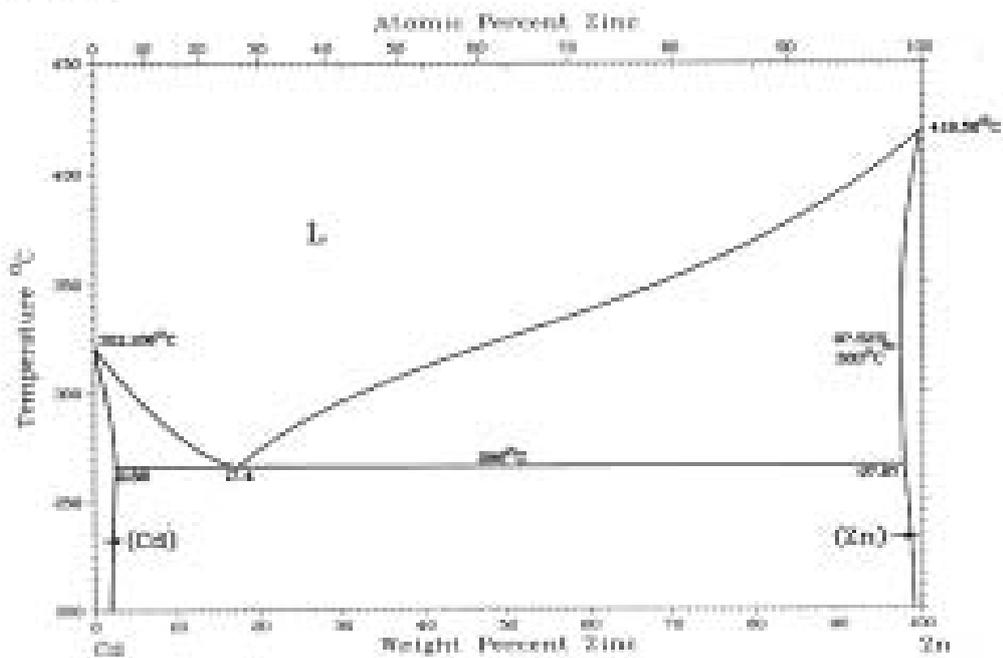
Cd-Hg



Phase	Composition, wt% Hg	Pearson symbol	Space group
(Cd)	0 to 37	AP2	$P6_3/mmc$
α	42 to 94	$r2$	$I4/mmm$
α'	47 to 56	$r6$	$I4/mmm$
α''	71 to 81	$r6$	$I4/mmm$
(αHg)(a)	98 to 100	$hR1$	$R\bar{3}m$
(βHg)(b)	= 100	$r2$	$I4/mmm$

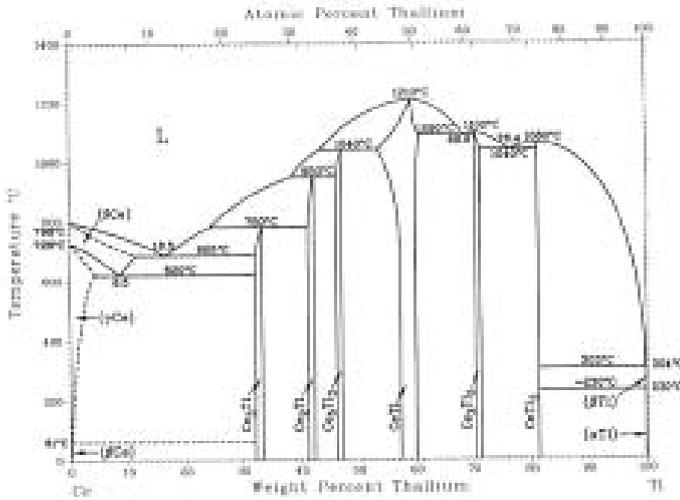
(a) From -38.820 to -193 °C at 100 wt% Hg. (b) Below -193 °C

Cd-Zn



2-138/Binary Alloy Phase Diagrams

Ce-Tl

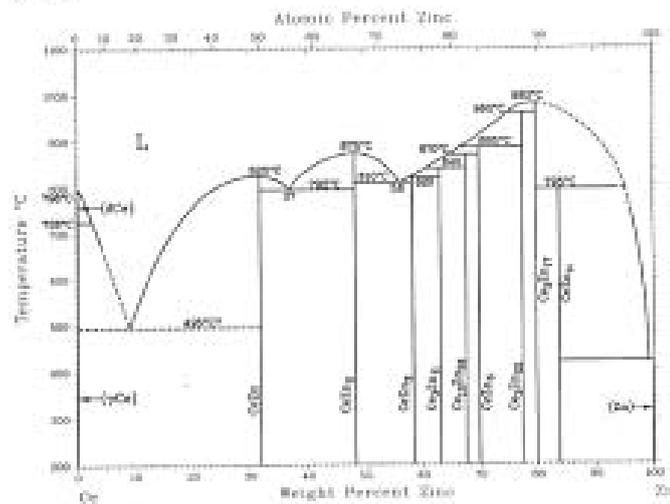


S. Delfino, A. Saccone, A. Palenzona, and R. Ferro, unpublished

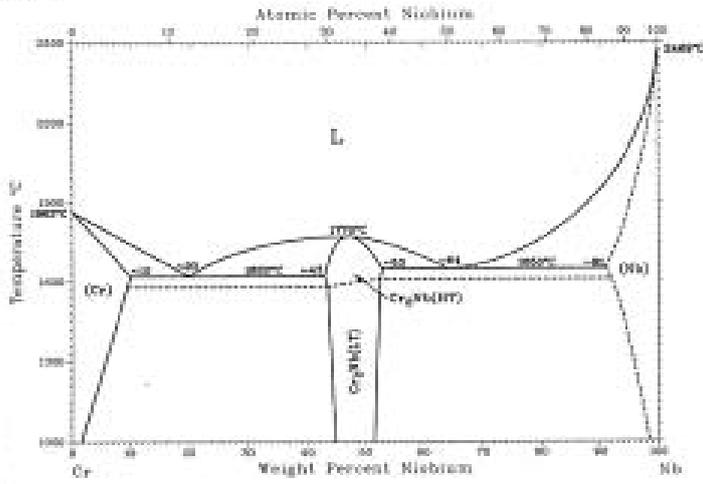
Phase	Composition, wt% Tl	Pearson symbol	Space group
(αCe)	0	cF4	$Fm\bar{3}m$
(βCe)	0	bF4	$P6_3/mmc$
(γCe)	0 to 4	cF4	$Fm\bar{3}m$
(δCe)	0 to 13	cF2	$Fm\bar{3}m$
Ce ₂ Th(a)	-32.1 to -33.3	cP4	$Fm\bar{3}m$
	-33	cF4	$Fm\bar{3}m$
Ce ₂ Th	-42
Ce ₂ Th ₃	-46 to -47	dI32	$Ammn$
CeTh(b)	-53 to -60	cP2	$Fm\bar{3}m$
		(or cF2)	$Fm\bar{3}m$
CeTh(c)	-53 to -60	cP2	$P4/mmm$
Ce ₂ Th ₅	-70 to -71	cC32	$Cmcm$
CeTh ₃	81	cF4	$Fm\bar{3}m$
(βTl)	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



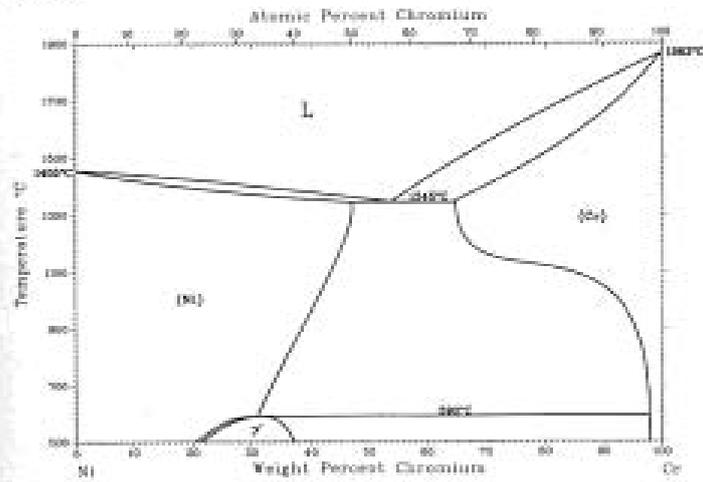
Cr-Nb



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 ₂ Nb (HT)	~43 to ~53	bP12	<i>P6₃/mmc</i>
Cr ₂ 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

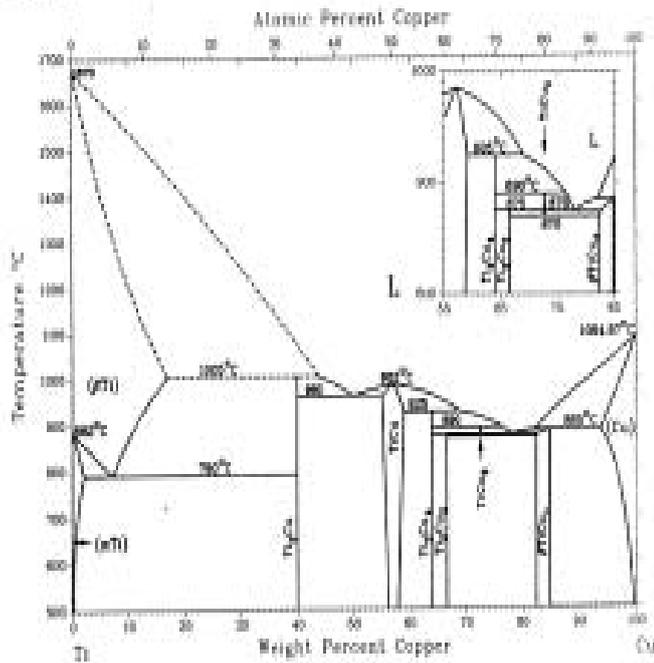


P. Nash, 1991

Phase	Composition, wt% Cr	Pearson symbol	Space group
(Ni)	0 to 47.0	cF4	<i>Fm</i> $\bar{3}m$
Ni ₃ Cr or γ'	21 to 37	cF8	<i>Fm</i> $\bar{3}m$
(Cr)	65 to 100	cF2	<i>Im</i> $\bar{3}m$
Metastable phases			
σ	~28	cP30	<i>P4₃/mmn</i>
δ	100	cF8	<i>Fm</i> $\bar{3}m$

Cu-Ti

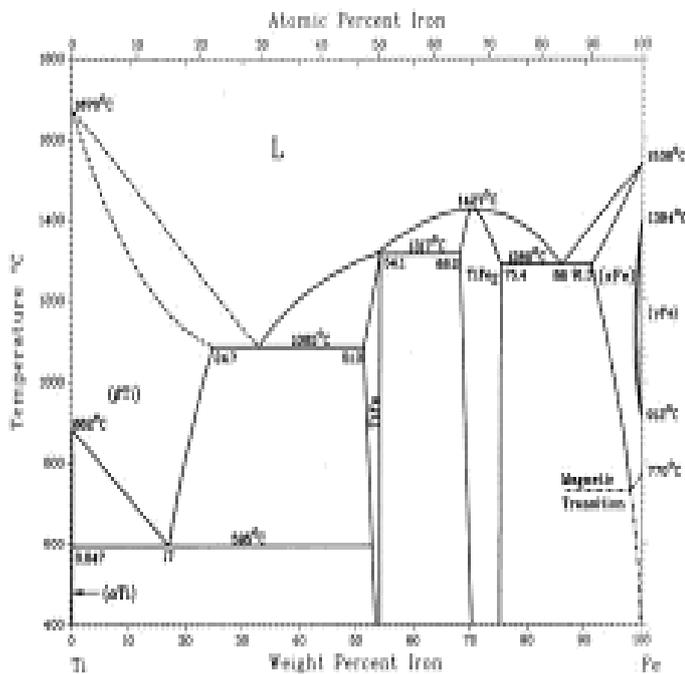
J.L. Murray, 1987



Phase	Composition, wt% Cu	Pearson symbol	Space group
(αTi)	0 to 2.1	hP3	<i>P6₃/mmc</i>
(βTi)	0 to 17.2	cI2	<i>Im$\bar{3}m$</i>
Ti ₂ Cu	19.9	tI6	<i>I4/mmm</i>
TiCu	55 to 59	tP4	<i>P4/mmm</i>
Ti ₃ Cu ₄	63.9	tI4	<i>I4/mmm</i>
TiCu ₂	67	tP10	<i>P4/mmm</i>
TiCu ₃	72.7	cC12	<i>Amn2</i>
TiCu ₄	83 to 84.9	oP20	<i>Fmnm</i>
αTiCu ₄	83 to 84.9	tI0	<i>I4/m</i>
(Cu)	94 to 100	cF4	<i>Fm$\bar{3}m$</i>
Metastable phases			
TiCu ₁	...	tP8	<i>Fmnm</i>
β*	...	tP2	<i>P4/mmm</i>

Fe-Ti

J.L. Murray, 1992



Phase	Composition, wt% Fe	Pearson symbol	Space group
(αTi)	0 to 0.047	hP2	<i>P6₃/mmc</i>
(βTi)	0 to 24.7	cI2	<i>Im$\bar{3}m$</i>
TiFe	51.3 to 54.1	cP2	<i>Fm$\bar{3}m$</i>
TiFe ₂	68.2 to 73.4	hP12	<i>P6₃/mmc</i>
(αFe)	91.3 to 100	cI2	<i>Im$\bar{3}m$</i>
(γFe)	99.5 to 100	cF4	<i>Fm$\bar{3}m$</i>
β	(a)	hP3	<i>P6₃/mmc</i>

(a) Metastable phase