

: تقنية مواد الفرقة الثانية

(تبريد - -)

لله

/ . .

الثانية عن

السبائك المعدنية ومخططات

الإتزان الحرارى

١-٢ أهمية خلط الفلزات :

الخواص الطبيعية للفلزات النقية لا تفي في أغلب الأحيان بما يتطلبه التطبيق العملي لهذه الفلزات، لذلك يغلب استخدام الفلزات في صورة سبائك (خلائط) بغرض التعديل في خواصها أو للحصول على خواص جديدة لا يتصف بها أي فلز من الفلزات المكونة للسبيكة ، فالسبيكة أو الإشابه إذا خليط أو مركب يتكون من فلزين أو أكثر. ويطلق على السبيكة المتكونة من عنصرين بالسبيكة الثنائية Binary Alloy وعلى السبيكة التي تتركب من ثلاثة عناصر بالسبيكة الثلاثية Ternary Alloy وهناك أيضاً سبائك رباعية وخماسية إلخ.

٢-٢ تكوين المركبات Compounds :

يمكن تقسيم المركبات السبائكية إلى نوعين :

أ- مركبات معدنية تتبع قانون التكافؤ العادي Intermettalic Compounds

وهي بتركيب معين ولها نقطة انصهار محددة وتخضع لقانون التكافؤ المعتاد مثل:



ب- مركبات الكترونية Electronic Compounds

وهي مركبات معدنية لا تخضع لقانون التكافؤ وتكون على ثلاثة أنواع اعتماداً على النسبة بين مجموع إلكترونات التكافؤ (في المدار الخارجي) إلى عدد الذرات الكلي في الجزيئات المكونة للمركب ويسمى النوع الأول صنف β وهو بنسبة $3/2$ ، ويسمى النوع الثاني بصنف γ وهو بنسبة $13/21$ ، ويسمى النوع الثالث بصنف ϵ وهو بنسبة $4/7$ ، ومن الأمثلة على ذلك المركب CuZn حيث يكون تكافؤ النحاس 1 وتكافؤ الزنك 2 ومجموع التكافؤ 3 وعدد الذرات 2 ، فالنسبة إذا هي $2/3$ (الصنف β). أما المركب $Cu_{31}Sn_8$ حيث يكون التكافؤ للنحاس 1 وتكافؤ القصدير 4 أي أن مجموع التكافؤ 63 ، عدد الذرات $8+31=39$ فالنسبة إذا هي $21/13 = 63/39$ (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.

٢-٢ المحاليل الحامدة Solid Solution :

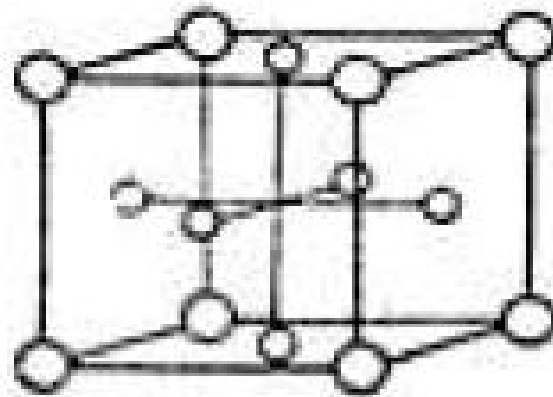
في الحالة المنصهرة تقبل معظم المعادن الذوبان بعضها ببعض طالما كانت أوزانها النوعية متساوية او متقاربة، اما اذا اختلفت فان ذراتها قد تنفصل فيترسب الثقيل في القاع وتطفو ذرات المعدن ذو الوزن النوعي المنخفض، وقد تبقى هذه الحالة قائمة حتى في حالة التجمد دون أي اختلاط او ذوبان فيما بينها. واذ حدث ذوبان تام فيما بينها في الحالة الصلبة فان الشبكة 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 الشبكة الناتجة متشابهة بالمظهر مع حبيبات المعادن النقية المكونة لها، كما ان البنية البلورية للشبكة تمثل البنية البلورية للمعدن المذيب (يقصد بالمعدن المذيب المعدن الموجود بنسبة أعلى في الشبكة) بينما تكون ذرات المعدن المذاب (المعدن الموجود بنسبة أقل) موزعة في تلك البنية عن طريقين هما:

١-٢-٢ المحلول الحامد الإحلالي

: Substitutional Solid Solution

هو المحلول الذي تحتل ذرات المذاب فيه أماكن ذرات المذيب في نقاط تقاطع الشبكة البلورية، ونتيجة لذلك فإن 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.

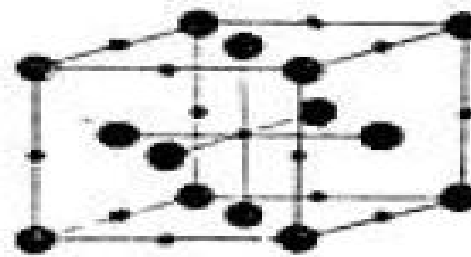
اما الشبكة البلورية المثالية Super Lattice فهي نوع خاص من المحلول الجامد الإحلالي الذي يمثل توزيعاً منتظماً جداً لذرات المذيب والمذاب بخلاف التوزيع العشوائي الاعتيادي، وتحتل ذرات المذاب في المحلول الجامد المثالي مواقع محددة في الشبكة البلورية كما موضح في الشكل (١-٣) الذي يمثل سبيكة النحاس والذهب حيث تكون نسبة ذرات النحاس $1/3$ حيث تمثل الدوائر الصغيرة ذرات النحاس والدوائر الكبيرة ذرات الذهب ، وتحتل ذرات النحاس بعد التنظيم نقاط متوسط أوجه الشبكة البلورية بينما تحتل ذرات الذهب زوايا وحدة الخلايا.



الشكل (١-٣)

٢-٢-٢ 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 موضح بالشكل (٢-٣) الذي يمثل محلول جامد بيني للكربون في الحديد γ (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 ذرات الزوايا، ويلاحظ ايضاً ان ذرات الكربون توجد بإعداد 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 (٢-٣)

٣-٤ الذوبان :

يحدث الذوبان في العناصر المكونة للسييكة بمعنى تداخل ذراتها واختلاط بعضها ببعض بصورة متجانسة في الحالة المنصهرة وقد يمتد هذا الاختلاط بصورة تامة أو محدودة في الحالة المتجمدة. عادة فإن الفلزات في الحالة المتجمدة تقبل الذوبان في بعضها بصورة تامة إذا حققنا واحداً أو أكثر من هذه الشروط :

أ- تقارب حجم الذرات.

ب- تساوي التكافؤ.

ج- تشابه نوع الخلية.

إذا اختلفت هذه الشروط فإن الذوبان يكون جزئياً. عموماً فإن الذوبان يعتمد على درجة الحرارة ولتوضيح ذلك سنأخذ مثلاً لإذابة الأثير والكاء معاً. إذا حاولنا إذابة الأثير في الماء في درجة قريبة من الصفر المئوي فإن الماء لا يذوب أكثر من 4% من الأثير ، وإذا حاولنا عند نفس درجة الحرارة إذابة الماء في الأثير فإننا لا نستطيع إذابة أكثر من 13% وبارتفاع درجة الحرارة تزداد نسبة الذوبان والشكل (٣-٣) يوضح منحنى الذوبان وهو خط يفصل بين الذوبان التام والذوبان الجزئي.

في المساحة تحت المنحنى نجد أن مخلوطين وهما : أثير مذاب في ماء ، وماء مذاب في أثير فمثلاً : إذا خلطنا 50% ماء و 50% أثير فرب الصفر المئوي فإن الماء والأثير يقسمان نفسيهما بحيث :

٣-٤ الذوبان :

يحدث الذوبان في العناصر المكونة للسييكة بمعنى تداخل ذراتها واختلاط بعضها ببعض بصورة متجانسة في الحالة المنصهرة وقد يمتد هذا الاختلاط بصورة تامة أو محدودة في الحالة المتجمدة. عادة فإن الفلزات في الحالة المتجمدة تقبل الذوبان في بعضها بصورة تامة إذا حققنا واحداً أو أكثر من هذه الشروط :

أ- تقارب حجم الذرات.

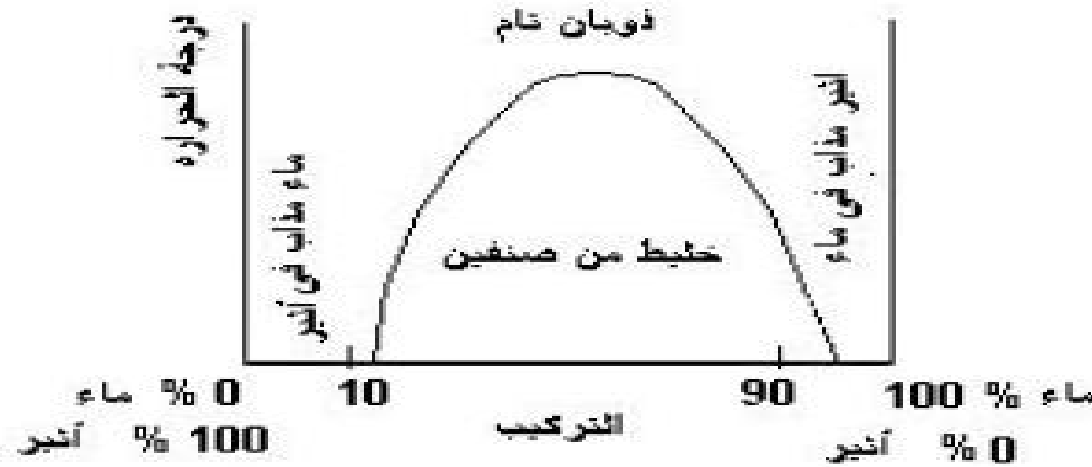
ب- تساوي التكافؤ.

ج- تشابه نوع الخلية.

إذا اختلفت هذه الشروط فإن الذوبان يكون جزئياً. عموماً فإن الذوبان يعتمد على درجة الحرارة ولتوضيح ذلك سنأخذ مثلاً لإذابة الأثير والكاء معاً. إذا حاولنا إذابة الأثير في الماء في درجة قريبة من الصفر المئوي فإن الماء لا يذوب أكثر من 4% من الأثير ، وإذا حاولنا عند نفس درجة الحرارة إذابة الماء في الأثير فإننا لا نستطيع إذابة أكثر من 13% وبارتفاع درجة الحرارة تزداد نسبة الذوبان والشكل (٣-٣) يوضح منحنى الذوبان وهو خط يفصل بين الذوبان التام والذوبان الجزئي.

في المساحة تحت المنحنى نجد أن مخلوطين وهما : أثير مذاب في ماء ، وماء مذاب في أثير فمثلاً : إذا خلطنا 50% ماء و 50% أثير فرب الصفر المئوي فإن الماء والأثير يقسمان نفسيهما بحيث :

- أ- جزء صغير من الماء يذوب في جزء كبير من الأثير بنسبة 13%.
- ب- جزء صغير من الأثير يذوب في جزء كبير من الماء من بنسبة 4% والنهائية نجد خليطين



الشكل (3-3)

٢-٥ الطور:

يعرف الطور بأنه جزء من المادة متجانس له خواصه الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية المميزة. مثال لذلك الثلج في الماء هما طوران لأنه يمكننا تمييز الماء عن الثلج رغم أن لهما نفس التركيب الكيميائي. الزيت والماء عند خلطهما والإنتظار لفترة يطفو الزيت فوق الماء ويمكن تمييزهما ولذلك هما طوران. المثال الثالث هو النسكافية فهي طور واحد رغم احتوائها على عدة عناصر (قهوة - سكر - حليب - ماء) إلا انها امتزجت مع بعضها بحيث لا يمكن تمييز هذه العناصر وأصبحت طوراً واحداً.

٦-٢ مخططات الإيزان الحرارى :

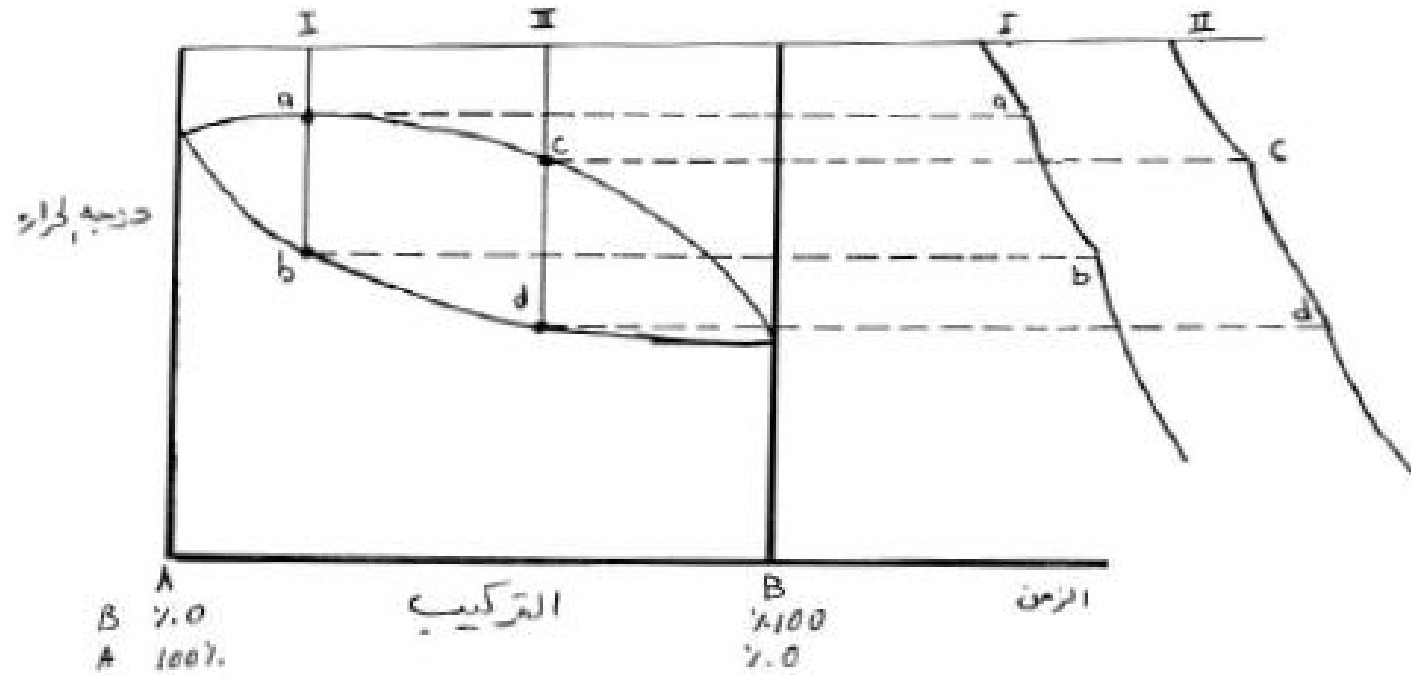
يتم تمثيل السبائك سواءاً كانت ثنائية التركيب أو ثلاثية التركيب أو رباعية أو باى عدد من المركبات فى مخططات تبرز وجود الأطوار (Phases) المختلفة للسبيكة فى درجات الحرارة ، فتظهر هذه المخططات المناطق التى توجد فيها هذه الأطوار فى الحالة المنصهرة والمناطق التى توجد فيها فى الحالة الجامدة ، كما تظهر نوعية الأطوار الجامدة ونسب تركيزاتها من المركبات المختلفة ، الأمر الذى يساعد على التعرف على وصف البنية المجهرية لأى سبيكة ، وتحليل هذه البنية واستنتاج دلالاتها وتوقع خواصها الفيزيائية والميكانيكية ، كما تساعد على الإختيار السليم للتطبيقات المناسبة لأى سبيكة فى الحياة العملية.

وتمثل السبائك الثنائية بالمخططات ، يمثل المحور الأفقى نسب وجود المركبتين كأن تمثل نهاية الخط الأفقى (السينى) يساراً نقطة وجود المركبة (العنصر A) 100% ، ويكون تركيز المركبة الثانية B عند هذه النقطة 0% ، أما الناحية اليمنى للمحور السينى فتمثل وجود المركبة B بنسبة 100% والمركبة A 0% ، ويقسم المحور السينى بنسب وجود كل من المركبتين ، وعادة ما تكون هذه النسب مقدرة وزناً.

أما الخط الرأسى (الصادى) فيمثل درجة الحرارة يوحدة سليزيوس (C°). وترسم الخطوط داخل المخطط باعتبار أن كل خط يمثل المحل الهندسى لنقطة يحدث عندها تحول من طور إلى آخر ، فعلى سبيل المثال يؤسم خط يمثل حدود الإنصهار ويسمى خط الإنصهار (Liquidus Line) أى أن أطوار كل السبائك لهاتيم المركبتين تكون فوق هذا الخط تامة الإنصهار ، ودونه تكون هناك بعض نسب من متجمد مع منصهر. كما يرسم خط آخر يمثل حدود التجمد ويسمى خط التجمد (Solidus Line) أى أن أطوار كل السبائك لهاتين المركبتين تكون تحن هذا الخط تامة التجمد ، أما فوقه فتكون هناك بعض نسب المنصهر مع المتجمد. أما امساحة بين خط الغنصهار وخط التجمد فيكون فيها خليط بين الطورين المنصهر و المتجمد وبتراكيزات مختلفة حسب الموقع فى المخطط كما سيأتى إيضاحه لاحقاً.

٧-٣ منحنيات التبريد ومخطط الإتران الحرارى :

ونرسم منحنيات تغير الحرارة مع الزمن (منحنيات التبريد) للتركيبات المختلفة. عن وجود تغير فى حالة السبيكة (أطوارها) يظهر ذلك على شكل تغير فجائى فى معدل التبريد. تسجل درجات الحرارة التى حدثت عندها التغيرات مع تركيب السبيكة وتوضع هذه النقاط على محورين ، المحور الأفقى هو تركيب السبيكة والمحور الرأسى هو درجة الحرارة وبإيصال هذه النقاط يمكن رسم مخطط الإتران الحرارى كما يتضح بالشكل (٣-٤) الذى يوضح مثالا لرسم مخطط الإتران الحرارى من منحنيات التبريد.



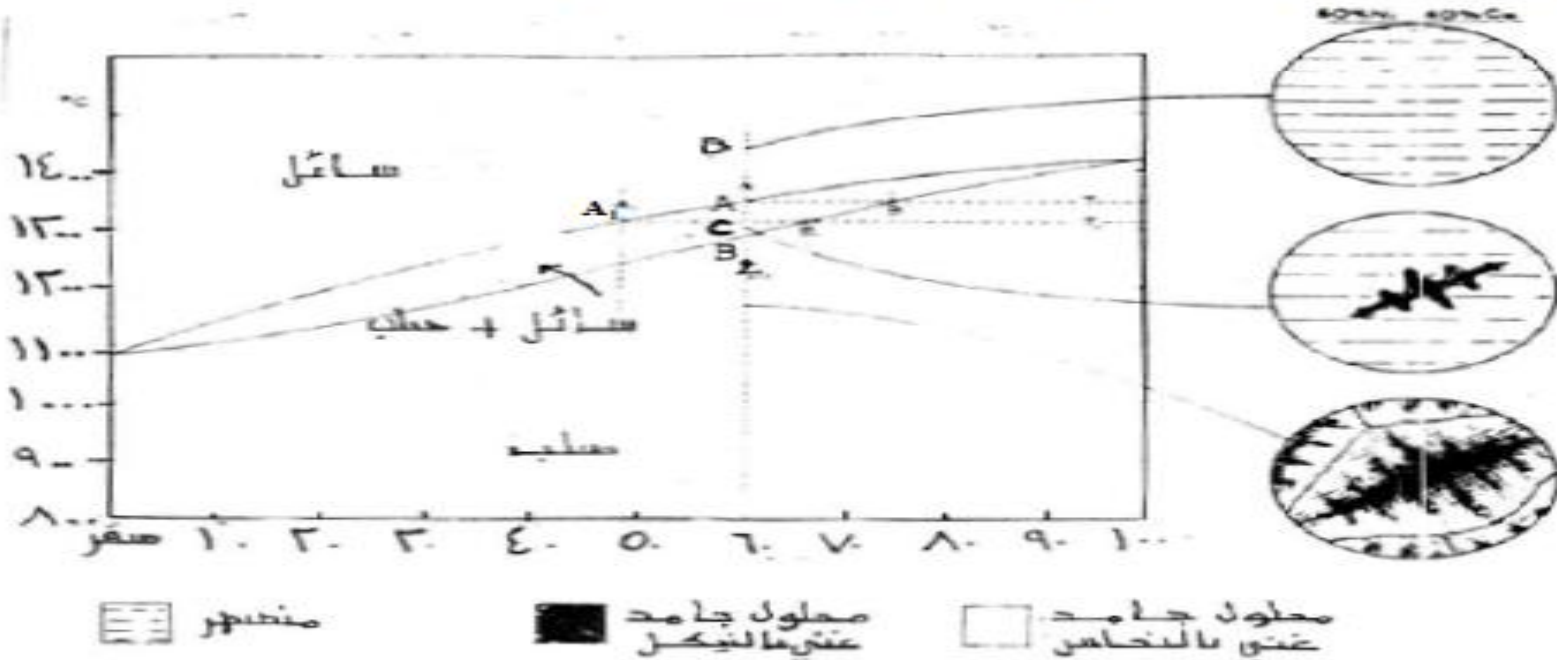
الشكل (٤-٣)

كلمة اتزان هنا تعني أن المادة تصل إلى حالة الإتزان عند درجة حرارة معينة أي أنه تحدث كل التغيرات الواجب حدوثها وهذا يعلل عملية التبريد ببطء.

٨-٣ أنواع السائك الثنائية :

١-٨-٣ مخطط الإتران لمادتين تامتى الذوبان فى الحالة السائلة والجامدة :

أن أحد أبسط أنواع مخططات التوازن الحراري للسائك نظام السائك تامة الذوبان فى الحالتين الجامدة والسائلة . وفضل مثال لهذا النوع سبيكة النحاس- النيكل كما هو موضح بالشكل (٥-٣) ، ويلاحظ ان كافة التراكيب الكيمياوية تكون فى حالة سائلة فى المنطقة الواقعة فوق خط السيولة ، وفى الحالة الصلبة فى المنطقة الواقعة تحت خط التجمد اما فى المنطقة الواقعة بين خطي السيولة والتجمد فان النظام يتكون من الطورين السائل والجامد أي من بلورات من المحلول الجامد مع المحلول السائل .



الشكل (٥-٣) : مخطط الإتران الحراري لسبيكة النحاس والنيكل.

ولشرح مخطط الإتران الحراري لهذا النوع من السبائك ، نأخذ التي التركيب الحاوي على 60 % نيكل ، فعند النقطة D التي تمثل نقطة التقاطع الحاصلة بين المحور الأفقي (التركيب الكيميائي 60 % نيكل) والمحور الرأسى عند درجة حرارة 1400°C يكون النظام فى حالة سائلة ولا يحدث أى تغيير عند التبريد حتى تصل درجة حرارة النظام الى 1350°C حيث نصل النقطة A وهي على خط السيولة ، وهذا يعني دخولنا منطقة ذات طورين حيث يتوقع ان يبدأ تكون بعض من المادة الجامدة الأولية وبتركيب كيميائي B الحاوي على (25 % نحاس – 75% نيكل) ، 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 ان محتوى النحاس في المحلول السائل المتبقى يكون أعلى من السائل الأصلي، ويدل انحدار خط السيولة على ان درجة الحرارة التي يتجمد فيها السائل المتبقى يجب أن تقع تحت درجة 1350°C وعليه يجب ان تهبط درجة الحرارة اذا أريد للتجمد أن يستمر. وعند بلوغ درجة الحرارة الى 1300°C سنصل إلى النقطة C التي تقع ضمن منطقة ذات طورين لهما تراكيب كيميائية تمثل بالنقاط A_1, B_1 الخط A_1C كمية المحلول الجامد بتركيب النقطة B_1 (68% نيكل) ، والخط CB_1 كمية المحلول السائل بتركيب النقطة A_1

(50% نيكل). وعند النقطة B_2 في درجة حرارة $1280C^\circ$ تنجم آخر قطرات من المحلول السائل المتبقى الحرارة الذي يحتوي على % 40 نيكل (تركيب النقطة A_2) ، بينما يحتوي المحلول الجامد على % 60 نيكل والذي يمثل نفس التركيب الكيمياوي 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 :

- أ- يمكن تحديد كمية المحلول الجامد من الخط الواصل بين الخط الذي يمثل تركيب السبيكة والنقطة المقابلة له على خط السيولة.
- ب- يمكن تحديد كمية المحلول السائل من الخط الواصل بين الخط الذي يمثل تركيب السبيكة والنقطة المقابلة له على خط التجمد.
- ج- يمكن تمثيل تركيب المحلول الجامد بالنقطة الواقعة على خط التجمد.
- د- يمكن تمثيل تركيب المحلول السائل بالنقطة الواقعة على خط السيولة.

قاعدة العتلة Lever Principle :

تستخدم القوانين الآتي ذكرها لمعرفة نسب الأطوار المختلفة التي يمكن ان توجد معاً في حالة توازن عند درجة حرارة معينة . ففي الشكل (3-5) يمكن إيجاد نسب الطورين الموجودين في السبيكة الحاوية على % 40 نحاس و % 60 نيكل في درجة $1350C^\circ$ وذلك بتعيين أطوال القطعتين لخط الوصل A_1C الذي يمثل كمية المحلول الصلب ، CB_1 الذي يمثل المحلول السائل حيث تكون نسبة المحلول الجامد الى كمية السبيكة $A_1C / A_1B_1 = (A_1B_1)$ أي:

$$[(60-50) / (68-50)] \times 100 = 55.6\%$$

ونسبة المحلول السائل الى كمية السبيكة = CB_1 / A_1B_1

$$[(68-60) / (58-50)] \times 100 = 44.4\%$$

ويظهر من قياسات الأطوال 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 المعدنيين الموجدين 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 أن وزن السبيكة W عبارة عن مجموع وزني الطورين السائل والجامد ($W_{\ell} + W_s$) فإن العلاقة السابقة ستكون:

$$W_s / W = [(C - C_{\ell}) / (C_1 - C_s)]$$

٢-٨-٢ مخطط الاتزان لمادتين تامتي الذوبان في الحالة السائلة وعدمية الذوبان في الحامدة :

يمكن تمثيل هذا النوع من السبائك بالنظام السبائكي للبرموت - كاديوم ($Bi - Cd$) كما يتضح بالشكل (٦-٣). ويمكن تطبيق قانون راؤول الذي ينص على أنه عند إضافة أي عنصر نقي إلى عنصر نقي آخر ستؤدي إلى انخفاض درجة تجمد الاول ، ويستمر هذا الانخفاض كلما أضيفت مقادير أخرى من العنصر الثاني ، ويتناسب مقدار الانخفاض في درجة التجمد هذه مع الأوزان الجزئية للعنصرين . ويلاحظ في الشكل (٦-٣) إنحدار 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 لمدي 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 " وسيتم شرحها لاحقاً.

إذا تتبعنا السبيكة الحاوية على 80% كاديوم سنلاحظ ما يأتي:

أ- بالتبريد الى درجة حرارة $260C^{\circ}$ ، ومد الخط الأفقي الذي يلتقي مع المحور الرأسى من اليمين (خط التجمد) ستفصل بلورات من معدن الكاديوم النقي (تركيز 100%) مما يجعل المعدن المنصهر الباقي فقيراً بالكاديوم غنياً بالزئبق ، وبالتالي يتغير تركيز المنصهر قليلاً إلى ناحية اليسار في مجال المحلول السائل.

ب- وبالتبريد الى درجة $240C^{\circ}$ ومد الخط الافقي (هـ ن) ستفصل بلورات أخرى من معدن الكاديوم النقي (قيمة النقطة هـ) وسيصبح تركيز المحلول السائل النقطة ن.

ج- يمكن تعيين الكميات النسبية لكل من المحلول الجامد إلى المحلول السائل عند درجة حرارة $260C^{\circ}$ وفقاً لقاعدة الذراع.

$$\frac{\text{كمية المحلول الجامد (وتركيبه)}}{\text{كمية المحلول السائل (وتركيبه)}} = \frac{\text{و ن (هـ)}}{\text{هـ و (ن)}} = \frac{75-80 (\% \text{ كاديوم})}{80-100 (\% \text{ كاديوم} + 25\% \text{ زئبق})}$$

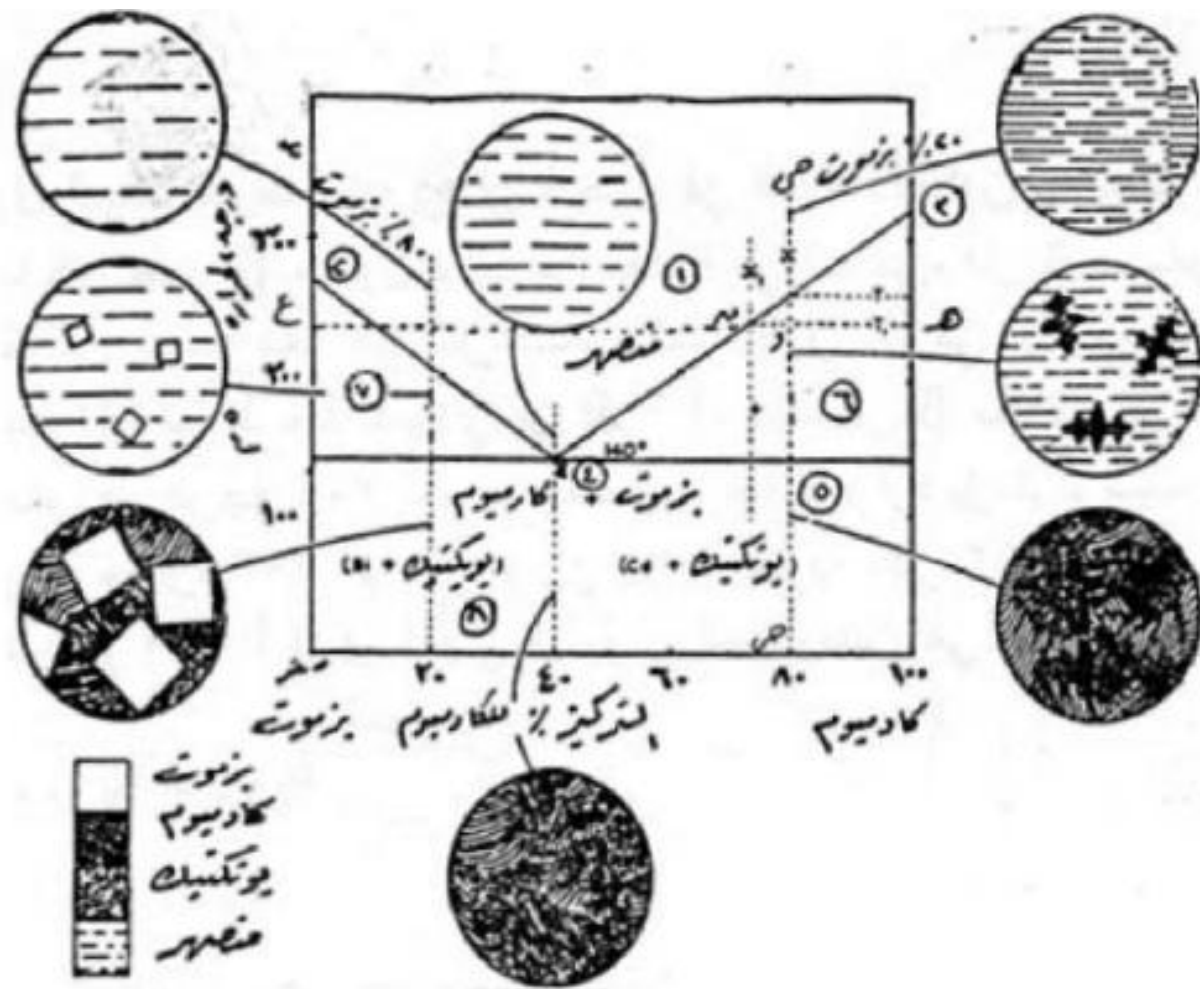
وعند درجة الحرارة $140^{\circ}C$ تصبح:

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

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

أما السبيكة الخاصة % 40 كاديوم (سبيكة اليوتكتك) فعند تطبيق قاعدة الذراع مرة أخرى عند درجة الحرارة 140°C . فنمذ الخط الأفقي حتى يلتقي مع المحورين الرأسيين إلى اليمين وإلى اليسار، أي ستترسب عند هذه النقطة بلورات من المعدن Bi النقية، وفي نفس الوقت بلورات من المعدن Cd النقية.

عند تطبيق قاعدة الذراع عند درجة حرارة اليوتكتك نجد أن هناك ثلاثة أطوار في حالة اتزان هذه الأطوار هي (محلول سائل، جامد من الكاديوم النقي، جامد من البزموت النقي) وفي هذه المجموعة المكونة من مركبتين، فإننا نجد عند هذه النقطة أن عدد درجات الحرية يساوي صفراً ($F=2-3+1=0$) وتصبح المجموعة عندها عديمة التغيير، وبطبيعة الحال فإن هذا الشرط لا يوجد إلا عند درجة حرارة معينة وتركيب معين.



الشكل (٦-٣): مخطط الإلتزان الحراري لسبائك (الكادميوم - الزنك)

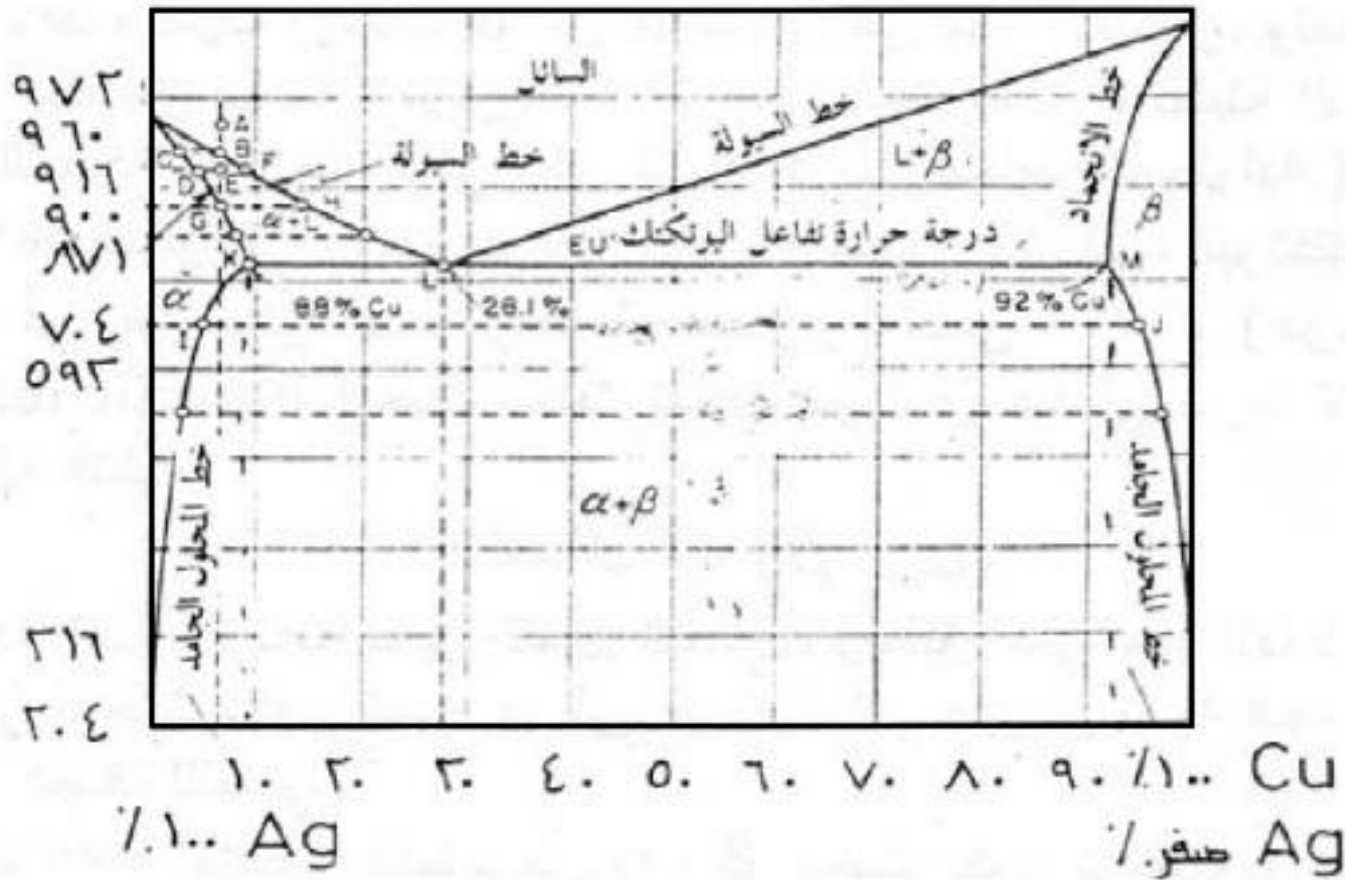
٢-٨-٢ مخطط الاتزان لمادتين تامتى الذوبان فى الحالة السائلة ومحدودة الذوبان فى الحامدة :

مثال لهذا النوع سبيكة الفضة - النحاس (Ag - Cu) كما هو موضح بالشكل (٧-٣) الذى يمثل مخطط الإتزان الحرارى لهذه السبيكة. ويكون الطور سائلاً دائماً فوق خطوط السيولة ، وتوجد منطقة ذات طور واحد α على إمتداد المحور العمودي فى الجهة اليسرى يتكون من محلول جامد للنحاس فى الفضة، وتوجد فى الجهة اليمنى منطقة أخرى ذات طور واحد من β تتكون من محلول جامد للفضة فى النحاس ، وتفصل المنطقة ذات الطورين ($\alpha + \beta$) ، منطقتا الطور الواحد ، وتوجد بين منطقتي α والسائل منطقة L منطقة ($\alpha + L$) ، وكذلك توجد بين طورى β والسائل منطقة ($\beta + L$).

إن التفاعل اليوتكتيكي فى درجة حرارة ثابتة هو خط موازى لمحور التركيب الكيمياوى ويمثل درجة حرارة إنجماد اليوتكتك الذى يعادل $779C^{\circ}$.

أما خطوط المحاليل الجامدة (Solvus Line) الموضحة فى الشكل بالحروف (KI) تدل على أن الفضة تستطيع ان تستبقى % 8.8 من النحاس فى المحلول الصلب فى درجة حرارة $704C^{\circ}$ ، بينما تستطيع أيضاً وفى درجة حرارة $316C^{\circ}$ أن تستبقى % 1 نحاس فى المحلول الجامد. ويمثل منحنى المحلول الجامد الآخر (MJ) قابلية ذوبان الفضة فى النحاس التى تتغير من % 8 فى درجة فى حرارة $779C^{\circ}$ إلى أقل من % 1 فى درجة حرارة $316C^{\circ}$.

ولغرض دراسة هذا النوع من النظام نأخذ سبيكة تحتوي على 7% نحاس و93% فضة ،
 فعند درجة الحرارة 960°C سيكون تقاطع المحور الأفقي مع المحور العمودي في نقطة
 A مما يؤدي إلى وقوع النظام في المنطقة السائلة.



الشكل (٧-٣): مخطط الإتزان الحراري لسبائك (النحاس - الفضة)

وتتكون أول بلورات من المحلول الجامد α في النقطة B في درجة حرارة $916C^{\circ}$ ، ويحتوي هذا المحلول على 2.5% نحاس و 97.5% فضة ، أي ستكون الفضة المذيب بينما سيكون النحاس المذاب. ويحتوي المحلول الجامد في درجة حرارة $900C^{\circ}$ على 5% نحاس بينما يحتوي السائل على 90% نحاس. ويمكن إيجاد نسبيتي الكميّتين من الجامد والسائل باستخدام قاعدة الذراع وكما يأتي:

$$\text{كمية المحلول الجامد } \alpha = \frac{EF}{DF} \times 100\%$$

$$= \frac{5-7}{5-9} \times 100\% - 50\%$$

$$\text{كمية المحلول السائل} = \frac{DE}{DF} \times 100\%$$

$$= \frac{7-9}{5-9} \times 100\% = 50\%$$

ويصبح السائل والجامد أغنى بالنحاس عند هبوط درجة الحرارة، وأخيراً وفي درجة حرارة 852°C (النقطة G) تتجمد آخر قطرات السائل المتبقي والحاوي على 14 % نحاس ليكون المحلول الجامد α الحاوي على 7% نحاس وهذا هو التركيب الكيميائي الأساسي للمنصهر، وتحت هذه الدرجة وحتى درجة حرارة 746°C لا يحدث تقاطع بين خطوط درجة الحرارة وخط التركيب في منطقة المحلول الجامد ، لذلك لا يحدث تغير في بنية السبيكة حتى تصل درجة الحرارة إلى 746°C حيث يدخل منطقة ثنائية الطور ليظهر طور 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°C بتكوين خط الربط (IJ) واسقاط خط عمودي من نقطة J ، لذلك فإن β' ستتكون من 5% فضة مذابة في 95% نحاس في درجة حرارة 704°C وبانخفاض درجة الحرارة يزداد ترسيب β' من α وسنحصل في درجة حرارة 593°C على توازن بين α حاوية على 3% نحاس و β' حاوية على 2% فضة كما يتضح بالجدول (٣-١).

ويمكن تحديد كميتي الطورين الموجودتين كالآتي:

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

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

وفي أثناء التبريد الحقيقي غير المتوازن لهذه السبيكة سيحدث فيها تغير ضئيل في البنية تحت درجة الحرارة هذه بسبب ترسيب β' من α إستناداً الى مبدأ الانتشار، ولما كان الانتشار يجري ببطيء عند انخفاض درجة الحرارة فإن الترسيب سيتم بصورة بطيئة الأمر الذي يؤدي إلى تغيير خواص السبيكة.

الجدول (٣-١): سبيكة تحتوي على 7% نحاس – 93% فضة

التركيب المتجانسة	الوزن الكلي لكل طور	تركيب الاطوار	الاطوار المتواجدة	درجة الحرارة $^{\circ}\text{C}$
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	

أما السبيكة الحاوية على % 28.1 نحاس في درجة حرارة $900C^{\circ}$ فسيكون تركيب اليوتكتك سائلاً عند هذه الدرجة وبدون أي تغير حتى تهبط درجة الحرارة إلى $779C^{\circ}$ (درجة التفاعل اليوتكتيكي Eutectic Reaction) حيث يحدث تفاعل فيزيائي عند أي تبريد لاحق، ويمثل هذا التفاعل بالمعادلة الآتية:



وتبقى درجة الحرارة ثابتة لحين إكمال التفاعل، ويطلق على هذا التفاعل كما ذكرنا (التفاعل اليوتكتيكي) حيث تكون نسبة α إلى β ثابتة في حين أن نسبة الجامد إلى السائل تعتمد على محتوى الطاقة للنظام.

وفي درجة الحرارة $779C^{\circ}$ يكون النظام من α و β بحيث يكون تركيب α النقطة K، وهو نحاس 8.8% نحاس في حين يكون تركيب β النقطة M وهو 92% نحاس (8% فضة) وعليه تكون الكميات النسبية من α ، β كما يتضح بالجدول (٢-٣).

الجدول (٢-٣): سبيكة تحتوي على % 28.1 نحاس – ٧١.٩ % فضة

درجة الحرارة $^{\circ}$ م	الاطوار المتواجدة	تركييب الاطوار	الوزن الكلي لكل طور	التركييب المجهرية
871	سائل	% 28.1 نحاس	% 100 سائل	منصهر متجانس
779	سائل	% 28.1 نحاس	% 100 سائل	منصهر متجانس
أقل من 779	جامد α	% 8.8 نحاس	% 77 α	يتواجد β كطبقات متتالية في اليوتكتك
	جامد β	% 92 نحاس	% 23 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 أقل من $779C^{\circ}$ 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 أقل من 1% فضة في درجة حرارة $316C^{\circ}$ ، بينما يصبح كل من α و β معادن نقية عند درجة حرارة المختبر.

أما السبيكة الحاوية على 20% نحاس الذي هو سائل في درجة حرارة $871C^{\circ}$ فيتكون أولاً عند التبريد الى درجة حرارة $815C^{\circ}$ محلول جامد α يحتوي على حوالي 7.5% نحاس ، وفي درجة حرارة $801C^{\circ}$ يحتوي الجامد المتوازن على 8% نحاس والسائل على 23% نحاس. ونحصل في درجة حرارة أعلى 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 إنجماد 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 إنجماد سائل اليوتكتك ، محاطة بخليط يوتكتك من محلولين جامدين $(\alpha + \beta)$.

ان النسبة المئوية لخليط اليوتكتك الجامد تحت درجة الحرارة $779C^{\circ}$ هي نفسها للسائل الذي كان في درجة حرارة أعلى بقليل من $779C^{\circ}$ والمساوية الى 58% . وعند هبوط درجة الحرارة تحت درجة حرارة اليوتكتك يترسب طور β من طور α ويترسب طور α من طور β كما موضح بالجدول (3-3). أما السبائك التي تحتوي على أكثر من 28.1% فإن شرحها يشابه تلك التي تحتوي على نسب أقل من 28.1% .

الجدول (3-3): سبيكة تحتوي على 20% نحاس – 80% فضة

التركيب المجهرية	الوزن الكلي لكل طور	تركيب الاطوار	الاطوار المتواجدة	درجة الحرارة $^{\circ}C$
منصهر متجانس	100% سائل	20% نحاس	سائل	871
سائل + محلول جامد α	20% α	8% نحاس	جامد α	801
	80% β	23% نحاس	سائل	
سائل + محلول جامد α	42% α	8.8% نحاس	جامد α	779 قليل من اليوتكتك
	58% سائل	28.1% نحاس	سائل	