الباب الثالث

المعادن الغير حديدية

الفصل الأول
النحاس وسبائكه
Copper and Copper Alloys

مقدمة:

يعتبر النحاس من أقدم المعادن التي عرفها الإنسان، وعرف العصر الذي تلى العصر الحجري في الحقب التاريخية بالعصر البرونزي نسبة لسبيكة البرونز (النحاس والقصدير) التي استخدمها الإنسان في جميع ضروب حياته من أدوات القتال إلى الأواني والزينة.

يوجد النحاس في الطبيعة في شكل خامات معقدة أهمها الخامات الكبريتية مثل الجالكوبرايت Chalcopyrite ($CuFS_2$) الذي يحتوي على % 34.5 نحاس، والجالكوسايت Chalcosite (Cu_2S) الذي يحتوي على % 79.8نحاس. وتتم تنقية النحاس من خاماته بطريقتين:

1. الصهر وأكسدة الشوائب. Fire refining
2. التحليل الكهربي. Electrolyte refining

الطريقة التي تستخدم لتنقية النحاس تحددها درجة النقاوة المطلوبة ومن ثم الإستخدام. ففي طريقة الصهر يتم صهر الخام في الأفران الخاصة بذلك وتتم عملية الأكسدة وإزالة الشوائب عن طريق الإضافات وإمرار الهواء. إما طريقة التحليل الكهربي فتتم فيها التنقية باستخدام قضيب من النحاس النقي للقطب السالب ويمثل خام النحاس القطب الموجب ويتم توصيل القطبين في وجود محلول متأين حيث يتم انتقال ذرات النحاس النقي من القطب الموجب إلى القطب السالب وتتراكم عليه نتيجة لحركة الأيونات، بهذه الطريقة يمكن الحصول على نحاس ذو درجة عالية من النقاوة تصل إلى % 99.9.

أهم الخواص المميزة للنحاس:

(1) درجة انصهار النحاس 1083°C وله بنية تركيبية مكعب مركزي الوجه F.C.C ويمتاز باللدانة العالية High ductility وصلادة منخفضة ومقاومة شد منخفضة، ويمكن تحسين خواصه الميكانيكية بإضافة العناصر السبائكية وبالتشكيل على البارد Cold working حيث ترتفع الصلادة من 40BH إلى 90BH ومقاومة الشد من $220*10^6\ N/m^2$ إلى $460*10^6\ N/m^2$.

(2) التوصيل الجيد للكهرباء، ويأتي النحاس الثاني بعد الفضة من حيث توصيل الكهرباء لذلك تستهلك نسبة كبيرة من الإنتاج العالمي للنحاس النقي بصورة رئيسية في الصناعات الكهربائية من أسلاك وملفات. ووجود الشوائب والعناصر الأخرى يقلل من الموصلية الكهربائية. كذلك التشكيل على البارد له نفس التأثير لكن بدرجة أقل.

(3) التوصيل الجيد للحرارة لذلك يستخدم في صناعة أنابيب الغلايات والثلاجات ومسامير البرشام للقاطرات البخارية والصناعات الكيميائية والغذائية.

(4) كثافته عالية $8.93\ Kg/m^3$ تعادل ثلاث مرات كثافة الألمنيوم ومقاومته عالية للتآكل (البنية التركيبية متجانسة).

أنواع النحاس التجارية: The Commercial Grade of Copper

(1) النحاس ذو الموصلية الكهربائية العالية ويطلق عليه أسم النحاس الخالي من الأكسجين ذو الموصلية العالية Oxygen Free High Conductivity Copper (O.F.H.C) وهو النحاس المستخلص بالتحليل الكهربي ويكون على درجة عالية من النقاوة تصل إلى 99.9% . ويستخدم في الأغراض التي تتطلب موصلية كهربية وحرارية عاليتين.

(2) النحاس المستخلص من أفران الصهر وهو إما يكون:

أ. نحاس ذو عسو مرتفع. Tough pitch

ب. نحاس مؤكسد. Deoxidized

وذلك تبعا للاستخدام ونسبة الأكسجين فيه. النوع الأول يحتوي على نسبة بسيطة من الأكسجين الذي تم امتصاصه أثناء عملية الصهر والاستخلاص، موجود على هيئة أكسيد نحاسوز Cu_2O (0.04%-0.05% أكسجين). ويوجد أكسيد النحاسوز على هيئة كريات دقيقة وهي جزء من الأيوتكتيك المكون من أكسيد النحاسوز والنحاس.

لتلك الكريات تأثير طفيف على الموصلية الحرارية والكهربية يمكن تجاهله، كما أن وجودها يعتبر مفيد لأن الشوائب الضارة مثل البيزموث تتجمع على هيئة أكاسيد مع كريات أكسيد النحاسوز بدلا من التواجد على هيئة طبقة هشة على الحدود الحبيبية.

أما بالنسبة للعمليات الإنتاجية مثل اللحام وسحب الأنابيب فإن وجود تلك الكريات يسبب ضررا كبيرا لأن وجودها في الأجواء المختزلة المحتوية على الهيدروجين

يؤدي إلى حدوث البخبخة في المعدن Gassing. فالهيدروجين قابل للذوبان في النحاس الصلب وعند تلامسه مع كريات أكسيد النحاسوز يؤدي إلى اختزالها مكونا الماء على هيئة بخار غير قابل للذوبان في النحاس لذلك يتجمع في فقاعات مسببا البخبخة.

$$Cu_2O+H_2 \rightleftharpoons 2Cu+H_2O$$

لذلك فإن النحاس المستخدم في أغراض اللحام يتم إختزاله من الصب بإضافة الفسفور الذي يذوب في النحاس بعد الاختزال.

سبائك النحاس:

يكون النحاس مع العناصر الأخرى سبائك من أهمها:

1. سبيكة النحاس الأصفر.Brass
2. سبائك البرونز القصديري. Bronze
3. سبائك البرونز الألمونيومي. Aluminum Bronze
4. سبائك النحاس والنيكل. Nickel Copper

1. سبائك النحاس الأصفر: Brass

وهي عبارة عن سبائك تتكون من النحاس والزنك وقد تصل نسبة الزنك إلى% 45. الشكل (13.1) يمثل مخطط الإتزان لهذه السبائك.

يذوب الزنك في النحاس بنسبة % 32.5 عند درجة حرارة 902°C (خط الصلابة) وتزداد هذه النسبة بانخفاض درجة الحرارة لتصل % 39 عند درجة الحرارة 454°C، ثم تعود مرة أخرى للانخفاض حتى تصل % 35.2 عند حرارة 250°C ويرمز للمحلول الصلب بالرمز ألفا (α). والطور ألفا طري ومطيل عند درجة حرارة الغرفة.

إذا زادت نسبة الزنك عن % 39 فإن الطور بيتا (β) يظهر في البنية الداخلية للنحاس الأصفر المبرد ببطء. ويمتاز هذا الطور بصلادة عالية وقابلية للتشكيل على البارد أقل من ألفا.

أما إذا زادت نسبة الزنك عن % 50 فإن الطور قاما (γ) يظهر في البنية الداخلية ويمتاز بأنه هش. وبصورة عامة يمكن تصنيف سبائك النحاس الأصفر إلى سبائك يمكن تشكيلها على البارد وأخرى يمكن تشكيلها على الساخن.

سبائك النحاس الأصفر التي تشكل على البارد:

هي عبارة عن السبائك التي تحتوي بصورة أساسية على الطور ألفا (α). وكذلك يمكن إجراء التشكيل على البارد على جزء من السبائك المحتوية على الطورين α+ β والتي تكون فيها نسبة قليلة من β. ويجب أن تكون هذه السبائك ذات درجة نقاوة عالية لأن الشوائب وإذا كانت بنسب بسيطة فإنها تؤدي إلى خفض المطيلية.

قبل التشكيل على البارد يجب تخمير سبائك النحاس الأصفر التي تحتوي على الطور ألفا α عند درجة حرارة 600°C، أما إذا زادت عن750°C فإنه يحدث نمو للحبيبات ويكون سريعا.

من المشاكل التي تواجه التشكيل على البارد ظاهرة تسمى بالشروخ الموسمية Season Cracking وهي عبارة عن تشققات وشروخ تظهر عند حدود الحبيبات أثناء التشكيل على البارد. ويمكن التغلب على هذه المشكلة بإجراء عملية تخمير لإزالة الإجهادات وتتم عملية التخمير عند درجة حرارة 250°C.

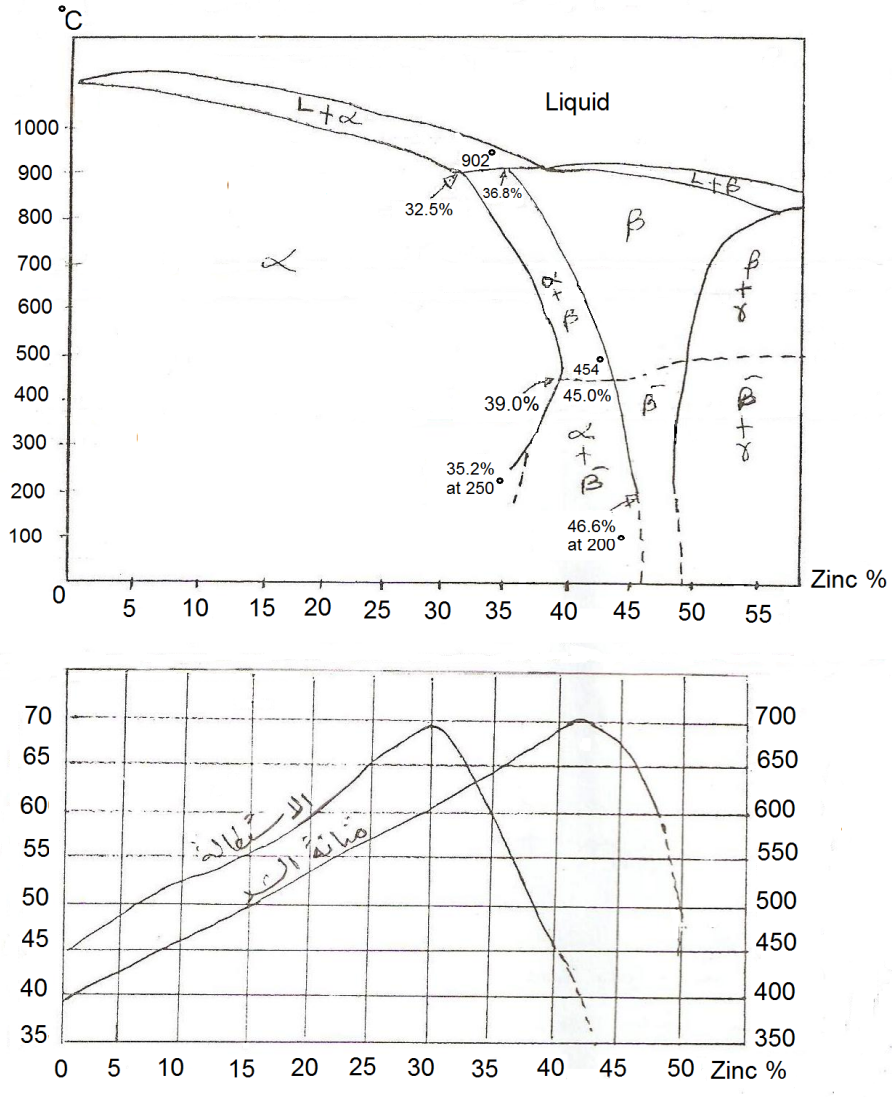
سبائك النحاس الأصفر المشكلة على الساخن:

تشمل سبائك النحاس الأصفر التي تحتوي على الطورين α+β. ومن أهم هذه السبائك السبيكة 60-40 والتي تعرف بمعدن مونتز Muntz Metal. وتمتاز هذه السبيكة بأنه عند التسخين إلى درجة حرارة حوالي 750°C فإن الصنف α يذوب كلية في β مما يعطي مجال للتشكيل على الساخن.

إضافة العناصر إلى سبائك النحاس الأصفر:

قد تضاف عناصر أخرى بنسب بسيطة لسبائك النحاس الأصفر لتحسين مقاومتها للتآكل الكيميائي أو الخواص الميكانيكية. فالقصدير يضاف بنسبة % 1 لتحسين المقاومة للتآكل الكيميائي خاصة سبائك النحاس البحري. كما يمكن إضافة الزرنيخ بنسب 0.05%-1% لسبيكة النحاس الأصفر 70-30 المستخدمة في أنابيب المكثفات وذلك لتحسين المقاومة ضد التآكل الكيميائي ومنع انفصال الزنك.

إضافة الرصاص بنسبة % 2 يساعد على تحسين خواص القطع بالماكينات (لأنه يذوب في النحاس الأصفر ويوجد على هيئة كريات). وتسمى السبيكة 60-40 والتي تحتوي على % 2 رصاص بسبيكة النحاس الأصفر حرة القطع.

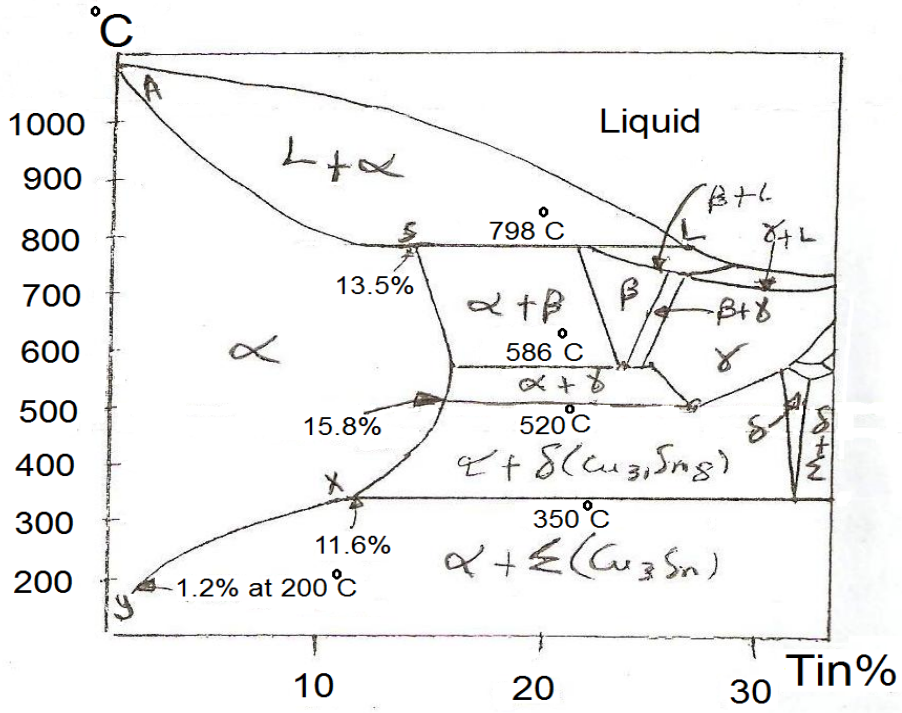


الشكل (1) منحنى التوازن الحراري للنحاس والزنك المنحنى الأسفل يبين العلاقة بين التركيب والخواص الميكانيكية

2. سبائك البرونز القصديري: Bronze

العلاقة بين منحنى التوازن الحراري والبنية الداخلية الفعلية لسبائك البرونز القصديري أكثر تعقيدا عن سبائك النحاس الأصفر وذلك لأن معدل انتشار كل من النحاس والقصدير في بعضهما أقل بكثير من النحاس والزنك، ويبدو ذلك في اتساع

المجال في التركيب الكيميائي عند أي درجة حرارة بين خطوط السيولة AL والصلابة AS كما في الشكل (2). كذلك نجد أن التغيرات في البنية الداخلية تحت درجة الحرارة 400 °C تحدث ببطء شديد. ويؤدي كلا من هذين العاملين إلى تشوه بعض البنية الداخلية التي تختلف عن تلك المبينة في منحنى التوازن الحراري للبرونز المسبوك المبرد حتى درجة حرارة الغرفة تحت الظروف الصناعية الإعتيادية.



الشكل (2) منحنى التوازن الحراري للنحاس والقصدير

بالرجوع إلى المنحنى يمكن ملاحظة التفاعلات التالية:

يحدث التفاعل البيروتكتيكي $\alpha+L$ ⟵ β عند درجة حرارة 798 °C

يحدث التفاعل الأيوتكتويدي β ⟵ $\gamma+\alpha$ عند درجة حرارة 589 °C

يحدث التفاعل الأيوتكتويدي γ ⟵ $\delta+\alpha$ عند درجة حرارة 520 °C

عند التبريد البطيء جدا وعند درجات حرارة أقل من 350 °C فإن الطور δ يتحلل إلى $\Sigma+\alpha$ ، هذا ما لا يمكن تحقيقه صناعيا (معدل تبريد أسرع). لذلك فإن الطور Σ (Cu_3Sn) لا يمكن رؤيته في البنية الداخلية للبرونز المصبوب في المسبك، لذا يمكن إهمال الجزء من المنحنى تحت 400 °C.

تصنيف سبائك البرونز القصديري:

هنالك عدة أنواع من البرونز القصديري أهمها:

سبائك البرونز القصديري البسيطة:

وهي سبائك يمكن أن تكون طروقة (مشكلة) أو مصبوبة حيث تحتوي الأولى على نسب قصدير حتى 7% والثانية حتى 18%، وتخلو السبائك المطروقة من الطور دلتا δ ($Cu_{31}Sn_8$) مما يجعلها قابلة لعمليات التشكيل على البارد. وتستخدم سبائك الصب في صناعة كراسي التحميل وذلك لمقاومتها للإحتكاك ومقاومة الصدمات.

سبائك البرونز الفسفوري:

وهي سبائك تحتوي على فسفور مضاف كعنصر سبائكي بنسب تتراوح بين 0.1%- 1%. وتحتوي سبائك البرونز الفسفوري الطروق حتى 8% قصدير و0.3% فسفور، أما سبائك البرونز الفسفوري المصبوب فتحتوي على 13% قصدير و1% فسفور. ويوجد الفسفور على هيئة فسفيد النحاس Cu3P والذي يكون مع α و δ يوتكتويد ثلاثي.

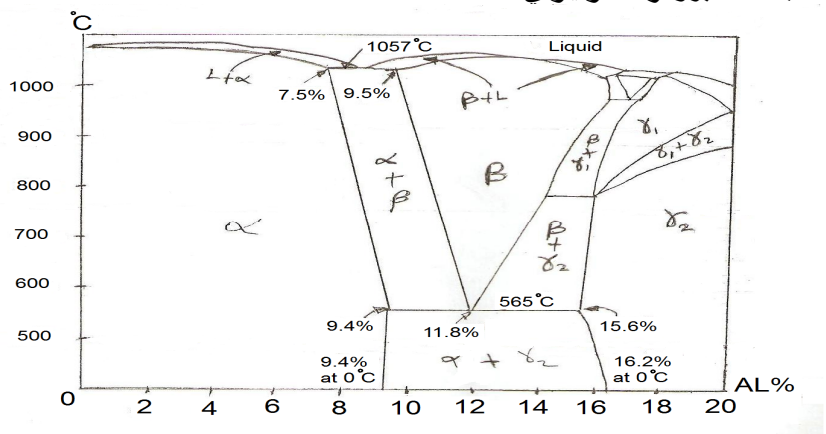
سبائك البرونز المحتوية على الزنك:

جميع سبائك البرونز المحتوية على الزنك تكون من الصنف α. وهي أيضا نوعين سبائك طروقة وسبائك صب. تستخدم السبائك الطروقة في تصنيع العملة وتحتوي على 3% قصدير و2.5% زنك.

سبائك البرونز المحتوية على الرصاص:

يضاف الرصاص لسبائك البرونز بنسب تصل إلى 2% لتحسين خواص التشغيل بالماكينات، وتضاف نسب أعلى من ذلك لكراسي المحاور الخاصة.

3. سبائك البرونز الألمونيومي: Aluminum Bronze



الشكل (3) منحنى التوازن الحراري للنحاس والألمونيوم

الشكل (3) يوضح منحنى التوازن الحراري لسبائك البرونز الألمونيوم. وفي هذا المنحنى نجد أن المحلول الصلب ألفا (α) يتكون من نسب الألمونيوم% 9.4 عند درجة حرارة الغرفة ويمتاز المحلول α بمطيليه عالية. بزيادة نسبة الألمونيوم عن 9.4% فإن الطور γ_2 (Cu_9AL_4) يتكون ويمتاز هذا الطور بالصلادة والهشاشة.

نجد أن هنالك تشابها بين منحنى البرونز الألمونيومي ومنحنى الحديد والكربون، فالصنفين α والفيرايت متناظران والمحلول الصلب بيتا (β) في منحنى النحاس والألمونيوم يشابه الأوستنايت في منحنى الحديد والكربون، والأيوتكتويد γ_2 يشبه الأيوتكتويد فيرايت وسمنتايت (البيرلايت) من الصلب. نتيجة لذلك فإن البرونز الألمونيومي المحتوي على 10% ألمونيوم يمكن معالجته بطريقة مماثلة للصلب.

البرونز الألمونيومي المحتوي على 10% إذا تم تبريده ببطء حتى درجة حرارة الغرفة يتكون كلية من الأصناف $\alpha+\gamma_2$. إما إذا أعيد التسخين فإن الأيوتكتويد $\alpha+\gamma_2$ يتحول إلى المحلول الصلب β عند الوصول إلى درجة حرارة الأيوتكتويد 565 °C. وبإرتفاع درجة الحرارة لأعلى من ذلك فإن الطور β يبدأ في الإنصهار.

يؤدي التبريد المفاجئ في الماء للطور β للحصول على بنية مكونه كليا من الصنف β وهي بنية صلدة وهشه مشابهة للمارتنسايت، وتؤدي المراجعة إلى ترسيب خليط من الأصناف $\alpha+\gamma_2$.

إلى جانب إمكانية المعالجة الحرارية فإن إستخدام البرونز الألمونيومي يعتمد على عوامل أخرى منها:

1. القدرة على الإحتفاظ بالمتانة عند درجات الحرارة العالية بوجود بعض العناصر الأخرى.
2. مقاومة عالية للتأكسد عند درجة الحرارة العالية.
3. مقاومته الجيدة للتآكل الكيميائي عند درجات الحرارة العالية.
4. مقاومة جيدة للإحتكاك.
5. اللون الأصفر الذي يجعل بعض تلك السبائك مفيدا لأغراض الزينة خاصة كبديل للذهب في تقليد المجوهرات.

يمكن تصنيف سبائك البرونز الألمونيومي حسب طرق التصنيع :

1) السبائك القابلة للتشكيل على البارد هي المحتوية على الطور α وتحتوي على حوالي 4%-7% ألمونيوم وفي بعض الأحيان تحتوي على النيكل حتى 4% وهو العنصر الذي يحسن مقاومة التآكل الكيميائي بدرجة كبيرة.

2) السبائك القابلة للتشكيل على الساخن أو المنتجة بالصب هي المحتوية على الطورين $\alpha+\gamma_2$ وتحتوى على نسب ألمونيوم بين 7%-12%، وقد تحتوى على عناصر أخرى مثل الحديد والنيكل والمنجنيز. وتصل نسبة الحديد والنيكل إلى 5% في السبائك التي تستخدم في أغراض الهندسة الكيميائية خاصة للأجزاء المعرضة لدرجات حرارة عالية.

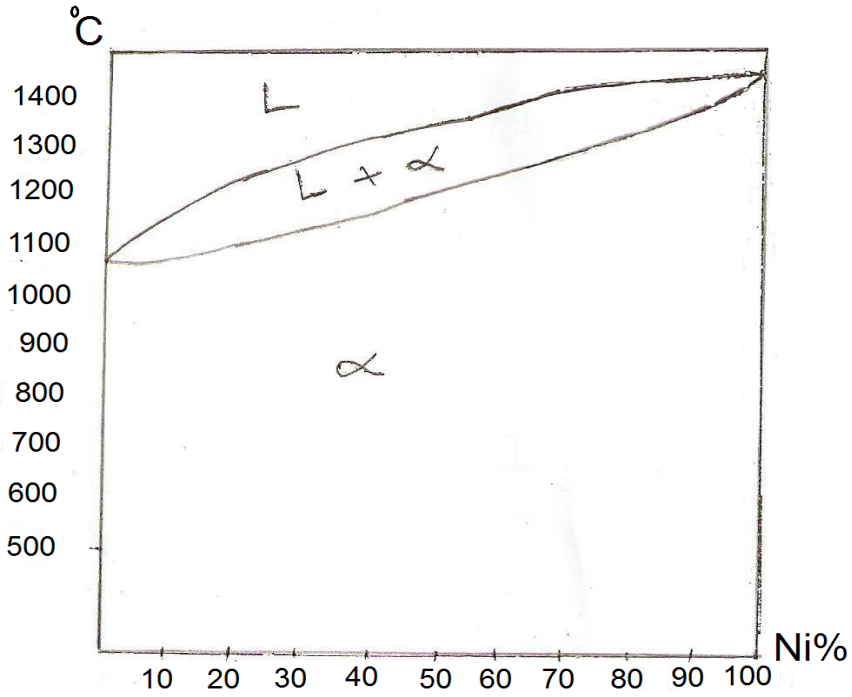
3) السبائك المستخدمة في السباكة الرملية والقوالب الدائمة وتحتوي على حوالي 9.5%-12% ألمونيوم مع نسب مختلفة من الحديد والنيكل حتى 5% لكل منهما وتحتوي على المنجنيز بنسبة 1.5%. وتستخدم هذه السبائك بكثرة في الهندسة البحرية مثل أعمدة المضخات والرفاسات وأعمدة الرفاسات واللوالب.

4. سبائك النحاس والنيكل: Nickel Copper

الشكل (4) يوضح منحنى التوازن لسبيكة النحاس والنيكل. ومنه يتضح أن لمعدني النحاس والنيكل خاصية الذوبان التام في بعضهما في جميع الأحوال بجميع النسب، أي أن المعدنين تامي الإذابة في الحالة الصلبة والحالة السائلة ويكونان محاليل صلبة في حالة الصب. هذه المحاليل تكون متجانسة وذات مطيلية جيدة يمكن تشكيلها على البارد أو على الساخن بالدرفلة أوالسحب.

تخلو هذه السبيكة من أي صنف ثانوي في البنية الداخلية لذلك فهي ذات مقاومة عالية للتآكل في وجود المحاليل الكيميائية، ويمكن إضافة بعض العناصر لهذه السبيكة للحصول على خواص مثل سبائك النيكل الفضي التي تتكون من 10%-30% نيكل و 65%-63% نحاس والباقي من الزنك، وتستخدم هذه السبيكة الفضية اللون في صنع وطلاء الملاعق وأدوات المائدة الأخرى وأدوات الزينة.

هنالك أيضا سبائك المونيل والتي تحتوي على 70%-30% نيكل و30% نحاس وعناصر أخرى مثل الحديد والمنجنيز وغيرها. وتمتاز هذه السبيكة بالمقاومة العالية للتآكل تحت تأثير الأحماض المعدنية وتستخدم في صناعة أدوات المطبخ ومكائن الغسيل ومحاور المضخات وغيرها. كذلك يمكن إضافة عنصر الكبريت إلى مكونات السبيكة لتحسين قابلية التشغيل.



الشكل (4) منحنى التوازن الحراري للنحاس والنيكل

الفصل الثاني
الألمونيوم وسبائكه
Aluminum and Aluminum Alloys

مقدمة:

الألمونيوم من المعادن التي توجد بكثرة في القشرة الأرضية ومن أهم خاماته البوكسيت (أكسيد الألمونيوم). ومن الخواص التي تؤثر بشدة في استعماله في الصناعة والحياة العملية:

(1) خفة الوزن:

كثافته النسبية $2.7\ kg/m^3$ وهي حوالي ثلث كثافة الحديد ($7.89\ kg/m^3$) وسبائك النحاس ($8.89\ kg/m^3$) مما يجعله خفيف الوزن لذلك يستعمل بكثرة في صناعة الطائرات والفضاء وبعض أجزاء السيارات ووسائل النقل الأخرى. كما أن سبائكه بعد إضافة عناصر سبائكية وإجراء بعض المعالجات الحرارية يمكن أن تكون أقوى من الصلب (على أساس الوزن للوزن).

(2) إلفتة الشديدة للأكسجين:

وهي خاصية تعد ضارة ونافعة في نفس الوقت. وضرر هذه الخاصية يتمثل في الزيادة في تكلفة إستخلاص المعدن نفسه التي تفرضها طريقة التحليل الكهربي. فعادة ما يستخلص أي معدن بتسخين خاماته (وهي في معظمها عبارة عن أكاسيد) مع عامل مختزل رخيص مثل الكربون (على صورة فحم الكوك) وينقى المعدن الخام الناتج بأكسدة الشوائب الموجودة فيه بواسطة الهواء والإضافات الأخرى (كما في حالة استخلاص الحديد الغفل Pig iron). لكن الألمنيوم له إلفه للأكسجين أكبر من الكربون لذلك يستخلص اقتصاديا بالتحليل الكهربي فقط في عملية كيميائية طويلة ومكلفة.

منفعة هذه الخاصية تتمثل في أن الألمنيوم يقاوم التآكل والصدأ مقاومة كبيرة ويرجع ذلك إلى تكوين طبقة رقيقة من الأكسيد المتماسك على سطح المعدن تمنع استمرار تأثره بالأكسجين وهي غير مسامية لا تنفذ الماء والمحاليل الأخرى. ويمكن تدعيم هذه المقاومة بزيادة سمك طبقة الأكسيد على السطح بطريقة صناعية ويمكن تلوينها بالأصباغ العضوية أو الغير عضوية.

تستعمل قابلية الألمنيوم الشديدة للأكسجين كذلك في صناعة الصلب حيث يعمل على اختزال الأكسجين من الصبة وكذلك في عمليات لحام الثيرميت.

(3) توصيله الجيد للكهرباء:

يتمتع بخاصية التوصيل التي تصل إلى 50% من توصيل النحاس وإذا أخذ في الاعتبار الفرق في الوزن بين المعدنين فإنه يفضل النحاس في عمليات التوصيل الكهربي لذلك يستخدم في صناعة الكابلات الكهربائية وعادة ما يكون مجدول حول قضيب من الفولاذ لتقويته.

سبائك الألمنيوم: Aluminum alloy

الألمنيوم النقي يمتاز باللدانة والمطيلية العاليتين وهو ضعيف (قوة الشد حوالي $90N/mm^2$) وله استخدامات قليلة تنحصر في التغليف وبعض أدوات المطبخ)، لذلك تضاف إليه بعض العناصر السبائكية لتحسين الخواص الميكانيكية مثل قوة الشد والصلادة والتماسك والتشغيلية وفي بعض الأحيان لتحسين السيولة وخواص السباكة الأخرى. وهذه العناصر إما أن:

- ❖ تكون محاليل صلبة مع الألمنيوم.
- ❖ مركبات كيميائية مع الألمنيوم.
- ❖ مركبات كيميائية مع بعضها البعض.

تستخدم سبائك الألمنيوم إما في صورة مسبوكات أو مطروقات (تشكيل) ويمكن تحسين خواص العديد منها بعملية **التصليد بالترسيب**. وحسب استخداماتها تقسم إلى أربعة مجموعات:

1. السبائك المطاوعة التي لا تعالج حراريا.
2. السبائك المسبوكة التي لا تعالج حراريا.
3. السبائك المطاوعة التي تعالج حراريا.
4. السبائك المسبوكة التي تعالج حراريا.

السبائك المطاوعة التي لا تعالج حراريا: Wrought alloy which are not heat-treated

أهم المتطلبات في هذه السبائك القوة الكافية والمتانة ومقاومة جيدة للتآكل. يتم الحصول على الخواص الميكانيكية المطلوبة لهذه السبائك بالتشكيل على البارد لكن بمجرد تشكيلها فإنه لا يمكن تغيير خواصها الميكانيكية بعد ذلك.

من أمثلة هذه السبائك سبيكة الألمنيوم مغنيسيوم. وجود المغنيسيوم بنسبة عالية يحسن من مقاومة التآكل لمياه وجو البحر لذلك تستخدم في الإنشاءات البحرية مثل السفن والغواصات.

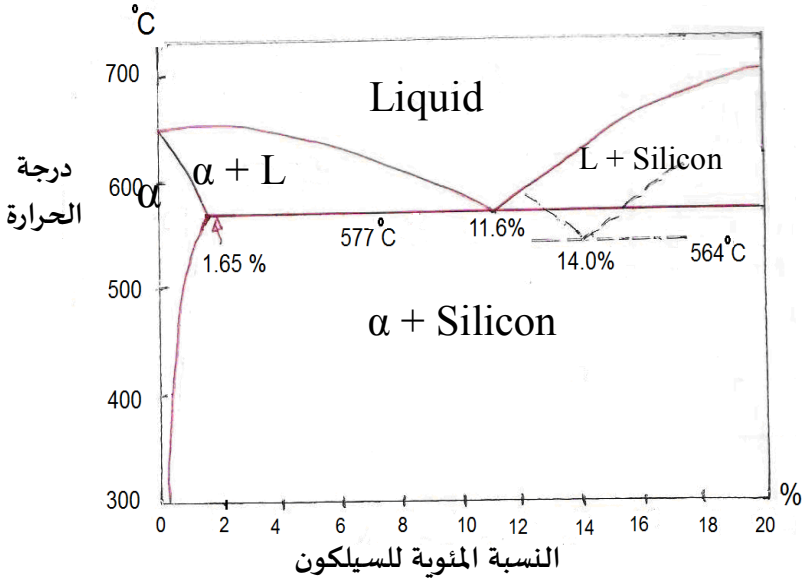
زيادة نسبة المغنيسيوم تحد من عملية التشكيل على البارد لذلك لا بد من تحديد نسبته في السبيكة.

السبائك المسبوكة التي لا تعالج حراريا: Cast alloy which are not heat-treated

هذه المجموعة من السبائك تشمل تلك التي تستعمل في الأغراض العامة بالسباكة في الرمل والقوالب الدائمة. وتستخدم عندما تكون خواص السيولة في السباكة ومقاومة التآكل أهم من المتانة. أهم السبائك المستخدمة في هذه المجموعة هي التي تحتوي على ما بين 9%-13% سليكون مع قليل من النحاس.

إضافة السليكون يزيد من السيولة للألمنيوم ويكون الأيوتكتيك كما في الشكل (1) الأمر الذي يجعل مجال التجمد قليل ويحسن قابلية السباكة. لكن زيادة طور السيلكون يزيد من القصافة.

لتجنب قصافة السيلكون يمكن تهذيب بنية الأيوتكتيك بعملية تسمى **التعديل** Modification، وهي تتلخص في إضافة قليل من الصوديوم (حوالي 0.1%) للمصهور قبل الصب. هذا يؤدي إلى تأخير ترسب السيلكون عندما يصل المنصهر درجة حرارة الأيوتكتيك إلى اليمين من منحنى الإتزان. على ذلك يمكن أن تضاف نسبة سيلكون حتى 14% للسبيكة المعدلة دون أن يوجد سيلكون أولي في البنية النهائية.



الشكل (1) منحنى الاتزان الحراري للألمنيوم والسيلكون موضحا به تأثير عملية التعديل

السبائك المطاوعة التي تعالج حراريا: Wrought alloy which heat-treated

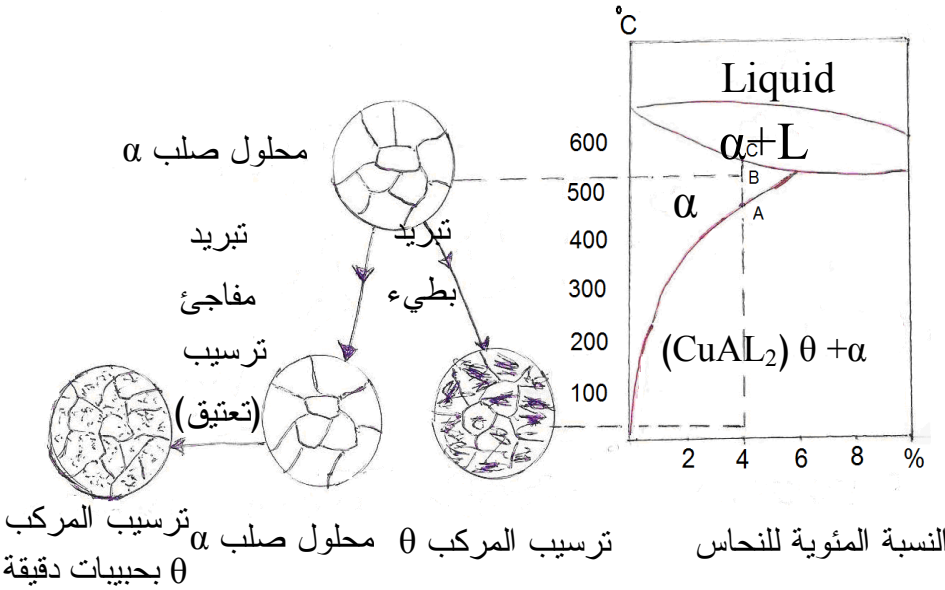
بعض سبائك الألمنيوم تستجيب للمعالجة الحرارية وتتغير خواصها الميكانيكية تبعا لذلك مثل السبيكة التي تحتوي على بعض المغنيسيوم والسيلكون والنحاس عندما تطفأ (تبرد فجأة) في الماء من درجة حرارة حوالي 500°C فإنها تزداد صلادتها عند تركها في درجة حرارة الغرفة لعدة أيام وتصل قوة السبيكة إلى الحد الأقصى بعد أسبوع وتسمى هذه العملية **بالتصليد بالترسيب** أو **التعتيق**. ويمكن الإسراع في عملية التعتيق بتسخين السبيكة لدرجة تصل إلى 180 °C فيما يعرف بالتعتيق الصناعي.

مثلا سبيكة الألمنيوم نحاس التي تحتوي على 4% نحاس الشكل (14.2)، هذه السبيكة عند درجة حرارة أعلى من 500 °C تكون بنيتها من المحلول الصلب α. إذا بردت ببطء وإتزان عند النقطة A يبدأ الطور θ (المركب $CuAL_2$) في التكوين ويستمر حتى درجة حرارة الغرفة ويكون راسباذو حبيبات كبيرة وتكون السبيكة قصفيه.

إذا أعيد تسخين السبيكة ببطء مرة أخرى فإن حبيبات الطور θ ($CuAL_2$) تذوب تدريجيا حتى النقطة A فيعود المحلول الصلب α مرة أخرى.

عند إطفاء السبيكة في الماء (تبريد مفاجئ) فإن الطور θ لا يجد الوقت الكافي للترسيب ونحتفظ بالنحاس ذائبا في المحلول مكونا محلول فوق الإشباع مع الألمنيوم عند درجة حرارة الغرفة. في هذه الحالة تكون السبيكة أصلد وأمتن قليلا نظرا لوجود النحاس في المحلول الصلب، كذلك تكون أكثر مطيلية لعدم وجود حبيبات الراسب θ.

إذا تركت السبيكة بعد ذلك عند درجة حرارة الغرفة تزداد صلادتها ومتانتها تدريجيا حتى تصل الحد الأقصى بعد 6 أيام، ويرجع ذلك لأن السبيكة تكون غير مستقرة ويبدأ الطور θ في الترسب مرة أخرى في هذه الحالة داخل حبيبات المحلول الصلب α مما يؤدي إلى زيادة المتانة والصلادة ونقص المطيلية بالطبع، وذلك لأن حبيباته تكون دقيقة ومنتظمة.



الشكل (2) جزء من منحنى الاتزان لسبيكة الألمنيوم والنحاس مبينا فيه أثر التبريد البطيء والتصليد بالترسيب على البنية

السبائك المسبوكة التي تعالج حراريا: Cast alloy which heat-treated

معظم هذه السبائك من النوع الذي يحتوي على 4% نحاس والبعض يحتوي على 2% نيكل بالإضافة لذلك. التصليد بالترسيب يرجع إلى تأثير وجود المركبين المعدنيين $CuAL_2$ و $NiAL_3$. أشهر أنواع هذه السبائك ما يعرف تجاريا بإسم **Y** وهي سبيكة تحتوي على 4% نحاس و2% نيكل و1.5% مغنيسيوم وتستخدم في الأغراض التي تتطلب متانة عند درجات الحرارة المرتفعة كما هو الحال في البساتم والسلندرات.