الخلائط المعدنية وسباكتها

لهندسة التصميم الميكانيكي - شعبة علم المواد

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

الخلائط المعدنية وسباكتها

لهندسة التصميم الميكانيكي

شعبة علم المواد

الدُّكتور
خالد عثمان شرف
أستاذ مساعد في قسم هندسة التصميم الميكانيكي

الدُّكتور
حسن فارس هدله
مدرّس في قسم هندسة التصميم الميكانيكي

جامعة دمشق

1434 – 1433 هـ
2013 – 2012 م

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفهرس

الفصل الأول: المواد الهندسية	الصفحة
1- المواد الحديدية	17
1-1 الخامات المعدنية	18
1-2 المواد نصف المصنعة	18
1-2-1 المعدن الخام	18
1-2-2 معدن مجهز	18
1-2-3 مسبوكات	19
1-2-4 كتل التشكيل	19
1-2-5 كتل تشكيل نصف مدلفنة	19
1-2-6 القضبان	19
1-2-7 المطروقات	19
1-2-8 القطاعات الإنشائية	19
1-2-9 الأسلاك	19
1-2-10 الألواح	19
1-2-11 الصاج	20
1-2-12 الرقائق	20
1-3 المنتجات النهائية	20
1-4 إنتاج الحديد الخام	20
1-4-1 استخلاص الحديد الخام في الفرن العالي	23
1-4-2 الاستخلاص المباشر للحديد	29

1-4-3	الاستخلاص القاعدي للحديد	30
1-4-4	مساعدات الصهر	30
1-4-5	نواتج الفرن العالي	30
1-4-6	استخلاص الحديد باستخدام الطاقة الكهربائية	32
1-4-7	استخلاص الحديد باستخدام الاحتراق المباشر بالأكسجين	33
1-4-8	استخلاص الحديد في الفرن الدوار	33
1-5	إنتاج الفولاذ (الصلب)	33
1-5-1	طريقة فرن التقليب لصناعة الصلب	34
1-5-2	طريقة المحولات	35
1-5-3	طريقة الفرن المفتوح أو سيمنز مارتن	38
1-5-4	الأفران الكهربائية لإنتاج الصلب	42
1-6	إنتاج حديد الصب (الفونت أو حديد الزهر)	45
2-	المواد غير الحديدية	47
2-1	النحاس وسبائكه	47
2-1-1	النحاس الأصفر	48
2-1-2	البرونز	48
2-1-3	السبيكة الحمراء	48
2-2	الألومنيوم وسبائكه	49
3-	المواد غير المعدنية	49
3-1	اللدائن (البلاستيك)	49
3-2	الخشب	50
3-3	المواد السيراميكية	50

3-4 المواد المركبة 52
3-5 المواد الإلكترونية 53
3-6 المواد الحيوية 53

الفصل الثاني: أسس نظرية الخلائط (السبائك) المعدنية

2-1 مقدمة 55
2-2 تكوين الخلائط المعدنية والخواص العامة لهذه الخلائط 55
2-2-1 المحلول الصلب 56
2-2-2 الأطوار المتوسطة 61
2-2-3 اليوتكتيك واليوتكتويد 64
2-2-4 اليات تقوية الخلائط 68
2-3 مخططات الاتزان الحراري للخلائط الثلاثية التكوين 71

الفصل الثالث: خلائط المعادن الحديدية

3-1 الخلائط الفولاذية 111
3-1-1 الأهداف الرئيسية من إضافة عناصر خلائطية للفولاذ 112
3-1-2 التأثيرات الأساسية التي تتمتع بها العناصر السبائكية على مستوى البنية الميكروية وخصائص الفولاذ 113
3-1-3 تصنيف الفولاذ 121
3-1-4 الفولاذ الخلائطي المحتوي على البورون 121
3-1-5 الفولاذ الخلائطي المحتوي على السيليكون 123
3-1-6 الفولاذ الخلائطي المحتوي على النحاس 124
3-1-7 الفولاذ الخلائطي المقاوم لدرجات الحرارة العالية 125
3-1-8 الفولاذ الخلائطي المحتوي على الموليبدينيوم 128
3-1-9 الفولاذ الخلائطي المحتوي على الفاناديوم 128

3-1-10	فولاذ HSLA	129
3-1-11	فولاذ أدوات القياس	129
3-1-12	الفولاذ المقاوم للصدأ	130
3-1-13	الفولاذ المحتوي على الموليبدينوم	140
3-1-14	الفولاذ المحتوي على النيكل	140
3-1-15	الفولاذ المحتوي على الكروم	143
3-1-16	الخلائط الحديدية المركبة	145
3-1-17	سبائك الفولاذ المنخفض نسبة الكربون	149
3-2	خلائط الحديد الصب (حيد الزهر أو الفونت)	154
3-2-1	العناصر المكونة للحديد الزهر السبائكي وتأثير كل منها على خواصه	155
3-2-2	وصف حديد الصب وأنواعه	161
3-2-3	تصنيف حديد الصب والفولاذ السبائكي	176
3-2-4	خصائص وميزات الأنواع المختلفة من حديد الصب	178

الفصل الرابع: خلائط المعادن اللاحديدية

4-1	مقدمة	201
4-2	الألمنيوم وسبائكه	202
4-2-1	تمهيد	202
4-2-2	خواص الألمنيوم	202
4-2-3	استخلاص الألمنيوم	205
4-2-4	سبائك الألمنيوم	207
4-3	الرصاص وسبائكه	215
4-3-1	تمهيد	215
4-3-2	استخلاص الرصاص	217

4-3-3	خواص الرصاص	219
4-3-4	استخدامات الرصاص	223
4-3-5	سبائك الرصاص	224
4-4	الخارصين (الزنك) وسبائكه	233
4-4-1	تمهيد	233
4-4-2	استخلاص الزنك	234
4-4-3	خواص الزنك	236
4-4-4	استخدامات الزنك	238
4-4-5	سبائك الزنك	240
4-5	القصدير وسبائكه	253
4-5-1	تمهيد	253
4-5-2	استخلاص القصدير	255
4-5-3	خواص القصدير	258
4-5-4	استخدامات القصدير	260
4-5-5	سبائك القصدير	261
4-6	النحاس وسبائكه	281
4-6-1	تمهيد	281
4-6-2	استخلاص النحاس	283
4-6-3	خواص النحاس	287
4-6-4	استخدامات النحاس	293
4-6-5	سبائك النحاس	294
4-7	الكوبلت وسبائكه	407
4-7-1	تمهيد	407
4-7-2	استخلاص الكوبلت	408

4-7-3 خواص الكوبلت 410
4-7-4 استخدامات الكوبلت 416
4-7-5 سبائك الكوبلت 417
4-8 الفلزات الثمينة وخلائطها 451
4-8-1 تمهيد 451
4-8-2 البلاتين 454
4-8-3 البلديوم 464
4-8-4 الذهب 470
4-8-5 الفضة 487

الفصل الخامس: مدخل لتطبيقات الحاسوب في سباكة المعادن

5-1 مقدمة 503
5-2 مزايا النمذجة الحاسوبية 504
5-3 نمذجة انتقال حرارة التجمد 505
5-3-1 مقدمة 505
5-3-2 التجزيء والتوصيف الهندسي 506
5-3-3 برامج الأغراض الخاصة 511
5-3-4 قاعدة البيانات 518
5-3-5 ترجمة مخرج المحاكاة الحاسوبية 520
5-3-6 نظرة استشرافية نحو المستقبل 523
5-4 نمذجة جريان المائع 525
5-4-1 مقدمة 525
5-4-2 طرائق توازن الطاقة 526
5-4-3 النمذجة الفيزيائية لملء القالب 532
5-4-4 تقنيات توازن كميات الحركة 535

5-5 النمذجة المشتركة لتدفق المائع وانتقال الحرارة/الكتلة 552
5-5-1 مقدمة 552
5-5-2 الحرارة المفقودة أثناء الصب 555
5-5-3 الحمل الحراري الطافي بعيد الصب 559
6-5 نمذجة نمو البنية البلورية 566
5-6-1 مقدمة 566
5-6-2 النمذجة الماكروية 567
5-6-3 نمذجة البنى العمودية 569
5-6-4 نمذجة البنى المتجانسة محورياً 573
المصطلحات العلمية 589
المراجع العلمية 595

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

مقدمة

يشهد العالم اليوم ثورة شاملة وتطوراً متسارعاً في مجال تكنولوجيا علم المعادن وخلائطها وفي مجال تكنولوجيا المعلومات (Information Technology IT) ، أدّت هذه الثّورة إلى ظهور مجتمع المعرفة الّذي عمل على تغيير معايير قياس التّطور الحضاري. كما أنّ ظهور التّقنيات الحديثة في هذا المجال أدى إلى قفزة حضارية كبيرة في المجال الصناعي، وتطور البرمجيات الحاسوبية أيضا أعطى إمكانية كبيرة لمحاكاة المسبوكات من لحظة سكبها وحتى حصول التحولات السائلة والصلبة فيها، وهذا له أثر اقتصادي كبير في الاستدلال على البنية المعدنية المتوقعة ومعالجتها وتمثيلها قبل عملية السباكة، كما أنه عامل في توفير الكثير من الجهد والوقت، وتقليل الهدر في المال، بالإضافة إلى دورها الفعّال في تنمية المجتمعات، ودعم اتخاذ القرار. لهذا فإنّ الثّروة الحقيقية للأمم في القرن الحادي والعشرين تتمثّل في الذّكاء، والاختراع، وتوظيف التّقنيات الحديثة.

لقد امتاز القرن العشرون بالتطور الصناعي الكبير، ناهيك عن التطور العلمي الذي فتح أبواباً كثيرة أمام التطور الصناعي. وقد كان علم التعدين مقتصراً على ما يتعلق باستخلاص المعادن من فلزّاتها وتهيئة هذه المعادن للاستعمال، غير أن تطور استخدام المعادن مع التطور السريع للعالم جعل من البديهي الاهتمام بدراسة خواص هذه المعادن، والعوامل التي تؤثر عليها، وطرق المقارنة بين هذه الخواص، وكيفية التحكم بها من أجل اختيار المعدن أو الخليطة المعدنية الأكثر ملائمة لكل غرض من الأغراض الصناعية المتزايدة والمتطورة باستمرار، فكان لابد من وجود فرع من بين الفروع يهتم بدراسة تطوير خواص هذه المعادن على أسس علمية دون الاكتفاء بالظواهر، والتحكم بها مستفيداً من التطورات الحاصلة في فروع العلوم الطبيعية الأخرى كافة. ولم يعد المهندس في وقتنا الحالي

قادراً على الاستغناء عن المعرفة الوافية لخصائص المادة التي يتعامل معها كي يكون قادراً على التغلب على المشاكل التقنية كافة التي تصادفه ضمن أطر علمية سليمة.

عملت كثير من الدول والشركات الصناعية على دراسة كل الخواص اللازمة لهذا الفرع العلمي وتصنيفها بحيث يستطيع المهندس العودة إلى هذه الدراسة متى احتاج الأمر. فأضافت كل من هذه الدول مقاييس ومواصفات نظامية للمعادن كافة والآلية وموضعية استخدامها.

وضع هذا الكتاب بأسلوب يتماشى مع التّقنيات الحديثة في علوم المواد الهندسية وخلائطها، وقد بُذل جهد كبير في طباعته ورسم أشكاله لإعطائه جمالية عالية تجذب قارئه. يقع هذا الكتاب في خمسة فصول دراسية أساسية وهي: الفصل الأول: حيث يتناول دراسة مفصلة عن المواد الهندسية من حيث تصنيفها، إما مواد معدنية وهذا يشتمل على دراسة المواد الحديدية واللاحديدية وشرح مبسط عن طرق تصنيعها وأفران الصهر المختلفة، ودراسة تركيبها). وإما دراسة المواد اللا معدنية التي تشمل المواد العضوية والمواد غير العضوية مثل اللدائن والخشب والجلد والمطاط وما إلى ذلك. أما الفصل الثاني: أسس نظرية الخلائط (السبائك) المعدنية، فيتم من خلاله دراسة تكوين الخلائط المعدنية، الخواص العامة للخلائط المعدنية، منحنيات الاتزان الحراري للخلائط ثلاثية التكوين أو أكثر. وفي الفصل الثالث: خلائط المعادن الحديدية: ندرس الفولاذ الكربوني والفولاذ منخفض نسبة الكربون، والفولاذ السبائكي: الفولاذ النيكلي. الفولاذ الكرومي. فولاذ نيكل– كروم. الفولاذ المحتوي على المولبدينيوم. الفولاذ المحتوي على الفاناديوم. الفولاذ المقاوم للحرارة. الفولاذ المنغنيزي.الفولاذ التنغستيني. الفولاذ الكوبالتي. الفولاذ المحتوي على البورون. الفولاذ المحتوي على السيليكون. الفولاذ المحتوي على النحاس. الفولاذ HISLA عالي المتانة منخفض نسبة العناصر السبائكية. الفولاذ عالي نسب العناصر السبائكية: الفولاذ المقاوم للصدأ (ستانلس ستيل) [الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي، الفريتي، المزدوج

(فريتي + أوستنيتي) المارتنسيتي|، كما يتناول فولاذ العدد القاطعة. وفولاذ أدوات القياس. وسبائك حديد الصب الأبيض والرمادي: حديد الصب الأبيض. حديد الصب الكروي. حديد الصب الرمادي. حديد الصب القابل للطرق. حديد الصب ذو الغرافيت الدودي. حديد الصب الخلائطي. وخلال الفصل الرابع: الخلائط المعدنية اللاحديدية وطرق سباكتها يتم خلاله دراسة الألمنيوم وسبائكه: (استخلاص الألمنيوم، خواصه، استخداماته وسبائكه). النحاس وسبائكه (استخلاص النحاس، خواصه، استخداماته وسبائكه). وبالطريقة نفسها دراسة الرصاص وسبائكه، والزنك وسبائكه، والقصدير وسبائكه. والنيكل وسبائكه. والكوبالت ذو الأساس المعدني وسبائكها، كما يتم دراسة الفلزات الثمينة وسبائكها. وفي الفصل الخامس استخدامات الحاسب الآلي في سباكة المعادن: يتناول مقدمة عن استخدامات الحاسب في سباكة المعادن، نمذجة عمليات الانتقال الحراري أثناء التجمد، نمذجة التدفق الحراري، نمذجة مشتركة لكل من التدفق الحراري والانتقال الحراري ضمن المسبوكة وخارجها، نمذجة تكّون التركيبة الميكروية ونموها. ويعد هذا المقرر أساسياً وهاماً لطلبة علم المواد --- سنة خامسة لما له من فائدة علمية وعملية.

ختاماً نرجو من الله تعالى أن نكون قد وفقنا في تأليف هذا الكتاب وأن تتحقق منه الفائدة المرجوة.

دمشق 2012/6/1

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الأول

المـــــواد الهندســـــية

Engineering Materials

تستخدم في مجالات التصنيع الهندسي مجموعة من المواد الأولية ونصف المصنعة لكل منها صفات ميكانيكية وطبيعية وكيميائية معينة، بحيث تلائم صفات المنتج المطلوب تصنيعه، سواء كان ذلك المنتج ماكينة أم جزءاً من مبنى أو أداة يدوية، وتقسم المواد الهندسية بصفة عامة إلى مواد معدنية (فلزية) ومواد غير معدنية، وتشمل المواد المعدنية المواد الحديدية وغير الحديدية، بينما تشمل المواد غير المعدنية المواد العضوية والمواد غير العضوية مثل الدائن والخشب والجلد والمطاط وما إلى ذلك.

١- المواد الحديدية:

تعد المواد الحديدية من أكثر المواد استخداماً في الصناعات الهندسية، فنجد أن المعادن الحديدية تمثل أكثر من 90 % من وزن أي ماكينة صناعية، كما أن سبائك الحديد سواء أكانت في شكل ألواح أم قضبان أم أسلاك أم قطاعات إنشائية ذات مقاطع مختلفة الأشكال أم مسبوكات أم مطروقات تمثل العمود الفقري لأي اقتصاد صناعي حديث، والمعادن الحديدية هي عبارة عن سبائك الحديد مع الكربون وعناصر أخرى منها السيليكون والمنجنيز والفسفور والكبريت وغيرها. وتقسم المعادن الحديدية تقسيما عريضا إلى نوعين رئيسين: الفولاذ أو الصلب Steel وحديد الصب أو ما يدعى حديد الزهر (الفونت) Cast Iron والفولاذ هو سبائك الحديد التي تحتوي على أقل من 2% كربون والفونت هو السبائك التي تحتوي على نسبة تتراوح بين 2.5 و 3.75 % كربون.

وإذا تأملنا أي منتج مصنوع من المعادن الحديدية من تلك التي تصادفنا في حياتنا اليومية مثل جسم محرك السيارة المسبوك من حديد الزهر أو هيكلها المصنوع من الصاج، وتحرينا عن طريقة إنتاجه لوجدنا أن هذا المنتج قبل أن يصل إلى شكله النهائي قد مر بسلسلة طويلة معقدة مترابطة من العمليات، ويبين الشكل (1-1) وصفا للأفران المستخدمة في تسلسل عمليات إنتاج المعادن الحديدية، بينما يبين الشكل (1-2) باختصار تسلسلاً لعمليات إنتاج المعادن الحديدية ابتداء من خام الحديد حتى الوصول إلى المنتجات النهائية.

ويمكن تقسيم المواد الحديدية المستخدمة في الصناعة إلى ثلاثة أنواع: خامات معدنية، مواد نصف مصنعة، منتجات نهائية.

1-1: الخامات المعدنية:

وهي معادن متحدة مع عناصر أخرى على شكل أكاسيد أو كربونات أو كبريتات وخلافها، وتوجد في الطبيعة مختلطة مع مواد أخرى تسمى المادة العاطلة في الخام، ويستخرج الخام في الطبيعة بواسطة الصناعات التعدينية، ويستخلص المعدن منه بالطرق الميتالورجية الاستخلاصية، وعلى سبيل المثال نجد خامات معدنية مثل الهيماتيت وخام المانجنايت، ومثالا للمادة العاطلة في الخام السليكا (الرمل) والألومينيا (إحدى مكونات الطين) والجير (أكاسيد الكالسيوم).

1-2: المواد نصف المصنعة:

والمواد نصف المصنعة هي المواد التي أجري عليها بعض العمليات التصنيعية ولا تزال تنتظر إجراء عمليات تصنيعية تالية لتعديل خواصها وشكلها، والمواد نصف المصنعة متعددة الأشكال حسب المرحلة التي وصلت إليها في التصنيع، وفيما يلي الأمثلة على الخامات والمواد الحديدية نصف المصنعة.

1-2-1 المعدن الخام:

هو المعدن الناتج من عملية الاستخلاص الميتالورجية الأولية من الخام المعدني الأصلي، ويحتاج التركيب الكيميائي للمعدن الخام إلى تعديل بواسطة عمليات تالية للحصول على التركيب المطلوب، كما هو الحال في عمليات إنتاج الحديد الصلب والزهر.

1-2-2 معدن مجهز:

بعد إعادة صهر المعدن الخام وضبط تركيبه الكيميائي يكون جاهزاً للصب في القالب بالشكل المطلوب، مثال ذلك، يعاد صهر الزهر الخام الخارج من الفرن العالي في فرن الدست أو أي فرن آخر، ثم يصب في قوالب بالشكل المطلوب، أو يحول في فرن تحويلي إلى صلب يصب على شكل كتل التشكيل.

1-2-3 مسبوكات:

هي الأشكال التي تنتج بصب المعدن المنصهر في قوالب الرمل أو المعدن، بها تجويف له شكل الجزء المراد إنتاجه نفسه، ويبرد المعدن بعد صبه في هذا التجويف حتى يتجمد على الشكل المطلوب.

1-2-4 كتل التشكيل:

تصب المعادن التي سوف تشكل بعد ذلك تشكيلا لدنا بالدلفنة أو بالطرق على شكل كتل تشكيل يتراوح وزنها بين 100 كغم و10 طن.

1-2-5 كتل تشكيل نصف مدلفنة:

جميع كتل التشكيل يجري عليها عمليات دلفنة أولية لتغيير التركيب البلوري للمعدن المصبوب، لأنه عادة ما يكون غير متجانس التركيب، فلا يلائم عمليات التشكيل اللدن اللاحقة، وينتج من عمليات الدلفنة الأولية كتل نصف مصنعة يطلق عليها بلاطات التشكيل والكتل المربعة.

1-2-6 القضبان:

هي المنتجات المدلفنة أو المبثوقة أو الممسوبة، وتكون على شكل أطوال كبيرة ومقطع صغير مستدير أو مربع أو مستطيل أو مسدس، وتكون كذلك مستقيمة، وفي بعض الأحيان تلف على بكرات.

1-2-7 المطروقات:

هي منتجات التشكيل اللدن الناتجة بتوجيه طرقات متتالية على المعدن الذي يكون في حالة لدنة.

1-2-8 القطاعات الإنشائية

هي منتجات ذات أطوال كبيرة، وتأخذ قطاعاتها أشكالا متعددة مثل حرف " T " أو زاوية أو مجرى، وتنتج عادة بالدلفنة، وتستخدم في الأعمال الإنشائية والبناء.

1-2-9 الأسلاك

يطلق اسم السلك على القطاعات المستديرة عادة ولا يزيد قطرها عن 2 ملليمتر، وهو ينتج عن سحب المعادن في صورة القضبان، وأطوالها تكون كبيرة جدا.

1-2-10 الألواح

هي منتجات مسطحة مدلفنة من أي مادة ولا يقل سمكها عن 1 ملليمتر.

1-2-11 الصاج

هي ألواح من الحديد المدلفن، وبنها المجلفن بالزنك، ويسمى بالصاج الأبيض المجلفن، أما غير المجلفن فيعرف بالصاج الأسود إذا لم يعالج كيميائيا وإذا عولج كيميائيا بتبييضه سمي صاجاً أبيض.

1-2-12 الرقائق

مثل الألواح إلا أن سمكها يقل عن 1 ملليمتر.

وتستخدم الأشكال السابق ذكرها كمادة أولية لصناعات أخرى. فمثلا يستخدم السلك لصناعة المسامير أو اصناعة النوابض (الزنبرك- السوستة- الياي)، ويستخدم الصاج في عمل هياكل السيارات والثلاجات والمنتجات المشكلة بالكبس أو السحب العميق، والكتل المربعة تستخدم كمادة أولية في الحدادة أو في البثق، وتستخدم القضبان المستديرة أو المسدسة المقطع كمادة أولية في عمليات قطع المعادن لإنتاج العوامير والمسامير والصواميل.....إلخ.

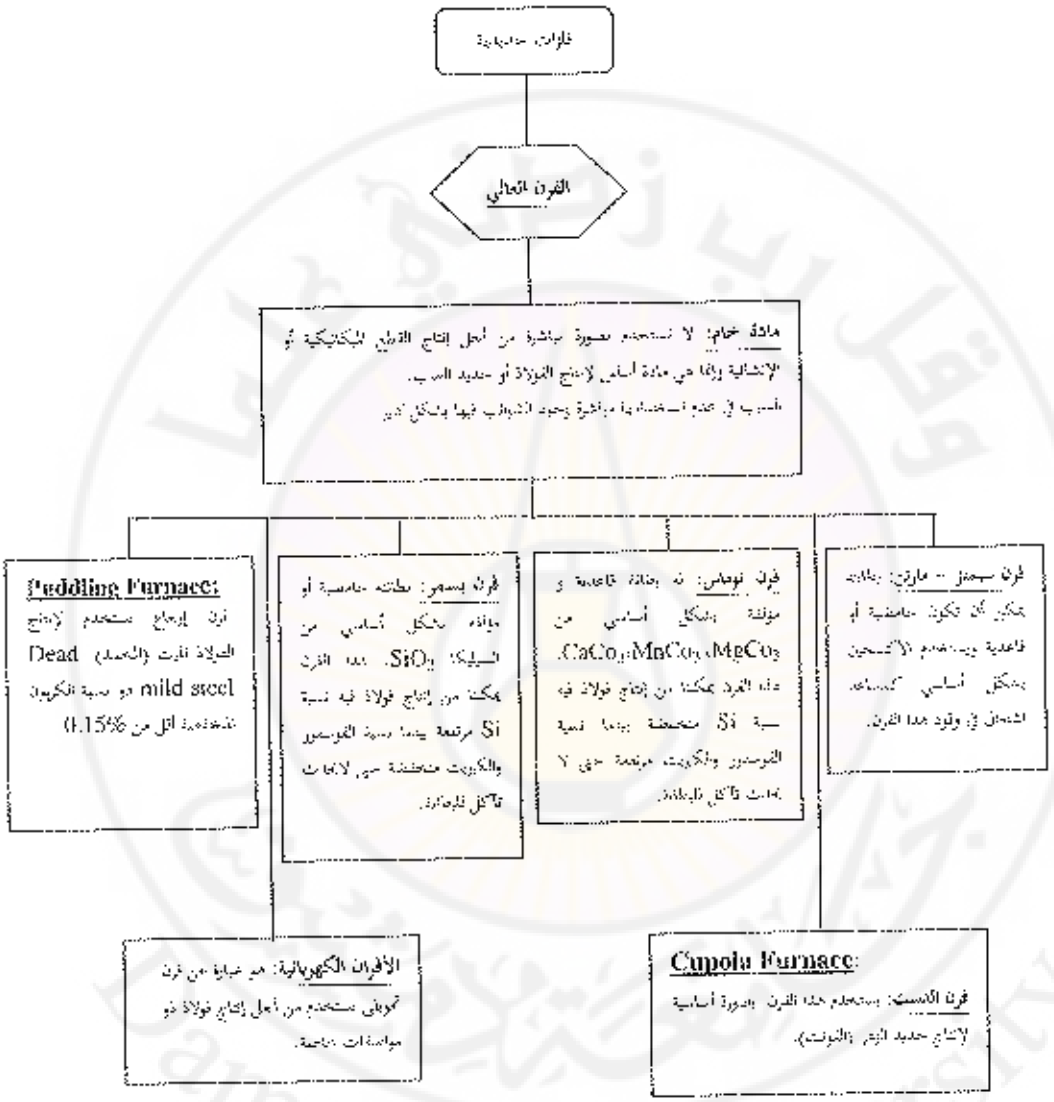
1-3: المنتجات النهائية

وهي عبارة عن المنتجات التي مرت بجميع مراحل التصنيع من تشكيل وتشغيل وملاء ومعالجة، وأصبحت جاهزة للاستخدام النهائي أو لتجميعها مع منتج آخر. ويوجد عدد لا نهائي من المنتجات النهائية التي نقابلها في حياتنا اليومية.

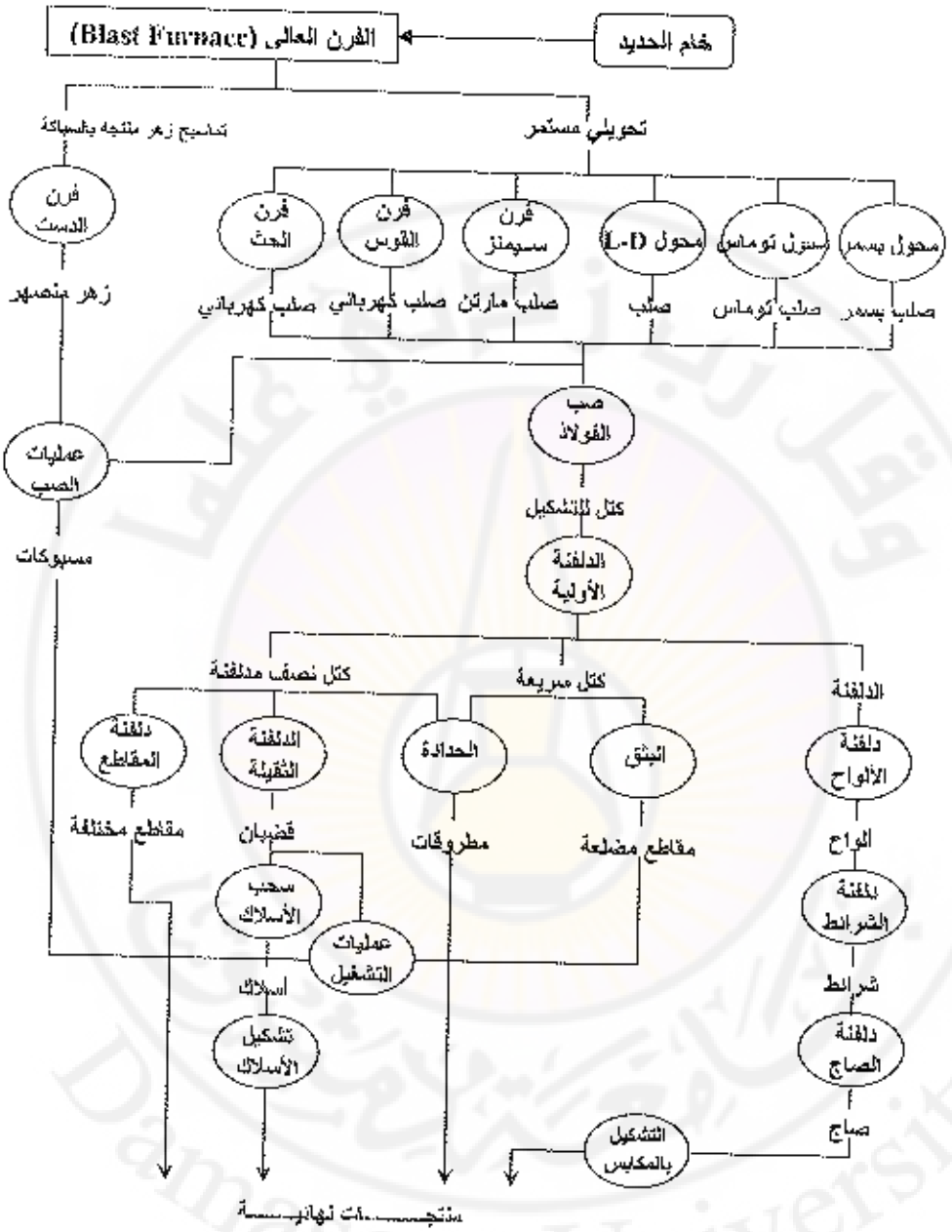
1-4: إنتاج الحديد الخام:

يتم استخلاص الحديد الخام من خبث الحديد في أفران خاصة، ويتم تحويله إلى حديد خام كمرحلة أولى. وتتم عملية الاستخلاص هذه في غالب الأحيان في الأفران العالية (اللافحة Blast furnaces)، وفي النادر ما يستخلص الحديد الخام في الأفران الكهربائية. ولو أن هناك بعض الطرق الأخرى التي بدأت تدخل في مجال الاستخدام في استخلاص الحديد الخام باستخدام غازات مختزلة ساخنة مثل: الهيدروجين والميثان وأول أكسيد الكربون. وقد تختلف وسائل تسخين الخبث في هذه الطرق، فتستخدم الوسائل الكيميائية بإحراق فحم الكوك (إلى ثاني أكسيد الكربون) وتوليد كمية كبيرة من الحرارة كما في الفرن العالي. وتستخدم الطاقة الكهربائية في التسخين في الأفران الكهربائية، إلا أن اختزال أكسيد الحديد يتم بأسلوب واحد في الطريقتين، وذلك باستخدام كربون فحم الكوك لينتزع الأكسجين من أكسيد الحديد. أي أنه لابد من استخدام

فحم الكوك في كلتا الطريقتين للاختزال. فقط تزداد كمياته المستهلكة في الفرن العالي نظراً لاستخدامه في التسخين بجانب الاختزال.



الشكل (1-1): يبين وصفاً للأفران المستخدمة في عمليات إنتاج المعادن الحديدية.



الشكل (1-2): تسلسل عمليات إنتاج المعادن الحديدية.

1-4-1: استخلاص الحديد الخام في الفرن العالي :

يوضح الشكل (1-3 أ، ب) رسماً تخطيطاً للفرن العالي المستخدم في استخلاص الحديد الخام من خبث الحديد، ويتكون من أربعة أجزاء رئيسة:

1. غرفة شحن في القمة على هيئة ناقوسين على التوالي لإمكان إدخال الشحنة في الفرن مع منع هروب الغازات.
2. مخروط ناقص طويل مبني بالطوب الحراري المغلف بالصاج من الخارج.
3. مخروط ناقص قصير مقلوب متحد بقاعدته مع المخروط الأول الطويل، وهو مبنّي أيضاً بالطوب الحراري المغلف بالصاج من الخارج، ويحيط بهذا المخروط أنبوب حلقي لتغذية الفرن بالهواء الساخن المضغوط من خلال فتحات (ودنات) عند قاعدة المخروط عددها حوالي 16 فتحة بقطر 15 سم.
4. جزء أسطواني مبني بالطوب الحراري المغلف بالصاج. وهذا الجزء يمثل وعاء تجمع المعدن المنصهر والخبث، ويسمى هذا الوعاء المرقد (Bed).

ولا تقتصر وحدة الفرن على ما ذكر، بل يوجد هناك ملحقات متممة له مثل وحدة الشحن، ووحدة التفريغ للمنصهر والخبث، ثم وحدة تلقي الغازات الناتجة وتنقيتها والاستفادة بحرارتها في تسخين الهواء الداخل للفرن. الشكل (1-4).

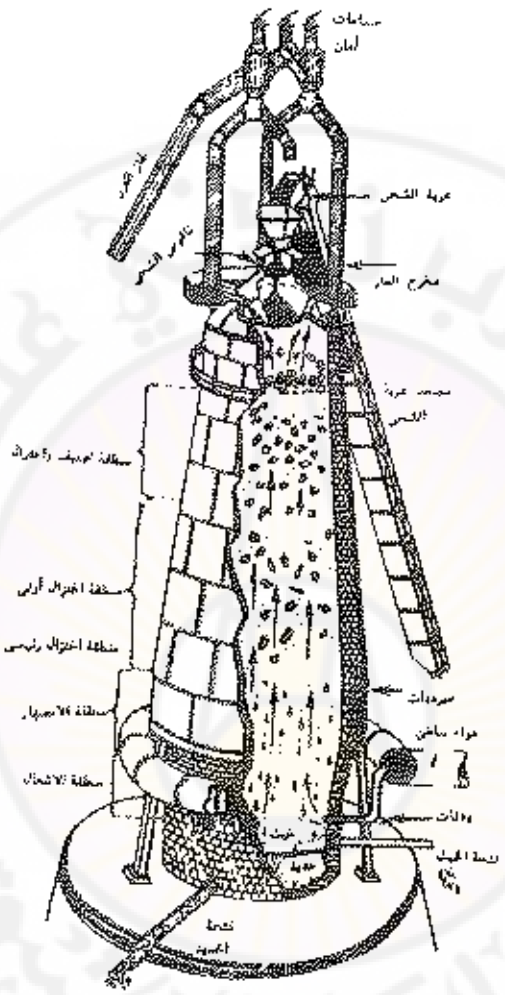
وتبلغ أبعاد الأفران العالية المعتادة نحو 8 أمتار (قطر) ونحو 60 متراً (ارتفاع)، ويتراوح إنتاج الفرن الواحد بين 800- 1700 طن كل 24 ساعة، ويمكن أن يعمل الفرن باستمرار لعدة سنوات تبلغ نحو 12 سنة دون توقف لإجراء عملية الصيانة أو إعادة بنائه. ويشحن الفرن بواسطة عربات رافعة تنقل الشحنة إلى قمته، وهي تتكون من الحديد الغفل وفحم الكوك ومساعد الصهر flux الذي يتكون أساساً من الحجر الجيري Lime stone، أما الهواء الساخن اللازم لتغذية الأكسجين فيغذى من الودنات.

وتتكون الشحنة من الكميات التالية:

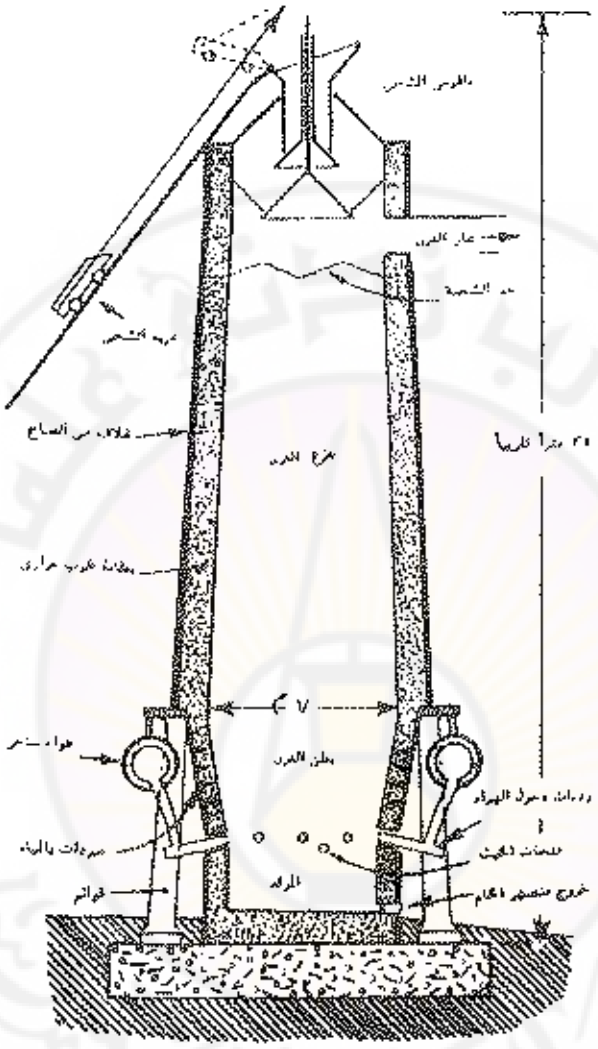
1000 طن غفل حديد – 450 كجم كوك – 300 كجم حجر جيري – 3600 طن هواء

وينتج من هذه الشحنة: 500 طن حديد خام – 750 طن خبث – 3250 طن غاز الفرن العالي.

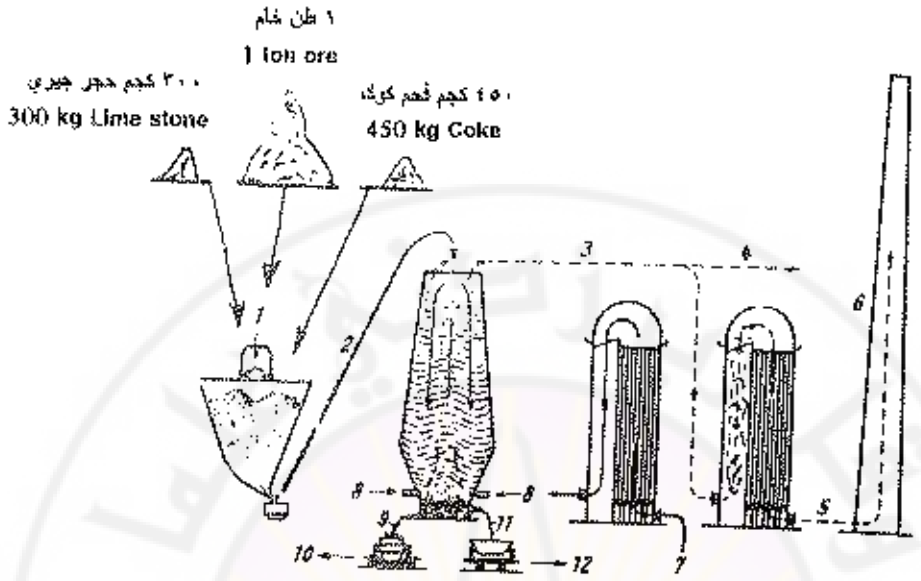
ويشحن الحديد الغفل والكوك وحجر الجير، وهي كلها مواد جامدة، في صورة طبقات متتابعة، ويكون الفرن دائماً مملوءاً بالشحنات على مدى كل ارتفاعه طوال الوقت.



الشكل (1-3 أ): الفرن العالي Blast furnace.



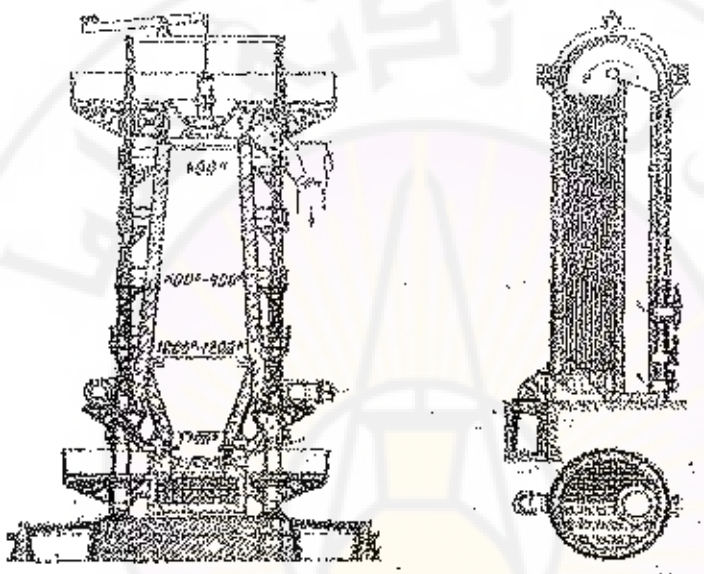
الشكل (1-3 ب): مقطع في الفرن العالي لإنتاج الحديد الخام.



الشكل (1-4): شحنات ووحدات الفرن العالي.

وتفضل التغذية بالهواء الساخن عن الهواء البارد لأنه يوفر استهلاك الكوك بما يعادل 70%، ويؤدي إلى صغر حجم الفرن لكمية إنتاج معينة. وتكون درجة الحرارة المثلى للهواء هي نحو 450 درجة مئوية، ويتم التسخين لهذه الدرجة عن طريق الاستفادة من الحرارة المحسوسة الموجودة بغازات الفرن التي يراد التخلص منها عن طريق العادم، بالإضافة إلى الحرارة الناشئة من احتراق أول أكسيد الكربون الموجود في غازات العادم. وفائدة الحجر الجيري هو الاتحاد مع بقايا تفاعل الفحل وأكسجين الهواء (أي تكوين خبث الحديد) وتكوين خبث يسهل إزالته، هذا بجانب حدوث بعض التفاعلات بين الحديد المنصهر والخبث السيل الطافي فوق سطحه. ونتيجة هذا التفاعل هو العديد من خواص الحديد الخام الناتج.

وبمراقبة الفرن من نقطة دخول الهواء الساخن نجد أكسجين الهواء يحرق الكربون الموجود في الكوك مولداً قدراً كبيراً من الحرارة وتتصاعد غازات الاحتراق الساخنة وهي أول وثاني أكسيد الكربون إلى أعلى لتسخين الشحنات الهابطة. ويوضح الشكل (1-5) تدرج درجات حرارة الشحنة من قمة الفرن إلى قاعه.



الشكل (1-5): توزيع الحرارة في الفرن العالي ومسخن الهواء.

ويمكن تقسيم الفرن العالي إلى أربع مناطق رئيسية:

المنطقة الأولى:

وتوجد في قمة الفرن وتقع مباشرة دون باب الشحن، وتتراوح درجات الحرارة عندها من 250 إلى 550 درجة مئوية. وفيها تفقد الشحنة كل رطوبتها (أي تتحمص) وتصبح مسامية. و يبدأ اختزال جزئي ضعيف بفعل أول أكسيد الكربون الساخن المتصاعد مع ثاني أكسيد الكربون كما يلي:

$$Fe_3O_4 + 3CO \longrightarrow 2Fe + 3CO_2$$

المنطقة الثانية:

وتبلغ عندها درجة الحرارة من 550 إلى 850 درجة مئوية. و يستمر اختزال الغفل بأول أكسيد الكربون كما يلي على الترتيب نزولاً من القمة إلى الأسفل:

$$Fe_2O_3 + 3CO \longrightarrow 2Fe + 3CO_2$$

$$FeO + CO \longrightarrow Fe + CO_2$$

$$FeO + C \longrightarrow Fe + CO$$

المنطقة الثالثة:

وتبلغ درجة الحرارة عندها من 850 إلى 1150 درجة مئوية. وعندها يتم الاختزال الرئيسي للغفل بواسطة كربون الفحم، ويتحول الغفل المختزل إلى كتل إسفنجية تعرف بالحديد الإسفنجي Spongy Iron، وحديد يكاد يكون نقياً ومنخفضاً للغاية في نسبة الكربون، وينصهر هذا الحديد عند قاع هذه المنطقة وتتساقط قطراته إلى المرقد في قاع المنطقة الرابعة بجانب ثعلل الحجر الجيري وتفاعل بخار الماء مع الكربون:

$$Fe + CO_2 \longrightarrow FeO + CO$$

$$CaCo_3 \longrightarrow CaO + CO_2$$

$$H_2O + C \longrightarrow H_2 + CO$$

المنطقة الرابعة:

وعندها يتم احتراق الفحم بأكسجين الهواء الساخن الداخل من الودنات، وهي منطقة المخروط السفلي Bosh، وتبلغ درجة الحرارة في هذه المنطقة حدها الأقصى وهي نحو 1900 درجة مئوية، ويتم كذلك اختزال جزء من الشوائب الموجودة في الحديد مثل المنجنيز والسليكون والكبريت والكالسيوم:

$$FeO + C \longrightarrow Fe + CO$$

$$MnO + C \longrightarrow Mn + CO$$

$$CaO + Al_2O_3 + SiO \longrightarrow \text{خلائط سليكات}$$

$$SiO_2 + C \longrightarrow Si + 2CO$$

$$FeS + CaO + C \longrightarrow CaS + Fe + CO$$

وتتجمع نتائج التفاعلات مع تراب الفحم لتكوّن الخبث الذي يطفو فوق الحديد المنصهر في المرقد في قاع الفرن حيث تبلغ درجات الحرارة نحو 1500 درجة مئوية. وتسمى المنطقة الرابعة بمنطقة الاحتراق لاشتعال الفحم بها. ولوفرة وجود الكربون وارتفاع درجة الحرارة يعود ثاني أكسيد الكربون للتفاعل مع الكربون لتكوين أول أكسيد الكربون. وعند انصهار الحديد الإسفنجي عند قاع المنطقة الثالثة ومروره على الفحم المتوهج في المنطقة الرابعة (منطقة الاشتعال) فإنه يكتسب منه قدراً كبيراً من الكربون أي يتحول من حديد نقي إلى حديد متشابك معه كربون، وكلما زادت نسبة الكربون في الحديد قلت درجة انصهاره (درجة انصهار الحديد النقي هي 1539 درجة مئوية) فيصبح حديداً سيلاً في انصهاره، ويتجمع في قاع المرقد ويطفو فوقه الخبث المتجمع، وبالتالي يمكن سحب الحديد من فتحة بالقاع، أما الخبث فيسحب من فتحة أعلى منها بنحو 1.5 متر، ويسحب الحديد على فترات بين 5، 6 ساعات، أما الخبث فيسحب كل 3 ساعات. ويستخدم الخبث في صناعات عديدة منها الإسمنت الحديدي، أما الغازات فيستفاد بها بعد تنقيتها من الأتربة في تسخين هواء الاحتراق وفي أغراض أخرى.

1-4-2: الاستخلاص الحامضي للحديد:

يحتوي الخبث بصفة عامة على الأكاسيد الحامضية مثل SiO_2، TiO_2، P_2O_5 ثاني أكسيد السيليكون (السيليكا) وثاني أكسيد التيتانيوم (تيتانيا) وخامس أكسيد الفسفور. ويحتوي الخبث بجانب ذلك على الأكسيد القاعدي CaO أكسيد الكالسيوم. ويقدر توافر الأكاسيد الحامضية والقاعدية بعضها بالنسبة للبعض بقدر ما تتحدد حامضية الخبث أو قاعديته، وتتراوح هذه النسب في الفرن العالي بين 0.7 – 1.5 للخبث شديد الحامضية وشديد في قاعديته على التوالي. ولما كانت المهام الأساسية لمساعدات الصهر المضافة هي تعادلها وتكوين خبث يجمع العناصر غير المرغوب فيها فيمكن القول إنه لإزالة الشوائب القاعدية يستخدم مساعد صهر حامضي، والعكس صحيح يستخدم مساعد صهر قاعدي لإزالة الشوائب الحامضية، فمثلاً أكسيد الحديدوز القاعدي يتحد مع السيليكا مكوناً سليكات الحديد (يفقد في هذا التفاعل جزء من الحديد بصعب استخلاصه ويذهب مع الخبث) وأكسيد السيليكون ذاته يصعب اختزاله داخل الفرن العالي لانخفاض درجة حرارة الفرن عن الدرجة اللازمة للاختزال، ولهذا فإذا أريد اختزال السيليكا

الحصول على حديد خام غني بالسيليكون تجرى عملية إعادة صهر الحديد في الأفران الكهربائية (لارتفاع درجة الحرارة بها) ويتم الاختزال بالفحم (الكربون) مباشرة دون أكاسيد الكربون. ويشجع وجود الخبث الحامضي عملية إعادة تنقية الحديد الخام بتأكسد العناصر القاعدية، ولو أن ذلك يتم ببطء، أما الخبث القاعدي فهو يؤكسد العناصر الحامضية بسهولة أكثر.

1-4-3: الاستخلاص القاعدي للحديد:

يكون الخبث في هذه الحالة قاعدياً، ولذلك تصنع بطانة الفرن قاعدية لكي لا تتفاعل مع الخبث وتذوب، وقاعدية الخبث تنشأ من وجود أكسيد الكالسيوم CaO أو أحياناً وجود أكسيد الصوديوم في حالة التخلص من الكبريت الموجود بالخام.

1-4-4: مساعدات الصهر:

وتتكون مساعدات الصهر أساساً من حجر الجير الحي CaO النقي ويضاف إليه الفلورسبار (فلوريد الكالسيوم CaF_2) للاتحاد بالشوائب وبقصد خفض درجة انصهار الخبث، وبالتالي زيادة سيولته فيسهل سحبه من فتحة خروج الخبث، وأحياناً يضاف هيدروكسيد الألومنيوم المعروف باسم البوكسيت Bauxite وهو يستخدم لاستخلاص أنواع خاصة من الحديد الخام ويعوض وجود الفلورسبار في الأفران القاعدية.

1-4-5: نواتج الفرن العالي:

تنقسم نواتج الفرن العالي إلى نواتج أساسية وأخرى ثانوية، فالحديد الخام هو الناتج الأساسي Main Product، بينما النواتج الأخرى وهي الخبث وغازات الاحتراق والأتربة فإنها ثانوية By - Product.

أولاً: الحديد الخام Raw or Pig Iron:

يخرج الحديد الخام من فتحة خاصة في أسفل المرقد عند قاع الفرن في حالة منصهرة فيصب في قنوات ويترك فيها ليتجمد ويبرد، أو قد يصب في أوعية خاصة مبطنة بالطوب الحراري وتعرف باسم (البوش Ladles) وينقل فيها إلى أماكن تحويله إلى صلب.

والحديد الخام الذي يصب في قنوات يتجمد فيها، ويأخذ شكل كتل تشبه تماسيح الحديد الخام، ويعبر عنها بالانجليزية بالتعبير Pig Iron نظراً لتشابهها بالخنزير. وهذا الحديد لا يصلح للاستخدام في الصناعة مباشرة لأن خواصة الميكانيكية رديئة فهو قصيف (هش) لا يتحمل إجهادات الشد أو الصدمات وخلافه، وذلك بسبب ارتفاع نسبة وجود الكربون به بجانب الشوائب

الأخرى مثل السيليكون والمنجنيز والكبريت والفسفور وهذه الشوائب تؤثر بدرجة كبيرة مباشرة على خواص الحديد الخام وخاصة العنصرين الأخيرين.

وفيما يلي صورة تقريبية لتركيب بعض الأنواع الهامة للحديد الخام:

جدول (1-1): يبين تركيب بعض الأنواع الهامة للحديد الخام

نوع الحديد	كربون %	سيليكون %	منجنيز %	كبريت % أقل من	فسفور %
حديد حامضي	4.4 – 4.15	2.25 – 0.7	2.5 0.5	0.045	0.1 – 0.04
حديد قاعدي	4.4 – 4.1	أقل من 1.5	0.4 - 0.2	0.35	0.9 – 0.11
حديد مسبك	4.5 – 3	4 – 0.5	1.5 0.2	0.1 - 0.01	2.0 – 0.1

وكما سبق الإشارة إليه يعد الكربون أهم العناصر المشابكة مع الحديد التي تتحكم إلى حد بعيد في خواصه الميكانيكية، والكربون قد يتشابك مع الحديد بأسلوب الاتحاد معه كيميائياً مكوناً مركب كربيد الحديد المعروف باسم السمنتايت Fe_3C وهو مركب صلد وقصيف (هش) وبالتالي فوجوده يكسب الحديد الخام هذه الخواص، وقد يوجد الكربون في صورة مختلفة فقط دون أن يتحد مع الحديد بل يوجد في صورة قشور جرافيتية، وبالتالي لا يكون هذا الحديد الأخير المحتوى على القشور الجرافيتية قصيفاً أو صلداً بالقدر الذي يتصف به النوع الأول، علاوة على أن الجرافيت المنفصل يكسب مقطع الحديد لوناً رمادياً، ولذلك يطلق على هذا الحديد الخام بالخام الرمادي Gray Pig Iron، بعكس النوع الأول من الخام المتحد به الكربون في صورة كربيد حديد فلونه أبيض ويسمى هذا الحديد بالفقل الأبيض White Pig Iron.

ويعتبر معدل التبريد ونسبة وجود كل من السيليكون و المنجنيز من أهم العوامل المتحكمة في تحديد نوع الحديد الفقل الناتج ما إذا كان أبيض أو رمادياً. فمعدل التبريد السريع تشجع الكربون على الاحتفاظ بذوبانه في الحديد، إذ إنه لا يجد فسحة من الوقت الكافي للانفصال أثناء التبريد. أما إذا كان التبريد بطيئاً فإن الحديد الناتج يكون رمادياً لانفصال الجرافيت. وزيادة نسبة السيليكون تشجع الانفصال الجرافيتي وتحويل الحديد إلى حديد رمادي (السيليكون طارد للكربون)، على عكس زيادة نسبة المنجنيز، إذ يترتب على ذلك زيادة قابلية الحديد لإذابة الكربون وتحويله إلى حديد أبيض، بجانب قابلية المنجنيز للاتحاد بالكبريت وانتزاعه من الحديد، وبالتالي الإقلال من ضرره على خواص الخام.

والفسفور والكبريت يعدان من العناصر أو الشوائب الضارة التي يجب التخلص من وجودها في كل أنواع الحديد. إلا أنه لسوء الحظ يصعب التخلص من هذه الشوائب، كما أن التخلص منها مكلف وغير اقتصادي، ولذلك يسمح بوجودها في أضيق الحدود بقدر الإمكان. والفسفور من العناصر التي يصعب التحكم فيها في الفرن العالي نظراً لتقارب قابلية اختزاله مع قابلية اختزال الحديد. ولذلك يترك أمر التخلص من معظم الفسفور لعمليات تنقية الحديد الخام وتحويله إلى زهر أو صلب. أما الكبريت فوجوده مرتبط بكل من المنجنيز والسيليكون، فهو يتحد مع المنجنيز مكوناً كبريتيد المنجنيز MnS، إلا أن التفاعلات التي تحدث داخل الفرن وتؤدي إلى نقص الكبريت تؤدي في العادة إلى زيادة السيليكون والعكس صحيح.

ثانياً – المنتجات الثانوية :

الخبث: الخبث رغم أنه منتج ثانوي إلا أنه يستخدم في عدة أغراض أهمها الرصف في بعض المصانع ومحطات السكك الحديد نظراً لتحمله التآكل لفترة طويلة، ولا يحتاج الرصف به للتجديد لفترة طويلة، بجانب مقدرته على العزل الحراري والصوتي. ويمكن تحويل الخبث إلى خيوط صناعية رفيعة وذلك بإمرار بخار الماء باندفاع على الخبث المنصهر أثناء إخراجه من الفرن، وتسمى هذه الخيوط بالصوف الخبثي Slag Wool، ومن أهم خواصه العزل الحراري ولذلك يستخدم في تبطين الأفران والثلاجات. ويمكن استقبال الخبث المنصهر من الفرن في بحيرة من الماء البارد فيبرد فجأة وينفتت لقصافته ثم يسحق ويصنع منه إسمنت خبثي Blast Furnace Cement وهو خليط بين مسحوق الخبث والإسمنت البورتلاندي المعتاد، وكذلك يصنع من هذا المسحوق طوب الخبث للمنشآت الهامة التي تتعرض للإجهادات وارتفاع درجة الحرارة إلى حدود متوسطة.

1-4-6: استخلاص الحديد باستخدام الطاقة الكهربائية:

تستخدم الطاقة الكهربائية في أفران الصهر للتسخين حتى الصهر، ولا يستخدم الفحم إلا للاختزال (للأوكسيد) والكربنة النهائية للحديد، وبذلك يمكن توفير نحو 60 % من الفحم وخاصة في المناطق التي لا يتوافر وجود الفحم فيها، ويستخدم في هذه الحالة فحم الخشب (عادة أنقى من فحم الكوك). والأفران الكهربائية المستخدمة في هذه الحالة لا تكون بضخامة وارتفاع الفرن العالي، بجانب تميز الأفران الكهربائية بإمكان التحكم في ارتفاع درجة الحرارة بها إلى الحدود المطلوبة، وبالتالي التخلص من معظم الشوائب التي يصعب التخلص منها في درجات الحرارة

المنخفضة (كما هو الحال في الفرن العالي). وتتولد الطاقة الحرارية اللازمة في هذه الأفران بأسلوب توليد القوس الكهربائي بين أقطاب كهربائية (أغلبها من الجرافيت) بالأسلوب المعروف بالقوس غير المباشر، أو بين الأقطاب الكهربائية وبين الشحنة بالأسلوب المباشر. ويحتاج الفرن الكهربائي لكل طن واحد من الحديد إلى نحو 350 كجم فحم للاختزال + 50 كجم فحم للكربنة + 2500 كيلوات ساعي للصهر كطاقة كهربائية. ويتضح من ذلك أن هذه العملية مكلفة (توليد الطاقة الحرارية من المصدر الكهربائي أغلى بكثير من المصدر الكيميائي بحرق الفحم).

1-4-7: استخلاص الحديد باستخدام الاحتراق المباشر بالأكسجين:

يستخدم الأكسجين مباشرة في عملية الاحتراق بدلاً من الهواء، وبذلك يمكن توفير $\frac{4}{5}$ (تقريباً) من حجم الهواء المستخدم، إذ أن النيتروجين المصاحب للأكسجين في الهواء الجوي لا يستفاد منه، ولكنه فقط يشغل حجماً غير مستغل في الفرن العالي. هذا بجانب ارتفاع درجة الحرارة باستخدام الأكسجين فقط ومن ثم إمكان حرق كثير من العناصر الضارة والتخلص منها في الفرن العالي. وفي الأفران التي تستخدم الأكسجين (أو خليط منه مع الهواء) يمكن الاستغناء عن مسخنات الهواء (بمشاكلها) وإمكان استخدام أنواع رخيصة من الفحم. إلا أن هذه الطريقة مازالت تتطور لتصبح اقتصادية فالتكاليف أعلى من إنتاج الحديد بالفرن العالي.

1-4-8: استخلاص الحديد في الفرن الدوار:

وفي هذه الطريقة يتم شحن الحديد الخفل مع مسحوق الفحم ومساعد الصهر في فرن أسطواني الشكل (مفرغ من الداخل) يدور حول محوره ببطء ويميل قليلاً على المستوى الأفقي، فتدخل الشحنة من الطرف المرتفع وتتدحرج أو تنساب الى الطرف المنخفض تدريجياً، ويدخل من هذا الطرف المنخفض اللهب الناتج من احتراق وقود غازي والمستخدم للتسخين، وتخرج غازات الاحتراق من الطرف العلوي أي تسرى الغازات في اتجاه مضاد لسريان الشحنة، فتسخن الشحنة بالتلامس مع الغازات وتنصهر (درجة الحرارة نحو 1300-1400مئوية) وهذه الطريقة ليست اقتصادية كالفرن العالي، وإنتاجها اليومي ضئيل لا يزيد عن 100 طن يومياً للفرن الواحد.

1-5: إنتاج الفولاذ (الصلب) :

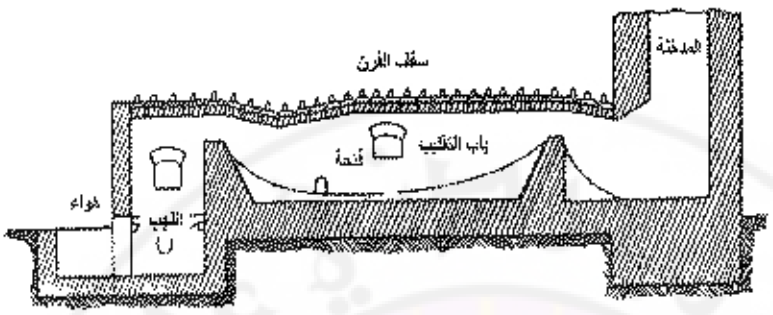
يمكن أن يتم التخلص من معظم الكربون والعناصر الأخرى بحرق أو بأكسدة هذه العناصر، وذلك لقابليتها للاتحاد بالأكسجين أكثر من الحديد، وهي على الترتيب السيليكون والمنجنيز

والكربون والفسفور. ويمكن أن يتم ذلك بتعرض الحديد الخام لجو غني بالأكسجين في درجة حرارة مرتفعة، فتحترق هذه العناصر وتترك الحديد فقيراً منه، فيصبح لدناً (طرياً) سهل التشكيل (قابلاً للطرق والسحب والضغط) ويطلق عليه الحديد المطروق Wrought iron أي فقير في الكربون، ويمكن زيادة نسبة الكربون حسب الحاجة وذلك لتحويله إلى الأنواع الأخرى من الصلب الأكثر صلادة كصلب العدد القاطعة، ويتم ذلك في بوائق خاصة. وفيما يلي استعراضاً موجزاً لطرق تنقية الحديد الخام وتحويله إلى صلب طروق أو صلد.

1-5-1: طريقة فرن التقليب لصناعة الصلب Puddle Furnace :

يوضح شكل (1-6) مقطعاً في فرن التقليب المستخدم في تحويل الحديد الخام المنصهر إلى حديد صلب طري مطاوع ولو أن استخدامه أصبح محدوداً. والمبدأ المستخدم في هذه الطريقة هو اختزال الكربون بالأكسجين الموجود بالحديد الغفل Iron ore أي بإضافة غفل الحديد الهيماتيت إلى الحديد الخام الخارج من الفرن العالي، فتوضع الشحنة (0.5 - 0.75 طن) المتكونة من كل من غفل الحديد والحديد الخام من فتحة جانبية بالفرن في حوض من الطوب الحراري المبطن بالطين الحراري (بطانة قاعدية في المعتاد)، ويسمى هذا الحوض المرقد (ويبرد بالماء من الخارج)، وتمرر غازات احتراق ساخنة فوق المرقد لصهر الشحنة، وهذه الغازات تتولد من احتراق وقود الفحم الحجري أو المازوت أو وقود غازي في غرفة احتراق تقع بجانب المرقد، ويقوم الوقود الغازي بمهمة التسخين حتى الانصهار، ثم تنصرف الغازات بعد ذلك عن طريق المدخنة للخارج. وبمجرد انصهار الشحنة يبدأ أكسجين الغفل في حرق معظم كربون الخام ويحوله إلى ثاني أكسيد الكربون ليخرج مع غازات الاحتراق، بجانب حرق بعض العناصر الأخرى وتحويلها إلى خبث يطفو على سطح المنصهر. وباستمرار التفاعل تتناقص نسبة الكربون، وتبعاً لذلك ترتفع درجة انصهار الحديد (درجة حرارة انصهار الحديد النقي تماماً تعادل 1539 مئوية، وأما الحديد المحتوي على 4,3 % فهي تعادل 1145 °م). أي أنه عند درجة حرارة معينة للفرن نجد أن درجة سيولة الحديد تقل بالاقتراب من درجة الحرارة بالفرن، وبالتالي يصعب تقليب الشحنة الأمر الذي يتطلب رفع درجة حرارة الفرن باستمرار ليسهل تقليب الشحنة. وتستغرق الشحنة الواحدة نحو ساعة ونصف في الفرن وتخرج في صورة كرات (كتل قوامها ثقيل أي عجينة في طرف سيخ ثم ترسل وهي ساخنة إلى عملية الدرفلة لتحويلها إلى منتجات نصف مصنعة كما سيرد إيضاحه فيما بعد). ومن صفات هذا النوع من الحديد المطاوع احتواؤه على

كميات لا بأس بها من الخبث بين حبيباته (معظم هذا الخبث أكسيد حديد وأكسيد كل من السيليكون والمنجنيز والفسفور).



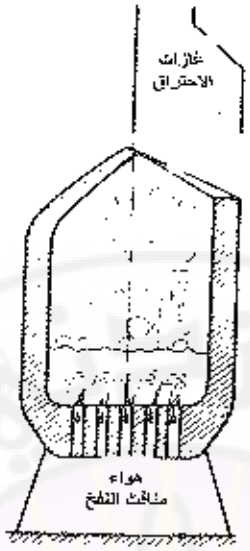
الشكل (1-6): فرن التقليب لصناعة الصلب.

1-5-2 طريقة المحولات Converters Method :

في هذا الأسلوب من التحويل يتم اختزال الكربون في خام الحديد باستخدام الهواء أو غاز الأكسجين النقي، وذلك بنفخها في خام الحديد المنصهر فيتولى الأكسجين حرق الكربون والعناصر الأخرى، وتتولد عن هذه العملية كمية كبيرة من الحرارة تكفي للمحافظة على درجة حرارة الشحنة أي لا يتم تبريدها بالنفخ بل يعوض التبريد بالحرارة المتولدة من الاحتراق، وقد تصل الحرارة إلى ارتفاع مفرط غير مرغوب فيه، لذلك تضاف نسبة محدودة (حوالي 10 % من خردة الحديد) حديد قديم متأكسد للإقلال من ارتفاع درجة الحرارة. وتنقسم طريقة المحولات إلى الطرق الثلاثة التالية:

1) طريقة محول بسمر الحامضي Bessemer Acidic Process:

هذا المحول عبارة عن إناء إجاصي الشكل، شكل (1-7) مصنوع من ألواح الصلب ذو فوهة معوجة. وقاع هذا المحول به فتحات يدخل منها هواء النفخ. وهذا المحول مبطن ببطانة حامضية (سيليكا). ومن أهم عيوبها عدم إمكان التخلص من المواد الحامضية كالفسفور والكبريت. ويسمى الصلب الناتج بصلب بسمر. وتبلغ سعة المحول نحو 40 طناً.



الشكل (1-7): محول بسمر لصناعة الصلب.

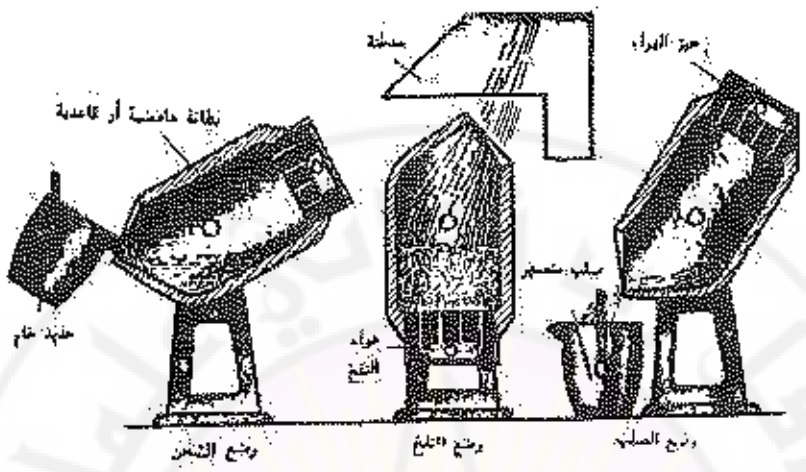
2) طريقة محول توماس القاعدي Thomas Basic Process :

وتسمى هذه الطريقة في الوقت نفسه بطريقة بسمر القاعدية لأن المحول المستخدم هو محول بسمر السابق نفسه. شكل (1-7) ولكن توماس قد طوره بحيث تكون بطانته قاعدية للتخلص من العناصر الحامضية كالفسفور والكبريت، ويسمى الصلب الناتج من هذا المحول بصلب توماس، ولهذا السبب تعتبر أكثر طرق المحولات شيوعاً في الوقت الحاضر، وتبلغ سعة المحول نحو 100 طن، ويختار لمحولات توماس في المعتاد حديد خام غني بالفسفور (2 % فسفور)، ويكون منصهراً في درجة حرارة تبلغ 1300 م. وترتفع درجة حرارته داخل المحول أثناء النفخ إلى 1600 م.

طريقة تشغيل المحول :

يوضع المحول في الوضع الأفقي (يدار حول محوره). شكل (1-8) حيث يشحن بالحديد الخام المنصهر (مع خردة الصلب) ثم يفتح صمام هواء النفخ فيدخل من الفتحات السفلي (في قاع المحول)، وتخرج من فوهة المحول مارة بالمنصهر، ثم يدار المحول في وضعه الرأسي فيمر

هواء النفخ خلال الحديد المنصهر، ويبدأ التفاعل بحرق الكربون والعناصر الأخرى، وكذلك التفاعل مع بطانة المحول حسب نوعها حامضية أو قاعدية وتكوين الخبث.



الشكل (1-8): أوضاع تشغيل محول بسمر أو توماس.

ويستمر هذا الوضع من حوالي 15 إلى 20 دقيقة تنتهي بانتهاء التفاعلات المطلوبة، ويعرف ذلك من ملاحظة لون اللهب الخارج من فوهة المحول، ويمكن خفض نسبة الكربون المطلوبة في الصلب الناتج بالتحكم في زمن التفاعل المذكور أي في زمن النفخ، وإذا أريد زيادة الكربون والمنجنيز يتم بإضافة سبيكة فيرو منجنيز (حديد + منجنيز) غنية بالكربون. وفي مرحلة النفخ هذه يحترق الكربون إلى أول أكسيد الكربون، وبعد إتمام احتراق الكربون يبدأ احتراق الفسفور إلى خامس أكسيد الفسفور، والكبريت إلى ثاني أكسيد الكبريت، والسيليكون إلى سيليكا، والمنجنيز إلى أكسيد المنجنيز، وتجميع هذه الأكاسيد يضاف مقدار من حجر الجير المحروق يعادل 15 % من الشحنة لتكوين الخبث. وتدوم مرحلة النفخ والتفاعلات ما يقرب من 20 دقيقة. وبعد الانتهاء من الاختزال يدار المحول ثانية للوضع الأول حيث تصب الشحنة في قوالب (سبكات Ingots) يتم دلفنتها فيما بعد. ومن أهم عيوب طرق المحولات (بسمر وتوماس) استخدامها الهواء كمؤكسد للحديد، وبالتالي سيحتوي الصلب على كمية من النيتروجين التي تسيء إلى خواص الصلب الناتج وبصفة خاصة القصافة على البارد أو حتى عند نحو 300 م وتسمى القصافة الزرقاء لأن الصلب يكون عندها لونه أزرق.

3) طريقة لينس دونافيتس Linz – Donavitz Process المعروف باسم LD :

وفي هذه الطريقة يستخدم محول كالسابق، ولكن يستعاض عن هواء النفخ بأكسجين نقي فقط عن طريق أنبوب نفخ من فوق سطح المنصهر. شكل (1-9) وبالتالي يمكن تجنب عيوب النفخ بالهواء وأهمها زيادة نسبة النيتروجين في الصلب. ولذلك يتصف الصلب الناتج من طريقة LD بنقاوة وجودة خواصه الميكانيكية. ويمكن في هذه الطريقة الاستعاضة عن المحولات من نوع بسمر وتوماس بمحول أفقي يتيح كشف مساحة سطحية أكبر للمنصهر، فيسهل على الأكسجين الاختزال في وقت أقصر وبطريقة أكفأ، ويسمى هذا المحول بالمحول الدوار لأنه يدور حول محوره أثناء العمل، ويدخل الأكسجين من أنبوب في الجانب (1) ثم يتفرع بعد ذلك إلى فرعين، الفرع الأول (2) ينفخ الأكسجين الابتدائي من تحت سطح المنصهر والفرع الثاني (3) ينفخ الأكسجين الثانوي فوق سطح المنصهر، وهناك فرن مناظر يستخدم نفخ الأكسجين على السطح. وبهذه الطريقة يمكن إنتاج أنواع من الصلب قليلة في عناصر الكربون والفسفور والكبريت والنيتروجين. ويمكن الاستفادة منه مباشرة بالدلفنة Rolling إلى منتجات نصف مصنعة وإعادة معالجته في أفران الصلب الأخرى مثل سيمنز مارتن Siemens Martin لإنتاج أنواع ذات جودة أعلى.

1-5-3 طريقة الفرن المفتوح أو سيمنز مارتن Siemens – Martin Process. شكل (1-10):

يتم في هذه الطريقة حرق العناصر المراد التخلص منها لتحويل الخام إلى صلب باستخدام الأكسجين الموجود في غازات الاحتراق (أكسجين وثاني أكسيد الكربون وبخار الماء) بجانب التأكسد الأساسي بالأكسجين، والذي يتم بين الحديد الخام المنصهر وما يضاف إليه من حديد غفل (تماماً كما يحدث في فرن التقليب).

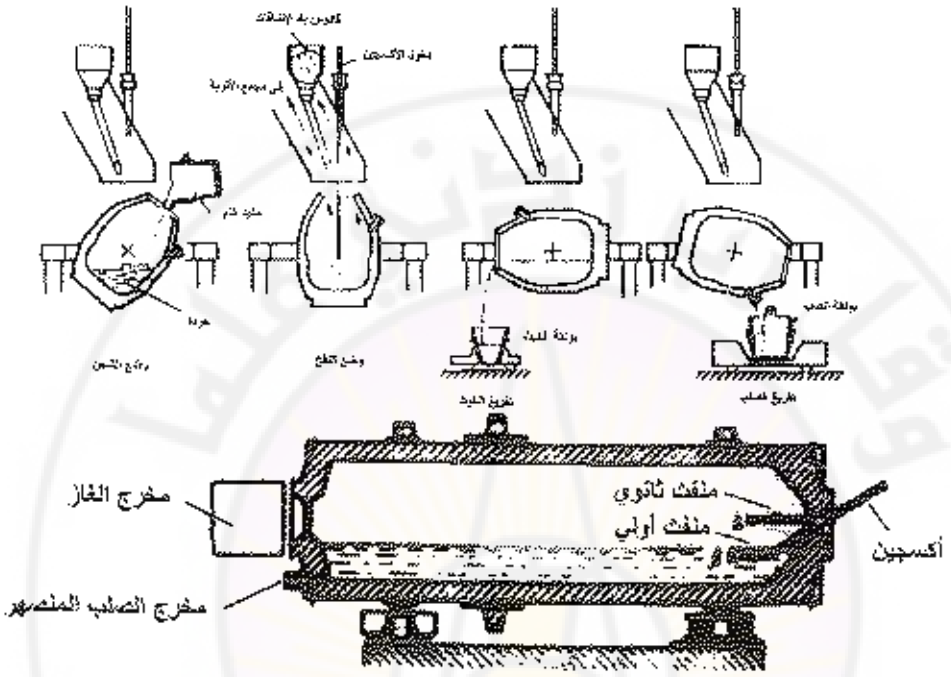
وتختلف هذه الطريقة عن طريقة فرن التقليب. ففي فرن التقليب يتم إنتاج الحديد دون صهره تماماً إذ يتم اختزاله وهو في حالة أقرب للتعجن (سائل قوامه ثقيل)، وبالتالي يصعب تخليصه من الخبث فيحتويه الحديد الناتج. بينما في فرن سيمنز مارتن يتم صهر الحديد الخام تماماً، ويضاف إليه الحديد الغفل، وتتم التنقية وهو في الحالة المنصهرة، وبالتالي يستطيع الصلب المنصهر التخلص من نواتج التفاعلات في صورة خبث ينفصل ويطفو على السطح. ولا تتولد الحرارة اللازمة في هذه العملية نتيجة لاحتراق العناصر المصاحبة للحديد كما هو الحال في

المحولات، إنما تتولد الحرارة في فرن سيمنز مارتن عن طريق وقود غازي (أو غير غازي مثل المازوت أو مسحوق الفحم) مع الهواء، فيدخل الهواء من مدخل خاص ويدخل الوقود من مدخل آخر مجاور (حيث يذرى المازوت وينفخ مسحوق الفحم). وبمرور الهواء على غرفة مبنية بالطوب الحراري، ومرور الوقود على غرفة مماثلة ومجاورة للأولى تسخن كلتاهما إلى درجة حرارة عالية. وعند خروج الهواء والوقود الساخنين من غرف التسخين يلتقيان عند حوض الصهر الموجود فيه الشحنة (المرقد) فيتم الاشتعال، وتتولى غازات الاحتراق الملتهبة تسخين وصهر الشحنة أثناء المرور فوقها، وتقوم بالاشتراك (بقدر ضئيل) في عملية أكسدة العناصر المصاحبة للحديد. ثم تخرج غازات الاحتراق (العادم) من الناحية الأخرى وهي ساخنة، وتمر قبل خروجها إلى المدخنة على حجرتين من الطوب الحراري (المبني بطريقة متشابكة وبينه فراغات تسمح بمرور الغازات الساخنة) وتتولى تسخين الغرفتين. ويتم هذا في دورة مقدارها 20 دقيقة، يتم بعدها عكس اتجاه دخول الوقود والهواء، فيدخلان من الغرف الأخيرة التي تم تسخينها بغازات الاحتراق، فيسخن الهواء والوقود ويتم اشتعالهما عند المرقد، ويتم تسخين الشحنة، ثم الخروج من حجرات الطوب الحراري الأولى التي كان يدخل منها الهواء والوقود في الدورة الأولى، وتكون قد بردت نسبياً بعد مرور الهواء والوقود فيها في الدورة الأولى.

وتقوم غازات الاحتراق بتسخين هذه الغرف قبل خروجها إلى المدخنة استعداداً لعكس دورة الهواء والوقود من الغرف الثانية إلى الأولى (أو من الغرف اليمنى إلى اليسرى). ويستمر التحول من الغرف اليسرى إلى اليمنى، أو من اليمنى إلى اليسرى، في كل دورة، وذلك عن طريق صمامات تحويل يمكن التحكم فيها أوتوماتيكياً أو يدوياً. ويبلغ إنتاج الفرن نحو 100 طن من الصلب الفقير في الكربون، ويمتد إنتاج الشحنة زمناً يصل إلى نحو 10 ساعات يمكن خفضها بنفخ الهواء أو الأكسجين لاستعجال احتراق العناصر المصاحبة للحديد. وقد تستخدم خردة الصلب (المتأكسدة) لتضاف إلى الحديد الخام، وذلك لأكسدة العناصر المصاحبة للحديد، وتتراوح نسبة الخردة من 6 % إلى 95 %.

وقد يبطن المرقد ببطانة حامضية، وفي هذه الحالة تسمى طريقة سيمنز مارتن الحامضية، وفيها لا يتم التفاعل مع العناصر الحامضية (بل القاعدية فقط)، وتقتصر هذه الطريقة على إنتاج أنواع الصلب التي تستخدم في قوالب السباكة. إلا أنه عند تغيير بطانة الفرن إلى بطانة قاعدية يمكن التخلص من معظم الفسفور والكبريت فتنتج أنواع عالية الجودة من الصلب، وتسمى هذه الطريقة بطريقة سيمنز مارتن القاعدية. وفي هذه الطريقة تستخدم عادة إضافات من الجير قبل

وضع الشحنة (لحماية بطانة المرقد عند سقوط الشحنة عليه) وأثناء الصهر للمساعدة على التخلص من الفسفور والكبريت.



الشكل (1-9): إنتاج الصلب بالنفخ بالأكسجين - طريقة لينس و دونافيتش LD.

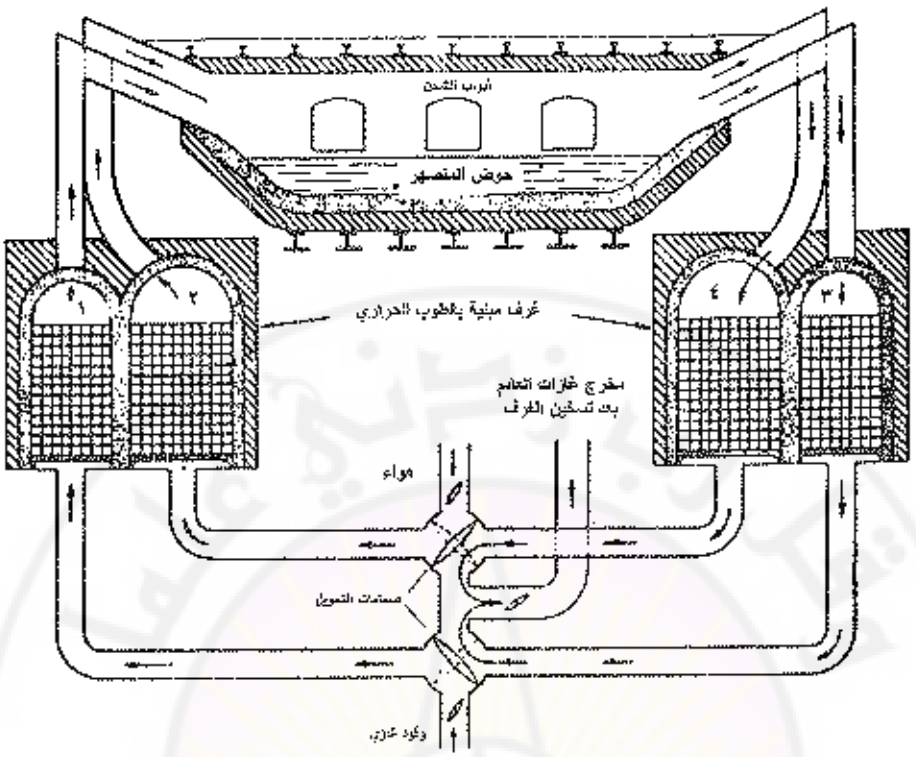
ومن أهم مميزات طريقة سيمنز ماربن بصفة عامة (والتي تتفوق فيها على الطرق الأخرى السابقة، أو بصفة عامة على كل أفران إنتاج الصلب التي تستخدم الوقود الكيميائي أي الاحتراق بالتفاعل الكيميائي) هي:

1 – إنتاجها غزير.

2 – إنتاج أنواع نقية من الصلب.

3 – إنتاج أنواع جديدة من خلائط الصلب (سبائك الصلب).

4 – اقتصادية في الإنتاج.



الشكل (1-10): فرن سيمنز مارتن لصناعة الصلب.

فمثلاً يمكن إضافة سبائك الفيرو منجنيز قبل إخراج الشحنة من الفرن لزيادة المنجنيز (والحصول على الصلب المنجنيزي المستخدم في قضبان وعجلات السكك الحديدية)، وكذلك إمكانية الحصول على صلب مرتفع في نسبة الكربون مع خلوه من العناصر الضارة الأخرى مثل صلب العدد القاطعة بصفة عامة. ويمكن إنتاج أنواع الصلب المطري الفقيرة جداً في الكربون (يكاد يكون خالياً منه) كالأنواع المستخدمة في صناعة ألواح المحولات والمحركات ومولدات التيار الكهربائي (وهذه الألواح يجب أن تتصف بسهولة مغنطتها وسهولة فقدها للمغنطة وتعرف باسم Armco Iron). ويمكن من ناحية أخرى اعتبار هذا الفرن مرحلة أولى لإنتاج أنواع صلب عالية الجودة ويتم إنتاجها في مراحل لاحقة في الأفران الكهربائية بأنواعها.

1-5-4: الأفران الكهربائية لإنتاج الصلب Electric Furnace for Steel Production:

يتم في هذه الطريقة التسخين بالطاقة الكهربائية عن طريق تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية بالأساليب المعروفة. ويوضح الشكل (3-10) أهم هذه الأنواع وهي:

1 – القوس الكهربائي Electric arc

2 – المقاومة الكهربائية Electric resistance

3 – التيارات التأثيرية أو الحثية Induction furnaces.

1) أفران القوس الكهربائي – وتنقسم إلى ثلاثة أنواع:

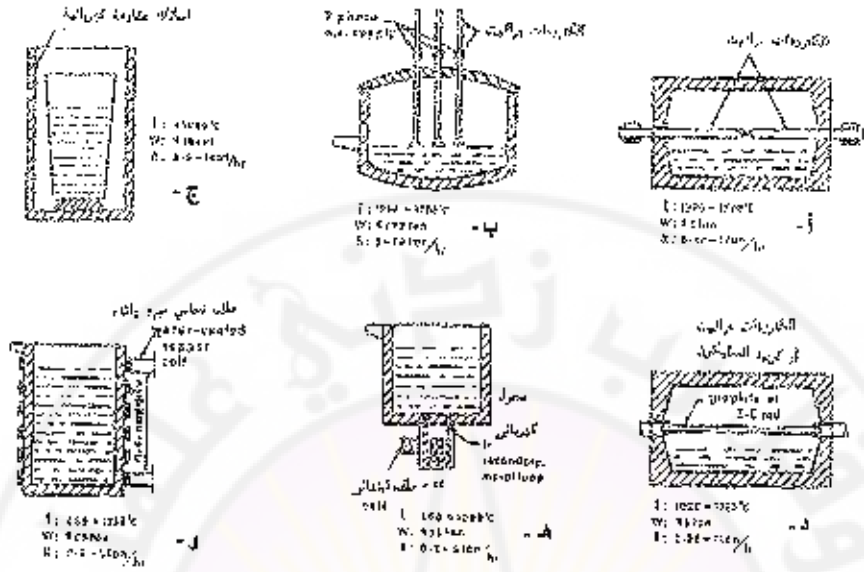
أ – **فرن قوس كهربائي غير مباشر:** كما في شكل (1-11أ) وفيه تتولد الحرارة عن طريق توليد قوس كهربائي بين قطبين من الكربون (الجرافيت) متصلين بمصدر تيار كهربائي متردد (عن طريق محول تخفيض الجهد الكهربائي Transformer)، وتنتقل الحرارة إلى الشحنة بالإشعاع.

ب– **فرن القوس الكهربائي المباشر:** كما في شكل (1-11ب) وشكل (1-12)، وفيه تتولد الحرارة عن طريق قوس كهربائي بين أقطاب كهربائية من جهة وبين الشحنة مباشرة من جهة أخرى، وبذلك تتولد الحرارة في الشحنة مباشرة.

ج – **فرن القوس الكهربائي المغمور:** وفيه تتولد الحرارة عن طريق توليد قوس كهربائي بين أقطاب كهربائية من جهة وبين الشحنة التي هي في هذه الحالة ليست حديداً خاماً بل حديداً غفلاً (المستخرج من باطن الأرض) فيكون القوس مغموراً تحت الشحنة.

2) أفران المقاومة الكهربائية:

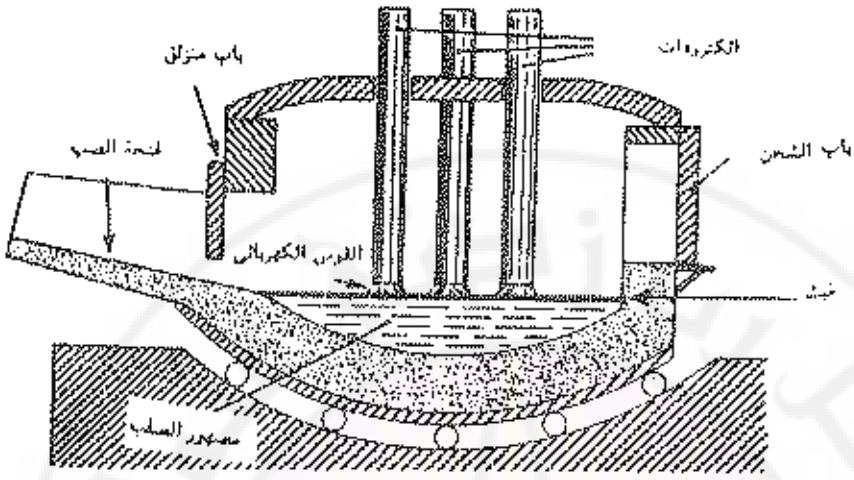
كما هو مبين في شكل (1-11 ج & د). وفي هذه الحالة تتولد الحرارة بسبب مرور تيار كهربائي عبر الشحنة المنصهرة ذاتها، وبقدر مقاومتها لمرور التيار تتحول الطاقة الكهربائية إلى حرارة. ويقتصر استخدام هذا الفرن على السبائك وكذلك المعادن الخفيفة مثل الألمنيوم (وقد ورد ذكره هنا بمناسبة ذكر طرق التسخين الكهربائي في الصناعة عامة).



الشكل (1-11): أفران صهر الصلب الكهربائية.

3) أفران التيارات الحثية – وتنقسم إلي نوعين:

3- أ) أفران التيارات الحثية منخفضة التردد، كما في شكل (1-11 هـ & و)، وشكل (1-13). وفي هذه الحالة يوصل مصدر الطاقة الكهربائية (محول للتيار) إلي أطراف الملف الابتدائي لمحول آخر كبير. وتمثل بوتقة الصهر في هذه الحالة الملف الثانوي لهذا المحول الكبير، وعن طريق توليد التيارات الحثية في قلب البوتقة تتحول هذه التيارات إلي حرارة مباشرة في الشحنة، هذا بجانب قيام هذه التيارات الحثية (تيارات دوامية أو إعصارية) بتقليب الشحنة في كل أرجائها تقليباً دوامياً يساعد على تجانسها، ويستخدم في هذا الفرن تيار كهربائي عادي التردد 50 هرتز أو بتردد أقل من ذلك حتى 15 هرتز (هرتز = ذبذبة في الثانية).



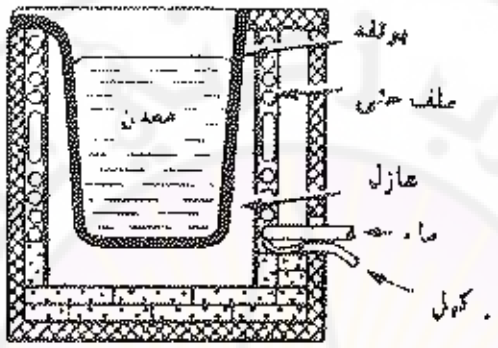
الشكل (1-12): فرن صهر الصلب بالقوس الكهربائي.

3- ب) أفران التيارات العكسية متوسطة التردد كما في شكل (1-13). وهي تشبه الأفران السابقة. وفيها يحول التيار الكهربائي المعتاد إلى تيار ذي تردد عالٍ يفوق 50 هرتز وقد يصل إلى 10000 هرتز في الترددات المتوسطة وما فوق ذلك إلى ذحو مليون هرتز في الترددات العالية. وتستخدم مواسير النحاس النقي المبردة بالماء الجاري لعمل ملفات التيار الابتدائي كما في شكل (1-13).

هذا وتعتمد كل الطرق الكهربائيه في تنقيتها للحديد على كونها مصدراً نظيفاً للطاقة لا يؤثر على الشحنة عكس ما تفعل الأفران التي تعمل بالوقود. أما عملية التنقية في الأفران الكهربائية فتتم إما بإضافة حديد الخردة (المتأكسد) الذي يقوم بأكسدة العناصر غير المرغوب فيها والمصاحبة للشحنة أو بإتمام تفاعل مؤكسد للعناصر الموجودة بالحديد بين شحنه الحديد والخبث الذي يطفو فوقه والذي يمكن التحكم في تكوينه، وبالتالي السيطرة على نوع التفاعل ومداه للتحكم في جوده الصلب الناتج.

وقد تستخدم الأفران الكهربائية بحيث تكون مكملة لأفران سيمنز مارتن التي يتم فيها أساساً التخلص من الفسفور، فيستكمل اختزال العناصر الأخرى في الأفران الكهربائية ويعرف هذا الأسلوب بالأسلوب المزدوج في تنقية الحديد الصلب Duplexing، والأفران الكهربائية يمكن أن

تبطن ببطانة حامضية أو قاعدية حسب العناصر المراد التخلص منها بالتفاعل مع هذه البطانة، هذا بجانب التفاعل الحادث مع الخبث الطافي فوق الشحنة المنصهرة. الذي يمكن التحكم في نوعيته بإضافة الجير والفلورسبار والرمل وفحم الكوك على شحنة الحديد، أو بعد انصهار الشحنة في الفرن، وهذه الإضافات تكّون مع أكسيد الحديد خبثاً حامضياً أو قاعدياً حسب تكوين الإضافات.



الشكل (1-13): فرن صهر الصلب بتيارات الحث الكهربائي.

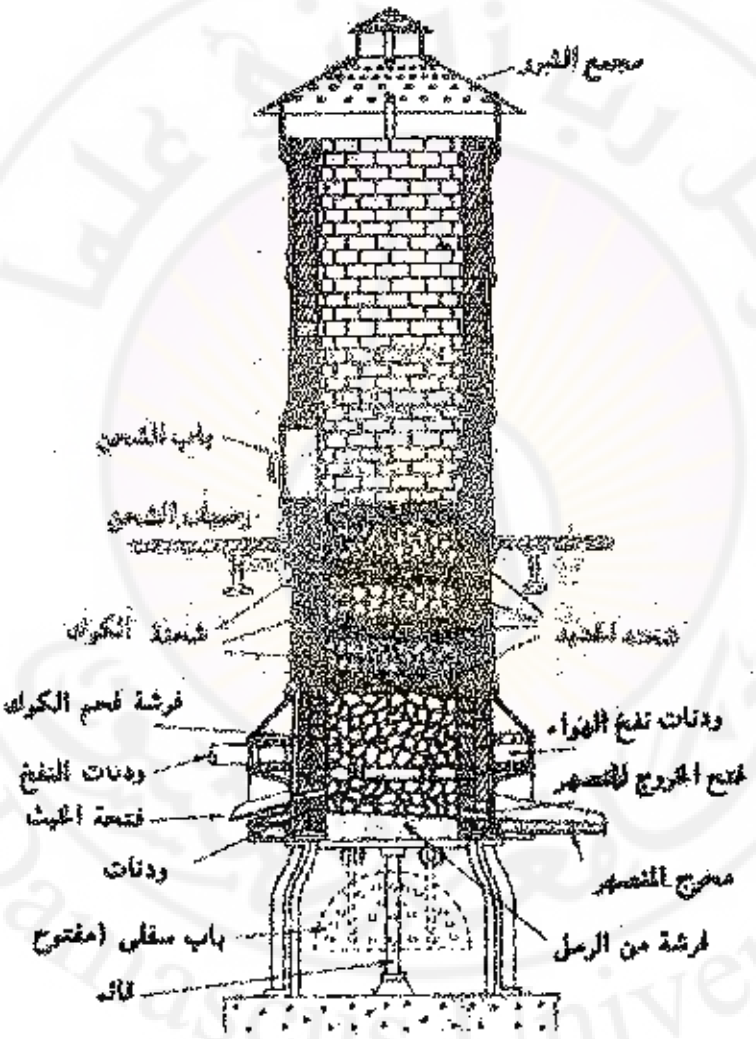
1-6 إنتاج حديد الصب (الفونت أو حديد الزهر) Production of Cast Iron:

لا يختلف تركيب حديد الزهر (الصب) عن حديد الصلب إلا في نسبة الكربون فيه بصفة أساسية والعناصر الأخرى بصفة ثانوية، فحديد الزهر تصل نسبة الكربون فيه إلى حدود تقع بين 2.5% -3.75% وترتفع نسب العناصر الأخرى وهي السيليكون والمنجنيز والفسفور والكبريت بنسب مختلفة. ويستخدم إنتاج حديد الزهر في صناعة المسبوكات التي تكّون فرش وجسم الماكينات والآلات أساساً. وتستخدم أساليب مشابهة لصناعة الصلب، وتعمل بأسلوب يشبه كثيراً أسلوب الفرن العالي، وتسمي هذه الأفران بأفران الدست cupola furnace شكل (1-14). ولا يختلف عنه إلا في كون بنائه أسطوانياً بخلاف الفرن العالي. وتتشابه التفاعلات الكيميائية لتلك التي يمر بها الحديد الخام في الفرن العالي.

وينقسم حديد الزهر إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

1) حديد زهر أبيض White cast iron :

وهو حديد يذوب فيه الكربون الموجود ذوباناً تاماً بالاتحاد مع الحديد مكوناً المركب المعروف باسم كربيد الحديد أو السيمنتايت Cementite or Iron Carbide (Fe_3C)، وهو قصيف جداً وصلد ويندر استخدامه إلا في الحالات التي تتطلب صلادة مفرطة ومقاومة عالية للبري.



الشكل (1-14): فرن الدست لمصهر حديد الزهر.

2) حديد زهر رمادي Gray cast iron:

ويكون الكربون الموجود في الحديد منفصلاً بصفه جزئية، ويكون انفصال الكربون في صورة قشور جرافيتية رقيقة موزعة في داخل المعدن، وبالتالي تقل صلادة حديد الزهر الرمادي عن حديد الزهر الأبيض المميز، بجانب إكساب الحديد خاصية خمد الاهتزازات، الأمر الذي يفيد في صناعه فرش الماكينات المعرضة للاهتزازات دائماً مثل المخارط وغيرها من ماكينات التشغيل ومحركات الديزل وخلافه.

3) حديد الزهر الطري Malleable cast iron:

وهو في الحقيقة أحد أنواع الحديد الرمادي، إلا أنه يختلف عنه في شكل الجرافيت المنفصل، فالجرافيت المنفصل في الحديد الطري يكون علي شكل تجمعات متكاملة أو قريبة للتكور، بعكس حديد الزهر الرمادي فالجرافيت فيه يكون منفصلاً علي شكل قشور حاده الأطراف. وينتج حديد الزهر الطري بعملية تطرية حرارية بتسخين حديد الزهر الرمادي إلي درجة حرارة تبلغ نحو 700 درجة مئوية. لعدة أيام فتتكور قشور الجرافيت ويصبح الحديد طرياً. ويصنع منه مواسير المياه والصرف المعروفة، ولا يفهم من معنى الحديد الطري أنه يمكن تشكيله بالضغط أو بالطرق أو بالسحب علي البارد أو علي الساخن، فهو ما زال يتصف بقصافة تمنع تشكيله بهذه الطرق. وحديد الزهر بكل أنواعه لا يمكن تشكيله لدناً ويصعب لحامه، لذلك يقتصر تشكيله علي طرق السباكة، أي بصهره وصبه في قوالب بالأشكال المطلوبة وتركه يتجمد، ولذلك يسمي حديد الصب. ويمكن بعد صبه تشغيل أسطحه بالخراطة أو القشط أو التفريز أو التجليخ.

2- المواد غير الحديدية:

وتلي مجموعة المواد الحديدية في الأهمية، وتشمل من الناحية الأساسية على النحاس وسبائكه والألمنيوم وسبائكه.

2-1 النحاس وسبائكه

والنحاس من أكثر المعادن غير الحديدية انتشاراً في الصناعة، ويستعمل النحاس في حالته النقية في الصناعات الكهربائية كموصل جيد للتيار - وينقص وجود الشوائب من توصيل النحاس للكهرباء، وتجهز المصنوعات النحاسية مثل الأسلاك والخوص والصفائح والرقائق بالدلفنة والسحب والكبس، وعند تجهيز هذه الخامات يحدث للخامة تشغيل على البارد يرفع من صلادة ومتانة النحاس، ويبلغ الوزن النوعي للنحاس 8.9 جم/سم^3 ودرجة انصهاره 1083 م.

2-1-1: النحاس الأصفر:

النحاس الأصفر عبارة عن مجموعة السبائك بين كل من النحاس أساسا والزنك كما تضاف إليه أحيانا عناصر أخرى لإكسابه خواصاً معينة مثل القصدير والرصاص والنيكل، ويحتوي سبيكة النحاس الأصفر على نسبة من الزنك تصل إلى 45% وكلما قلت نسبة النحاس في سبيكة النحاس الأصفر كلما كان لونه أصفر يشبه لون التربة الصفراء، وكلما زادت نسبة النحاس اقترب لون النحاس الأصفر من اللون الأصفر الذهبي، ويتمتع النحاس الأصفر بمقاومة التآكل بفعل العوامل الجوية كما أنه سهل اللحام ولا يتأثر بالصدأ، ويحول النحاس الأصفر المصبوب سابقا على شكل كتل إلى رقائق أو شرائط أو أنابيب أو قضبان بالتشكيل على البارد أو الساخن بواسطة السحب أو الكبس. وتصنع الصمامات والصنابير والأنابيب من النحاس الأصفر لسهولة صبه ومقاومته للتآكل.

2-1-2: البرونز:

تسمى سبائك النحاس مع أي معدن آخر عدا الزنك بالبرونز ويسمى البرونز باسم العنصر المتسابك مع النحاس. والبرونز القصديري يحتوي على نسبة من القصدير تتدرج ولا تزيد عن 22% وهو مرن وذو صلابة جيدة ويمكن سباكته، كما أنه جيد التشغيل، وإذا أضيف إلى البرونز القصديري كمية من الفسفور سمي بالبرونز الفسفوري ولون البرونز يتراوح بين الأحمر والذهبي والأصفر الذهبي.

ويتألف برونز الألمنيوم من النحاس مع نسبة من الألمنيوم تتراوح من 4 إلى 20% ويمتاز بمقاومته للتآكل والبري بالاحتكاك الميكانيكي، ويعرف من لونه الذي يشبه النحاس الأصفر، ويصعب تشكيله بالصب إلا أنه يمكن تغيير شكله بالتشكيل على البارد أو الساخن بسهولة. ويتكون برونز الرصاص من سبيكة بها نحو 25% رصاص والباقي نحاس ويتميز بصفات تزليقية جيدة إلا أن مقاومته للإجهادات ضئيلة. ويستعمل هذا البرونز في صناعة محامل (كراسي) المحاور.

2-1-3: السبيكة الحمراء

السبيكة الحمراء هي خليط من القصدير والزنك مع نسبة عالية من النحاس ذات مناعة جيدة ضد الصدأ والتآكل، كما أنه يمكن صبها وتشغيلها بشكل جيد وتصنع منها الأدوات المنزلية والأنابيب ومحامل المحاور الإنزلاقية.

2-2: الألمنيوم وسبائكه

الألمنيوم معدن خفيف الوزن إذ يبلغ وزنه 2.7 جم/سم^3 لذن وجيد التوصيل للحرارة والكهرباء ينصهر عند درجة 660 درجة مئوية ذو لون أبيض فضي وسبائك الألمنيوم كثيرة ومتعددة ولكنها تنقسم بصفة عامة إلى نوعين أساسيين:

النوع الأول: سبائك الألمنيوم القابلة للصب وتستعمل لصناعة الأجزاء الهامة من المحركات والأجزاء التي تتطلب مقاومة عالية للتآكل والأجزاء التي تتعرض للصدمات.

والنوع الثاني: هو سبائك الألمنيوم القابلة للتشكيل وتستعمل في صناعة الرقائق والأسلاك والأعمدة.

ومن سبائك الألمنيوم الهامة الدورالومين وهو عبارة عن سبيكة مكونة من 94.5% ألمنيوم و 4.5 % نحاس و0.5 % منجنيز و 0.5 % مغنسيوم وتتحمل هذه السبيكة شداً مقداره 450 نيوتن/مم^2 بعد تصليدها حرارياً، وهي ذات صلابة عالية (115 برنل) إلا أنها صعبة اللحام، كذلك تعتبر سبائك الألمنيوم مع السليكون أكثر سبائك الألمنيوم شيوعاً، ويتراوح السليكون بها بين 4% ، 25% وتصنع منها الأدوات المنزلية وأجزاء الماكينات بإضافة بعض العناصر الأخرى.

3- المواد غير المعدنية:

تنقسم المواد غير المعدنية إلى مواد عضوية ومواد غير عضوية ومن المواد العضوية الأخشاب واللدائن والمطاط والورق ومادة الطلاء والجلد. ومن المواد غير العضوية الزجاج والسيليكات والاسبستوس والميكا والمواد السيراميكية والجرافيت.....

3-1: اللدائن (البلاستيك):

اللدائن مواد من أصل عضوي، ومنها الأنواع التي تتحول عند تسخينها إلى الحالة اللدنة، وتتخذ عند الضغط عليها الأشكال للأجزاء المراد صنعها، ومنها الأنواع التي تلين بالحرارة بل تقاوم الحرارة حتى تتفحم، وتلعب الخواص الطبيعية والكيميائية والميكانيكية للدائن دوراً كبيراً عند صناعتها، وأهم هذه الخواص الوزن النوعي وتحملها (بعض أنواعها) للحرارة وانكماشها وقابليتها للانسياب وسرعة تجمدها ونسبة الرطوبة ومقاومتها النوعية للصدمات وعازليتها للكهرباء. وتعد

اللدائن من المواد الخفيفة، فالوزن النوعي للأنواع المختلفة يتراوح من 5% إلى 2 جم/سم^3 لهذا فاللدائن تستعمل على نطاق واسع لتخفيف وزن المصنوعات. ويمكن تشغيل اللدائن بإزالة الجذاذة (الرايش) ومع ذلك، فعند تشغيل اللدائن يكون تآكل الحد القاطع أكبر منه عند تشغيل الصلب، ويفسر هذا بعدم تجانس اللدائن وعدم تساوي صلادة مركباتها المختلفة ورداءة توصيلها للحرارة.

3-2: الخشب:

من المعروف أن الأشجار هي مصدر الأنواع المختلفة من الأخشاب، ويتم قطع الأخشاب من الغابات وإزالة فروعها التي تحتوي على الأوراق لتبقي الجذوع التي يجري معالجتها للحصول على الأخشاب بصورتها الصالحة للاستخدامات الصناعية إلا أن الأخشاب التي تم الحصول عليها وتجهيزها تحتوي على نسبة عالية من الرطوبة تجعلها غير صالحة للاستعمال المباشر، بل يتعين تجفيفها لعدة أسباب أهمها:

- زيادة مقاومة الاجهادات.
- منع الانكماش أو الالتواء للأجزاء التي سيتم تصنيعها من الأخشاب.
- تقليل احتمالات التعفن ومهاجمة الحشرات.
- تقليل الوزن لتسهيل عمليات النقل.
- جعلها قابلة للطلاء والمعالجة لأن الطلاءات لا تلتصق بالأجزاء المبللة أو الرطبة.

والخشب أنواعه كثيرة وصفاته كثيرة تصلح للكثير من الأغراض. وتدخل الأخشاب الصناعية كمنافس هام للأخشاب الطبيعية التي تسبب ندرتها في ارتفاع أسعارها. وتصنع الأخشاب الصناعية من مؤلفات النشارة أو من بقايا القش وبعض مخلفات الصناعات الكيميائية كمواد رابطة.

3-3: المواد السيراميكية Ceramic Materials:

تسمى أيضاً بالمواد المتصلدة حرارياً أو المواد الفخارية أو الخزفية. يعود الاختلاف في التسمية إلى الترجمة المصطلحة لكلمة ceramics الأجنبية. هذه المواد هي عبارة عن أكاسيد لمعادن، حيث تعتبر المواد الزجاجية حالة خاصة من المواد السيراميكية.

تم اشتقاق التسمية الأجنبية لهذه المواد من التسمية اليونانية κεραμικός (لفظ keramikos) وهي تشمل المواد اللاعضوية اللامعدنية والمتشكلة بفعل الحرارة.

وتعتبر صناعة السيراميك واحدة من أهم الصناعات في الوطن العربي. و تضم أنواع مختلفة من المنتجات مثل.

- المنتجات البيضاء: هي المنتجات السيراميكية ذات اللون الأبيض أو العاجي أو الرمادي الفاتح بعد إجراء عملية الحرق. ويمكن تقسيم المنتجات البيضاء إلى الخزف والصيني والبورسلين والمنتجات الزجاجية والمنتجات ذات التطبيقات الفنية.
- منتجات مواد البناء مثل طوب البناء وطوب الواجهات ومواسير الصرف الصحي وبلاط مجاري الصرف.
- الحراريات مثل الطوب (الآجر) الحراري طوب السليكا وطوب الكروم وطوب الماغنيسيوم وطوب الكروم والماغنيسيوم وطوب كربيد السليكون وطوب الزركونيوم وطوب سليكات الألمنيوم وطوب أكسيد الألمنيوم.
- المنتجات السيراميكية الخاصة. شكل(1-15).

المواد الخام الأساسية المستخدمة في صناعة السيراميك هي عبارة عن مواد لاعضوية تشمل العناصر المعدنية واللامعدنية تلتصق كيميائيا بعملية التلبيد لتكون مركباً بلورياً أو لا بلورياً أو مدمجاً من الاثنين، وهذه المواد الخام هي الرمل، الفلدسبار، الطين الأسود، الطين الأبيض، الكاولين، التلك بالإضافة إلى بعض المواد الأخرى التي تستخدم في بعض العمليات مثل هيدروكسيد الصوديوم، سليكات الصوديوم، كربونات الكالسيوم، مواد ملونة، والمزلقات. وتستخدم المواد المكونة للطبقة الزجاجية (الجليز) لتغطية أسطح المنتجات، ويتم تحضير المادة الزجاجية (الجليز) باستخدام الفلسبار ($6Na_2O, SiO_2, Al_2O_3$) وهيدروكسيد الصوديوم، ومواد رابطة، والدلوميت، والماء. وتستخدم بعض الكيماويات في المعامل لمراقبة الجودة وإجراء التحاليل. ويستخدم الغاز الطبيعي والمازوت كوقود للأفران.

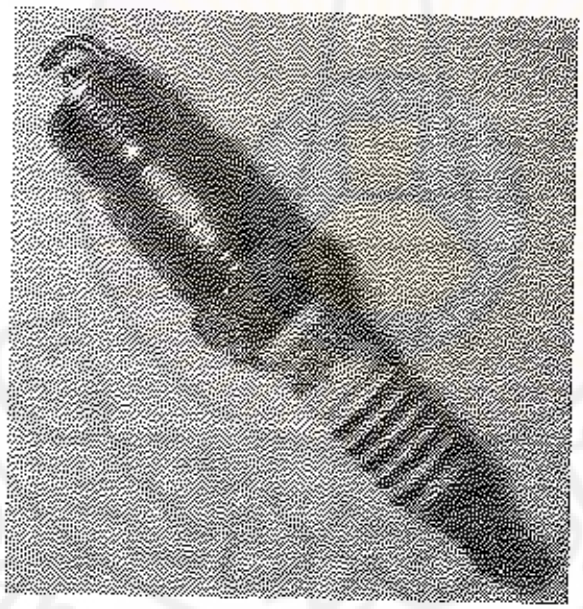
تبعاً للتصنيف العلمي فإن المواد السيراميكية تقسم إلى:

- المواد الإنشائية: كالقرميد والآجر
- مواد العزل الحراري
- البورسلين: بأنواعه
- المواد التقنية: ولها تسميات عدة منها السيراميك الهندسي والسيراميك الصناعي والسيراميك المتقدم. تنقسم هذه المواد بدورها إلى:
- الأكاسيد المعدنية: كالألومينا والزيركونيا.

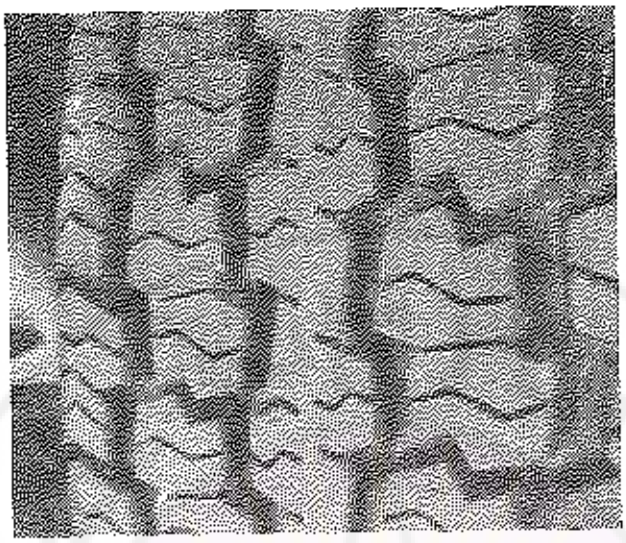
- الأكاسيد اللافلزية: :الكربيدات والنترات والسيليكات وأكاسيد البور.
- المواد السيراميكية المركبة.

3-4: المواد المركبة COMPOSITE MATERIALS:

المواد المركبة هي عبارة عن مزيج من مادتين أو أكثر ، غالبا هذه المكونات لاتندمج مع بعضها ويمكن تمييزها فيزيائيا بالحدود الفاصلة بينها. وعادة المواد المركبة تتكون من مادة أرضية Matrix ذات خاصية لدنة، ومادة أو مواد تقوية تدعى الألياف Fibers تكون هذه الألياف على شكل شعيرات ليفية متناهية الصغر أو بشكل جزيئات يتم توزيعها في أرضية المادة اللدنة وفق تقنية معينة على شكل طبقات متتالية تكسب المادة مواصفات جيدة تمتاز عن أي من المركبين منفصلين (الألياف ومادة الأرضية). وخير مثال على المواد المركبة: الألياف الزجاجية، الخرسانة، إطارات السيارات ... شكل(1-16).



الشكل (1-15): العازل الخزفي في شموع الاحتراق يصنع بشكل أساسي من Al_2O_3 وهو عبارة عن مركب من مواد معدنية ولا معدنية.



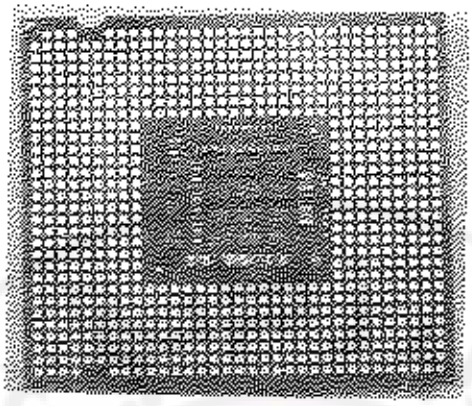
الشكل (1-16): إطارات السيارات أحد الأمثلة عن الاستخدامات الصناعية للمواد المركبة.

3-5: المواد الإلكترونية Electronic Materials:

ليست من حيث الحجم نوعاً رئيسياً من المواد لكنها من حيث التقنية مواد ذات أهمية كبيرة بين المواد الهندسية المتقدمة. إن المادة الإلكترونية الأكثر أهمية هي السيليكون النقي الذي يمكن تعديله بطرق عدة للحصول على خصائص كهربائية مختلفة. فعلى سبيل المثال: أجهزة الدوائر الكهربائية الميكروية التي أثبت فعاليتها في اتصالات الأقمار الصناعية، الحاسبات المتقدمة، الحاسبات المحمولة يدوياً، الساعات الرقمية، وبلعام الروبوتات. ويبين الشكل(1-17) وحدة المعالجة بالكمبيوترات التي تعد عنصراً أساسياً في معالجة البيانات وعمل الحواسيب الآلية.

3-6: المواد الحيوية Biomaterials:

تستخدم الزرع في جسم الإنسان كبدائل عن الأعضاء المتضررة بالجسم البشري، هذه المواد يجب ألا تنتج مواداً سامة ويجب أن تكون متوافقة مع أنسجة الجسم أي بمعنى آخر يجب أن لا تسبب ردود أفعال حيوية مضادة، كل المواد أعلاه، (معادن، سيراميك، مركبات كيميائية، بوليميرات، مواد مركبة، مواد الكترونية) يمكن أن تستخدم كمواد حيوية. شكل (1-18).



الشكل (**1-17**): وحدة المعالجة بالحاسب الالي.



الشكل (**1-18**): يبين مفصل ركبة رجل مصنعة بشكل كامل.

الفصل الثاني

أسس نظرية الخلائط (السبائك) المعدنية

Theory Principals Of Metallic Alloys

2-1: مقدمة:

كما نعلم فإن الخواص الطبيعية العامة لمعظم المعادن النقية تكون غير مناسبة للاستخدامات الصناعية والمعملية، لهذا فإنه غالباً ما يتم استخدام خليط من عناصر معدنية ولا معدنية، أو خليط من معادن مختلفة تعطي تركيبة تسمى سبيكة أو خليطة (معدنية أولا معدنية)، تمتاز هذه السبائك بخصائص هندسية تميزها عن المعادن النقية كالصلادة ومقاومة التآكل والمتانة ومقاومة درجات الحرارة المرتفعة، وارتفاع درجة حرارة الانصهار، ... الخ.

قد تكون السبيكة عبارة عن تركيبة من عنصرين تسمى عندها خليطة ثنائية، وقد تكون من ثلاثة عناصر عندها تسمى بالتركيبة السبائكية الثلاثية أو أكثر من ثلاثة عناصر ....

وعادة يكون العنصر الأساسي في الخلائط المعدنية عبارة عن معدن بينما تكون العناصر الأخرى معادن أو أشباه معادن أو عناصر لا معدنية.

سنكتفي بهذا الفصل بدراسة الخلائط الثلاثية وكيفية رسم منحنيات اتزانها الحراري نظراً لدراسة الخلائط الثنائية في سنوات سابقة.

2-2: تكوين الخلائط المعدنية والخواص العامة لهذه الخلائط:

في أكثر الحالات تتكون السبيكة المعدنية من ذوبان معدنين أو أكثر مع بعضها البعض بحيث يكسبان هذه الخليطة القوية والخواص الميكانيكية المطلوبة.

إن الإجراء العام في صنع سبيكة ما هو أن يتم إذابة المعدن ذي درجة الانصهار الأعلى أولا وبعد ذلك تذويب المعدن ذي درجة الانصهار الأخفض ضمنه، يحرك الخليط لكي يتشكل سائل متجانس البنية. نوع التجانس في التركيب الناتج يعتمد بشكل كبير على الخواص الفيزيائية والكيميائية لكلا المعدنين وجزئيا على مواقعهم النسبية في التصنيف الدوري. إذا كانا قريبين جدا من بعضهما البعض في الجدول الدوري فمن المحتمل — ذلك ليس حتميا — أنهما سيشكلان

البلورات المختلطة (بلور صلب) التي يكون فيها ذرات كل معدن قد وضعت بشكل عشوائي في نمط بلوري مشترك. هذا إلى حد ما مثل التأثير الذي سينتج إذا استعمل كلٌ من الآجر الأحمر والأزرق عشوائيا في بناء جدار ما، فإذا كان الطوب الأحمر والأزرق ذا حجمين متساويين تقريبا سيتشكل لدينا حائط قوي ومنتظم إلى حد ما بالرغم من أنه بدت غير مرتبة نوعا ما بسبب عدم انتظام توضع الطوب الملون المختلف.

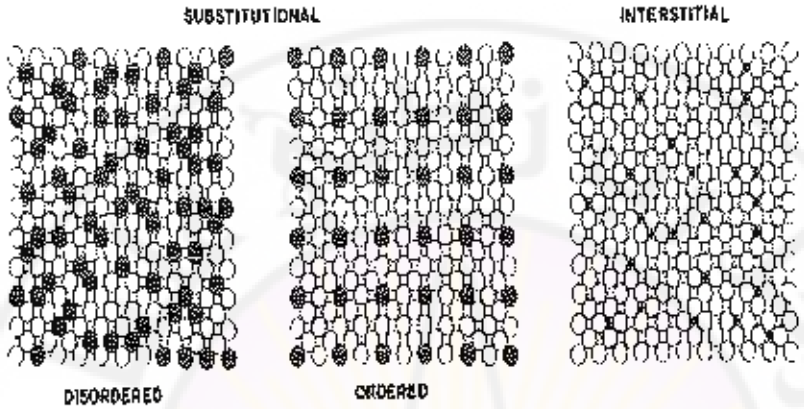
إذا كان كلا المعدنين متباعدين بشكل كبير في الجدول الدوري فإن الخواص الكيمياوية، ومن المحتمل حجومهما الذرية، ستختلف إلى حد كبير، وأيضا من المحتمل أنهما سيجتمعان لتشكيل نوع من المركب الكيميائي (مركب وسطي). بين هاتين النهايتين فإن ذرات المعدنين قد ترتبطان كلاً بالآخر في أشكال مختلفة لتشكيل المراحل الانتقالية التي تعرف مجتمعة كأطوار متوسطة.

2-2-1: المحلول الصلب:

يتشكل المحلول الصلب عندما يكون المعدنان قابلين للذوبان بشكل متبادل في الحالة السائلة ويبقيان مذوبين في بعضهما البعض بعد التبلور، بحيث إنه إذا فحصنا بفحص البنية المجهرية للمركب الصلب الناتج بالمجاهر الضوئية أو حتى بواسطة المجهر الالكتروني عالي القدرة، فلا يمكن أن نرى أي أثر لأطوار منفصلة من المعادن الأصل المكونة للخليطة، ويرى بدلا من ذلك بلورات متجانسة من المحلول الصلب المتجانس. وسيظهر جلياً أن معدناً واحداً سيذوب في الآخر لتشكيل محلول صلب متجانس وبحيث تدخل ذراته بطريقة ما إلى البلورة المتشابكة للمعدن الآخر. هذا قد ينجز بالارتباط بين الذرات بشكل تداخلي أو بالإحلال (الإبدال) لذرات من معدن مكان أخرى من معدن آخر في المحلول الصلب. كما يوضحه الشكل (2-1).

يمكن أن تشكل المحاليل الصلبة بشكل تداخلي فقط عندما تكون ذرات العنصر المضاف صغيرة جدا مقارنة بذرات المعدن الأصلي، حيث يحدث ملاءمة الفجوات أو الفراغات في الهيكل البلوري للمعدن الأصلي. ولا يحدث هذا فقط أثناء تجمد المعدن لكن، أيضا في العديد من الحالات، عندما يكون المعدن الأصل قد تصلب للتو. فعلى سبيل المثال، يمكن للكربون أن يشكل محلولاً صلباً هو كربيد الحديد Fe_3C (السمنتيت) أثناء تجمد الفولاذ ذي البنية الهيكلية المكعبة المتمركزة وجهياً FCC، كما أنه يمكن أن يمتص من قبل الفولاذ الذي سخن إلى درجة الحرارة اللازمة لتشكيل هياكل مكعبة متمركزة وجهياً (FCC). وهذا هو مبدأ الفولاذ المكربن. كما أن النتروجين أيضا قادر

على التذويب بشكل فراغي في الفولاذ الصلب، يجعل عملية تبريد الفولاذ ممكنة. بينما الهيدروجين ذو الذرات الصغيرة جدا في الحقيقة، قادر على أن يذوب بهذه الطريقة في عدد من المعادن الصلبة مكونة منتجات هشة.



الشكل (2-1): طرق تشكل المحلول الصلب.

في المحلول الصلب التبادلي تستبدل الذرات المذيب أو المعدن الأصل في الهيكل الشبكي بذرات المعدن المذاب. هذا الاستبدال يكون إما منتظما أو عشوائيا. كما هو موضح بالشكل (2-1).

يتشكل المحاول الصلب بشكل عشوائي غير منتظم وعلى نطاق واسع في الخلائط المعدنية المتكونة، وذلك عندما تكون الذرات أو بالأصح أيوناتها الموجبة ذات أحجام متشابهة، بينما عندما تختلف أقطار الذرات بأكثر من 14% عن تلك الأقطار للمعدن المذيب، فإن قابلية الذوبان ستكون ضعيفة بسبب أن عامل حجم الذرات غير مناسب.

ينشأ تأثير عامل الحجم من الإجهاد الذي يحدث في الهيكل الشبكي نتيجة سوء التوضع الحاصل من ذرات المعدن المذاب مؤدية إلى استبعاد ذرات المعدن المذيب نحو الداخل أو الخارج، وذلك استنادا إلى ذرة المذاب أهي أكبر أم أصغر من ذرة المعدن المذيب. هذا التشوه في الهيكل الشبكي يزيد طاقة البلورة ويفيد في تحديد قابلية الذوبان فيه.

تؤثر الخواص الكهروكيميائية للمعدنين على أي منهما سيكون المعدن الأساس بالخليطة (المذيب) وأيهما سيكون المعدن المذاب.

هكذا فإنه إذا كان للمعدنين خصائص كهروكيميائية متشابهة إلى حد بعيد (متقاربين في الجدول الدوري)، فإنهما قد يشكلان محاليل صلبة بتراكيب كيميائية متنوعة، أما إذا كان أحد المعدنين ذا شحنة كهربائية موجبة كبيرة والآخر ضعيف الشحنة الموجبة (متباعدين في الجدول الدوري) فإن الهياكل الشبكية للمعدنين ستؤثر على مدى قدرة أي منهما على تشكيل المحاليل الصلبة. وفي حال كون الهياكل الشبكية متماثلة يمكن التوقع بأن ذرات أحد المعدنين ستحل مكان ذرات المعدن الآخر في هيكله الشبكي، ويكون المعدن ذو النسبة الحجمية الأكبر هو المذيب بينما المعدن ذو الكمية الأقل هو المذاب.

فعلى سبيل المثال: معدنا النحاس والنيكل اللذان لهما حجوم ذرية متقاربة، ولهما الهياكل الشبكية المكعبة المتمركزة وجهياً نفسها سيشكلان عند مزجهما سلسلة مستمرة من المحاليل الصلبة.

أيضا يؤثر تكافؤ أحد المعدنين بالنسبة للآخر على الميول لتشكيل محلول صلب بحيث يذوب المعدن ذو التكافؤ الأخفض المعدن الآخر ذا التكافؤ الأعلى والعكس بالعكس.

ويرمز Cu(Ni) لمحلول النيكل في النحاس أي أن Cu هو العنصر المذيب بينما Ni هو المذاب. بينما Ni(Cu) فتشير إلى العكس.

وهكذا فإن قابلية الذوبان بدرجة عالية بين معدنين أو أكثر تتوقف على عدة عوامل أهمها:

1. يجب أن يكون الاختلاف في أنصاف الأقطار الذرية أقل من 14 %.
2. الخواص الكهروكيمياوية متماثلة.
3. المعدنان لهما تراكيب بلورية متماثلة.

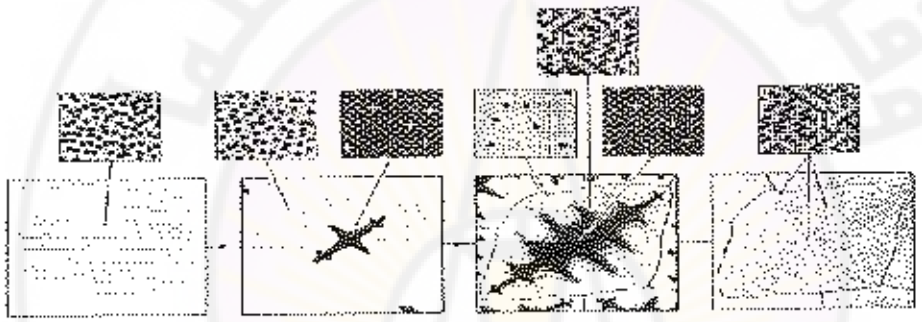
مع أن عامل حجم ذرات المعدنين المشكلين للسبيكة قد يعطي الأولوية أثناء تكوين المحلول الصلب حال كون أحد المعدنين ذا شحنة كهربية موجبة أقوى من الآخر.

عندما يتبلور محلول صلب غير منتظم من الحالة السائلة فإن هناك ميلاً لتشكيل بنية دندريتية في المعادن ذات درجة حرارة الانصهار الأعلى، بينما ستحوي الحواف الخارجية للبلورة ذرات أكثر تماثلية للمعدن ذي درجة الانصهار الأخفض، وعلى الرغم من هذا، يحدث انتشار ضمن مثل هذا البلورات، وهذا الانتشار يميل إلى إنتاج توزيع موحد لكل نوع من الذرات.

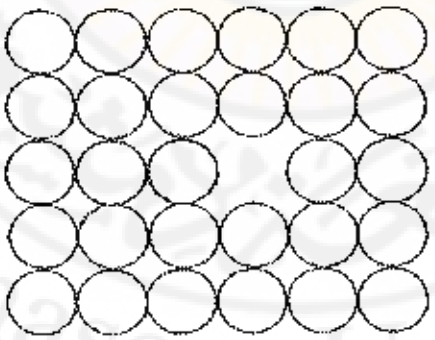
إن الانتشار غالبا يحدث عند درجات حرارة عالية، وإن التبريد السريع للسبيكة سوف يؤدي إلى عدم الانتظام بالبنية والميول إلى انتزاع لبعض الذرات من أماكنها، أما السبيكة المبردة ببطء فستكون أكثر انتظاما، كما أن التلدين المطول يؤدي إلى الحصول على بنية ذات محلول صلب موحد متجانس.

إن القوة الدافعة وراء الانتشار هي التخفيض في طاقة الإجهاد الناتجة بالسبيكة بحيث تبتعد ذرات المعدن المذاب عن المناطق العالية التركيز مؤدية إلى انخفاض تشويه البلورة بشكل عام. تأثيرات ظواهر نزع الذرات والانتشار يظهرها الشكل (2-2).

يمكن أن يحدث انتشار فراغي للمحلول الصلب بشكل نسبي وبسهولة لأن ذرات المذاب تكون صغيرة، وبالتالي يمكن أن تتحرك بسهولة خلال الهيكل الشبكي للمعدن الأصل، لكن في المحاليل الصلبة البديلة فإن آلية الانتشار ما زالت قيد التخمين. وتلك العيوب يمكن أن تحدث في البلورات، مسببة عمليات الإزاحة للذرات المسماة ' مواقع شاغرة ' وهذا يمكن أن يوجد في بلورة معدنية. في الشكل (2-3) موقع في الهيكل الشبكي لم يتم شغله بذرة.



الشكل (2-2): تأثيرات ظواهر نزع الذرات والانتشار.

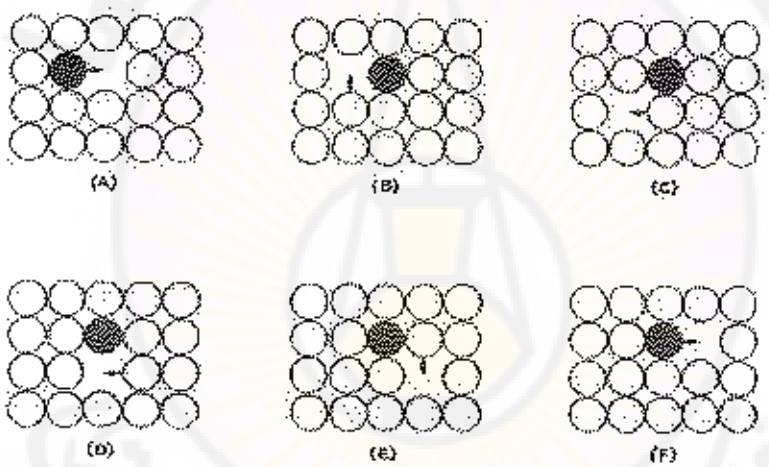


الشكل (2-3): تأثيرات المواقع الشاغرة في الهيكل الشبكي.

هناك دائما بعض الاختلاف في الحجم بين ذرات المذاب وذرات المعدن الأصل (المذيب)، لذلك فإن وجود ذرة عنصر مذاب سيسبب بعض التشويه في الهيكل الشبكي للمعدن الأصل. هذا التشويه سيقلل بمشاركة ذرة المذاب مع موقع شاغر الشكل (2-4) إن الزوج المرتبط للموقع الشاغر بذرة المذاب يمكن أن يهاجر بسهولة خلال البلورة في المراحل كما أشير إليها بالشكل.

إن نسبة الانتشار ستعتمد إلى حد ما على عدد المواقع الشاغرة، وأيضا على ميل تركيز ذرات المذاب ضمن تركيب المعدن المذيب.

وعلى درجة الحرارة التي يحدث عندها الانتشار. والنتيجة العامة ستكون لذرات المذاب التي ستنتشر بعيدا عن مناطق التركيز العالي نحو مناطق التركيز المنخفض والانتشار سيتوقف في النهاية عندما يكون هناك توزيع موحد لذرات المذاب.



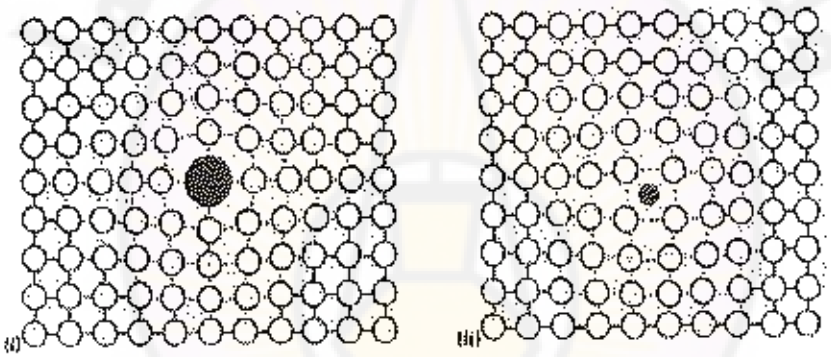
الشكل (2-4): ذرات المذاب تتوضع في أماكن شاغرة بين ذرات المذيب.

إن ذرات العناصر المختلفة التي تشكل المحاليل الصلبة الاستبدالية لا يكون لها أبدا الحجم نفسه بالضبط ولهذا السبب يتشوه الهيكل الشبكي للمعدن الأصل بوجود ذرات — سواء أكبر أو أصغر — من المعدن المذيب. الشكل(2i-5). وبالطريقة نفسها فإن ذرات المذاب ذات الحجم المشابه لأولئك من المعدن الأصل ستذوب أحيانا بشكل فراغي كما يوضحه الشكل (2i-5).

2-2-2: الأطوار المتوسطة :

تعاملنا في القسم السابق مع المحاليل الصلبة التبادلية العشوائية التي لا انتظام لذرات المعدن المذاب داخل الهيكل الشبكي للمعدن المذيب. تشكلت مثل هذه المحاليل حيث المعادن متشابهة في الخواص الكهروكيماوية .على أية حال، عندما يكون لمعدنين خواص كهروكيمياوية متباعدة جدا فمن المحتمل أن يرتبطا ليشكلا مركباً كيميائياً.

وهكذا فإن المغنيسيوم ذا الشحنة الكهربائية القوية سيتحد مع القصدير ذي الشحنة الضعيفة ليشكل Mg2Sn. يوصف هذا عموما بالمركبات الوسطية. حيث تتشكل أطوار متدرجة في الخواص بالنظر إلى درجة الرابطة التي تحدث بين الذرات. هذه الأطوار تحدد مجتمعة الأطوار المتوسطة المعينة. هذه المراحل الطورية المتوسطة يمكن أن تصنف إلى ثلاث مجموعات رئيسية:



الشكل (2-5): تشوه الهيكل الشبكي للمعدن الأصل نتيجة وجود ذرات أكبر أو أصغر من المعدن المذاب.

1. مركب وسطي: الذي تكون فيه قوانين التكافؤ الكيميائي كما بالشكل: Mg_2Sn, Mg_2Pb، Mg_2Sb_2، و Mg_3Bi_2.

تتشكل مركبات التكافؤ عموماً عندما يكون لأحد المعادن (مثل المغنيزيوم) خواص كيميائية معدنية قوية الرابطة، والمعدن الآخر (مثل الأنتيمون والقصدير أو البزموت) ذو خواص كيميائية معدنية ضعيفة، وفي الحقيقة، ذلك اللامعادن تمثل مركب له نقطة انصهار أعلى من الآخر المعدن الأصل. على سبيل المثال المركب الوسطي Mg_2Sn ينصهر عند الدرجة 780°C بينما

المعادن الأصل (المغنسيوم والقصدير تنصهر عند الدرجة 650°C و 232°C على التوالي. هذا يشير إلى قوة الرابطة الكيماوية في المركب Mg_2Sn.

2- *مركبات الإلكترون:* إن تكافؤ المادة الكيمياوية متعلق بعدد الإلكترونات في المدار الخارجي للذرة بينما طبيعة الرابطة المعدنية كتلك التي تتشارك في أعداد الالكترونات الذي يحصل في الهيكل الشبكي لمعدن صافي، لم تطبق قوانين التكافؤ الطبيعية في 'مركبات الإلكترون'، لكن يوجد في حالات كثيرة نسبة بين العدد الكلي لروابط تكافؤ كل الذرات المرتبطة والعدد الكلي للذرات في الصيغة التجريبية للمركب موضع البحث.

يوجد ثلاثة نسب تدعى عموماً بنسب هيوم روثيري (Hume-Rothery ratios):

- النسبة 3/2(21/14) تعطي بنيات بلورية نوع β، كمثال عليها: $CuZn$, Cu_3Al, Cu_5Sn, Ag_3Al ..... وهكذا.
- النسبة 21/13 تعطي بنيات بلورية نوع γ، كمثال عليها: Ag_5Zn_8, $Cu_{31}Sn_8$, Cu_5Zn_8, $Na_{31}Pb_8$ ..... وهكذا.
- النسبة 7/4(21/12) تعطي بنيات بلورية نوع ε، كمثال عليها: $CuZn_3$, Cu_3Sn, $AgCd_3$، Ag_5Al_3..... وهكذا.

على سبيل المثال: في المركب $CuZn$، النحاس له تكافؤ يساوي 1 والزنك تكافؤه 2، ما يعطي ما مجموعه 3 تكافؤات ولذلك نسبة من 3 تكافؤ إلى ذرتين.

النحاس في المركب $Cu_{31}Sn_8$ له تكافؤ 1 أما القصدير فله التكافؤ 4. لذا القيمة 31 تشير إلى تكافؤ الذرات النحاسية و32 (4x8) تشير إلى تكافؤ ذرات القصدير، مما يجعل مجموع التكافؤات 63 تكافؤاً مقابل 39 ذرة موجودة في الصيغة التجريبية لـ $Cu_{31}Sn_8$ لذا فإن النسبة:

الوزن الذري/ عدد الذرات = 63 / 39

أي

$$\frac{\text{Total number of valences}}{\text{Total number of atoms}} = \frac{63}{39} \text{ or } \frac{21}{13}$$

وبالتالي فإن نسب هيوم روثيري ثمينة في تقييم البنى البلورية التي كانت غير مرتبطة على ما يبدو. هناك، على أية حال، العديد من "مركبات الإلكترون" التي لا تنتمي إلى أي من

المجموعات الثلاث المذكورة سابقاً وليست مركبات تكافؤ. تتشكل مركبات الإلكترون كنتيجة لطبيعة الرابطة المعدنية والاستقرار لمثل هذه المادة يعتمد على تركيز الإلكترون وبنية الهيكل الشبكي المتضمنة.

3- *مركبات تتعلق بعامل الحجم*: وهذه أطوار متوسطة فيها التراكيب والتراكيب البلورية يرتبان نفسيهما بطريقة كالسماح للذرات الأساسية بتجميع نفسها سوية بشكل مباشر.

تستند تراكيب أطوار العثة Laves Phases على الصيغة العامة: AB_2 كمثال: $MgNi_2$، $MgCu_2, TiCr_2$، و $MnBe_2$.

يعتمد تشكيلهم على الحقيقة بأن الذرات التأسيسية تتفاوت في الحجم بحوالي22.5 % لكن لا يمكن جمعهم بشكل متقارب لبعضهم في بنية الهيكل الشبكي.

مجموعة مهمة جدا من مركبات عامل الحجم هي المركبات البينية والتي تشكلت بين انتقال معادن وذرات لا معادن صغيرة معينة.

عندما تتجاوز قابلية الذوبان الصلبة لعنصر فراغي مذوب يترسب مركب من المحلول الصلب في هذا النوع من المركب، تبقى ذرات اللامعدن الصغيرة وتحتل مواقع فراغية، لكن في الشكل العام للبنية الشبكية للمركب تكون مختلفة عن تلك المحلول الصلب الأصل.

تملك مركبات هذا النوع خواصا معدنية وهي تشمل هيدريدات، و نتريدات وبوريدات وكربيدات مثل $TiH_2, TiN, Mn_2N, TiB_2, TaC, W_2C, WC, Mo_2C$ و Fe_3C وتكون مثالية.

هذه المركبات كلها قاسية جدا ووجدت تطبيقات في الأدوات الفولاذية والمواد الكربيدية القاطعة.

تكون العديد من الأطوار المتوسطة قاسية وهشة جدا لذا فإن قالبا صغيرا من هكذا مادة قد يسحق في أغلب الأحيان ويتحول إلى مسحوق نتيجة ضغط خفيف لتحريره من الملزمة، عمليا هذا صحيح بشكل خاص في مكبرات التكافؤ حيث تميل تساهمية الروابط الأيونية إلى استبدال الرابطة المعدنية. هكذا تصبح المادة لا معدنية الخواص كما أشير إليه بالهشاشة وذي توصيلية كهربائية منخفضة. ولذلك فإن هكذا أطواراً محدودة الاستخدام في هندسة السبائك وبالتالي نسبيا الأبعاد الصغيرة للتكبير المجهري الكلي. تكون الكميات الصغيرة للأطوار المتوسطة — عادة مركبات إلكترون — موجودة عموما في سبائك التحميل. هنا تكون الجزيئات القاسية للمركب مضمنة في مصفوفة المحلول الصلب القاسي. يقاوم المركب التلبيس، ولها معامل احتكاك

منخفض، بينما المحلول الصلب تزود المصفوفة القاسية الضرورية والقادرة على مقاومة الصدم الميكانيكي وقوى الضغط العالية. غالبا ما تكون الأطوار المتوسطة سهلة التمييز في أغلب الأحيان تحت المجهر. كثيرا ما تكون بلون غير متوقع لكن هذا موضح بحقيقة أن التراكيب البلورية وأبعاد الهيكل الشبكي تكون مختلفة عن تلك من المعادن الأصل. غالبا ما تكون الأطوار المتوسطة سهلة التمييز في أغلب الأحيان تحت المجهر. وكثيرا ما تكون بلون غير متوقع لكن هذا موضح بحقيقة أن التراكيب البلورية وأبعاد الهيكل الشبكي تكون مختلفة عن تلك من المعادن الأصل. (تتحكم أبعاد الهيكل الشبكي بالطول الموجي للأشعة المنعكسة عن سطح ما) مثل $Cu_{31}Sn_8$ يكون الشعاع أزرق شاحباً بينما Cu_2Sb يكون أرجوانياً براقاً.

تحدد الخواص الجيدة لدرجة الحرارة للعديد من المركبات الوسطية إمكانية استعمالها كمواد هندسية، خصوصا في صناعات المركبات الفضائية، لكن قابليتها للتطريق تكون منخفضة وصلابتها سيئة جدا.

إن نقطة انصهار المركب Ni_3Al هي 1390 °C وهو ذو بنية FCC منتظمة. البلورات الوحيدة للمركب لدنة جدا، كما في أكثر البنى البلورية ذات الهياكل الشبكية FCC، لكن في الحالة متعددة البلورات فإنها تعاني من حدود حبيبية هشة.

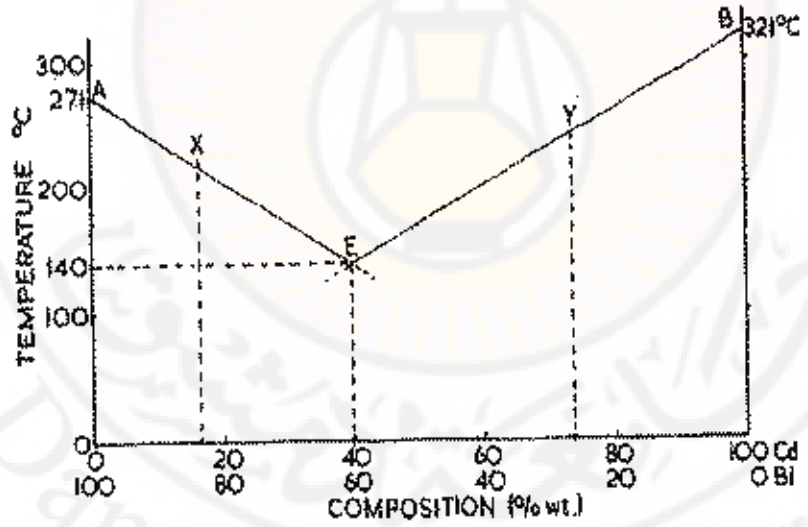
إن إضافة صغيرة من البورون 0.05 % ترفع النسبة المئوية للاستطالة من صفر إلى 50 كالكسر يتغير من كونه ضمن البلورات الى خليط ضمن البلورة وعلى حدود البلورات. كما تتحسن قابلية السحب بشكل ملفت للانتباه. من المحتمل أن يكون هذا التأثير بسبب توزع البورون في الحدود البلورية مسببا تجمعات Segregation غير منتظمة في منطقة الحد مسببة إزاحات تدعى بالانخلاعات تكون كبيرة على طول حدود البلورات أكثر منها على عرضها.

2-2-3: اليوتكتيك واليوتكتويد:

عند وجود معدنين قابلين للذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة لكنهما عديما الذوبان بشكل كامل في الحالة الصلبة، ويقومان بالتبلور بشكل منفصل كطبقات متبادلة من المعدنين الصافيين. هذا النوع من التبلور الصفائحي يدعى يوتكتيك. هذا الخليط الانصهاري من المعدنين دائما يتألف من نسبة تركيب ثابتة للمعدنين المنصهرين وهو ينصهر عند درجة حرارة أقل من نقطة انصهار كلا المعدنين.

ليكن لدينا معدنان مثل الكادميوم والبزموت القابلين للذوبان بشكل مطلق في بعضهما البعض بالحالة السائلة ولكنهما عديما الذوبان بالكامل بالحالة الصلبة. إذا زدنا كمية الكادميوم المضافة إلى البزموت عندها يحصل هبوط في نقطة تجمد البزموت (271 °C) وبشكل تدريجي على طول AL الموضح بالشكل (2-6). بالطريقة نفسها إذا زدنا الكمية المضافة من البزموت إلى الكادميوم عندها تنخفض نقطة تجمد الكادميوم (321°C) تدريجياً (على طول الخط BE) بالشكل نفسه. تلتقي هذه التخفيضات من خطوط نقطة التجمد في E في حدها الأدنى والتي تدعى بالنقطة الاتصهارية. يشار إلى تركيب الخليط اليوتكتيكي (60 % wt بزموث و 40% كادميوم) حيث يحصل التحول اليوتكتيكي عند درجة الحرارة (140 °C).

لنفترض أن X هي تركيب عام لسبيكة من الكادميوم والبزموت. تشير هذه النقطة إلى أن البزموت موجود في السبيكة المتصهرة في المركب اليوتكتيكي. لذلك فإن بعض البزموت سيتبلور أولا لوحده حتى في الوقت الذي انخفضت فيه درجة الحرارة إلى (140 °C) فالسائل المتبقي سيتبلور على هيئة يوتكتيك. وبالطريقة نفسها إذا كان التركيب العام للخليط السائل الأولي هو بتركيز النقطة Y.



الشكل (2-6): مخطط التوازن الحراري للكادميوم - بزموث.

اليوتكتيك المتشكل يمكن رؤيته تحت المجهر بشكل واضح تماماً عند التكبير عادة بين 100 و500 مرة، كطبقات متراكبة. تتألف إحدى الطبقات من المعدن A المشبع بالمعدن B، والأخرى طبقة لمعدن B أشبع بالمعدن A. وبالتالي يجب أن يفهم أن الطبقتين ليستا متشابهتين في التركيب، لأن طبقة واحدة غنية في المعدن A والآخر غنية بالمعدن B.

كتوضيح للفكرة اعتبر كحالة متوازية في المحاليل السائلة، ماء وإيثر (ether). إذا أضيفت بضعة من بقع الأثير إلى أنبوبة اختبار ملئت تقريبا بالماء وهز الأنبوب، سينتج محلول وحيد من الإيثر في الماء. ومن ناحية أخرى، إضافة بضعة بقع من الماء إلى أنبوبة اختبار ملئت تقريبا بالأثير، وهز الأنبوب، فإن محلول وحيد من الماء في الأثير سينتج. وعندما نضع في أنبوبة اختبار حجوماً متساوية للأثير والماء ونهزها بشدة، سنجد أننا نحصل على طبقتين. الطبقة العليا ستكون الأثير المشبع بالماء، والطبقة الأخفض ستكون ماءً أشبع بالأثير. إن الطبقة العليا هي محلول يحتوي معظمه ايثر، والطبقة الأخفض محلول مختلف يحتوي غالبه على الماء.

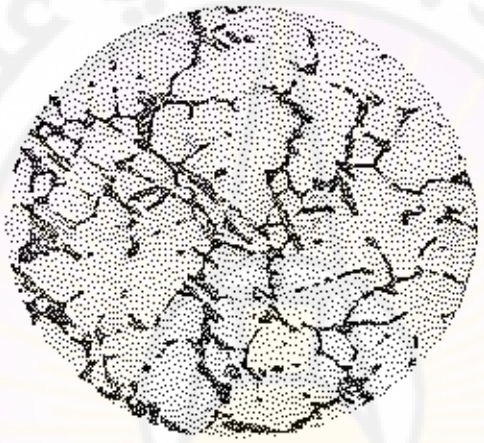
وهكذا، عندنا حالة مماثلة في حالة المحاليل الصلبة المعدنية، في حال الطور يوتكتيكي، فقد يكون محلول صلب غني بالمعدن A، والطور الآخر محلول صلب غني بالمعدن B.

لا تظهر كل "البنى اليوتكتيكة" – سواء من المعادن الصافية أو من المحاليل الصلبة– تحت المجهر في الشكل الواضح المعالم المذكور أعلاه. عادة تكون طبقات إحدى الأطوار مضمنة ضمن البنية التركيبية للمراحل الأخرى، وغالباً تتكسر هذه الطبقات أو تتفكك. الشكل(2-7) يبين البنية المجهرية ليوتكتيك الألمنيوم–سيلكون، والذي فيه السيلكون ذو الطبقات الأقل سماكة (حيث يحتوي الخليط اليوتكتيكي فقط 11.7 % سيليكون) وتكون هذه الطبقات متكسرة على شكل طبق ومضمنة في البنية المجهرية لتركيبة الألمنيوم. هذا في الحقيقة شيء مفيد صناعيا لأن السيليكون هش، وإذا توافر كطبقات مستمرة فإنه بشكل أكيد سيضعف الخواص المفيدة للسبيكة وبشكل كبير.

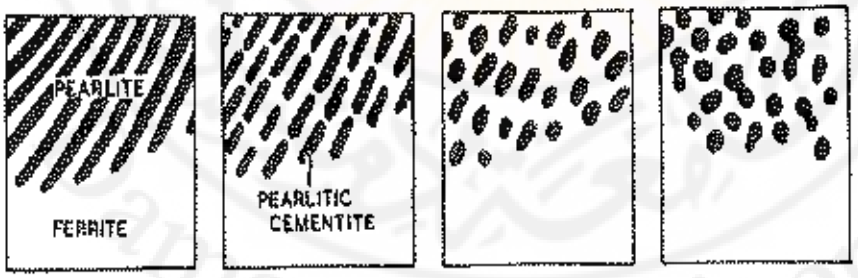
إن الشد السطحي قد يؤثر على التبلور، ويصبح شكل اليوتكتيك النهائي عبارة عن كريات من طور واحد ضمن البنية المجهرية الكلية. إن تأثير الشد السطحي أثناء عملية التبريد يبطء تسمح للطبقات من طور واحد بالتحطيم أولا إلى أطباق أصغر وأثخن وفي النهاية إلى حبيبات مدورة كما يبينه الشكل (2-8).

أحيانا يتحول محلول صلب والذي تشكل للتو في سبيكة عند درجة حرارة أخفض إلى بنية يوتكتيكية. عند حدوث ذلك، فإن نوع بنية اليوتكتيك الناتجة يدعى يوتكتويد، لأنه لم يتشكل من محلول سائل مثل اليوتكتيك، بل من محلول صلب.

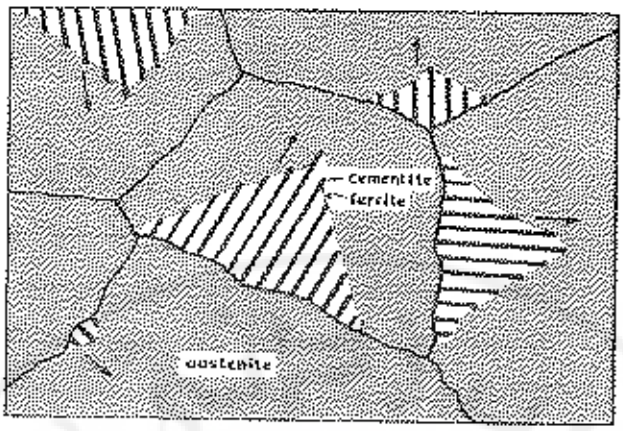
إن تحول المحلول الصلب "الأوستنيت"، إلى يوتكتويد (برليت)، مثال على هذا النوع من التغير. تتشكل نوى السيمينتيت عشوائيا في الحدود البلورية للأوستنيت، وتبدأ هذه النوى بالنمو في الاتجاه الذي يكون فيه تركيز الكربون في الأوستنيت أعلى. كنتيجة لانتزاع الكربون من الأوستنيت المحيط لتشكيل السمنتيت، فإن الفريت سيتبلور بجانب السمنتيت. بهذه الطريقة فإن السمنتيت والفريت سيتبلوران بجانب بعضهما البعض. كما يوضحه الشكل (2-9).



الشكل (2-7): البنية المجهرية ليوتكتيك الألمنيوم - سيليكون.



الشكل (2-8): تأثير معدلات التبريد على البنية المجهرية اليوتكتيكية الناتجة.



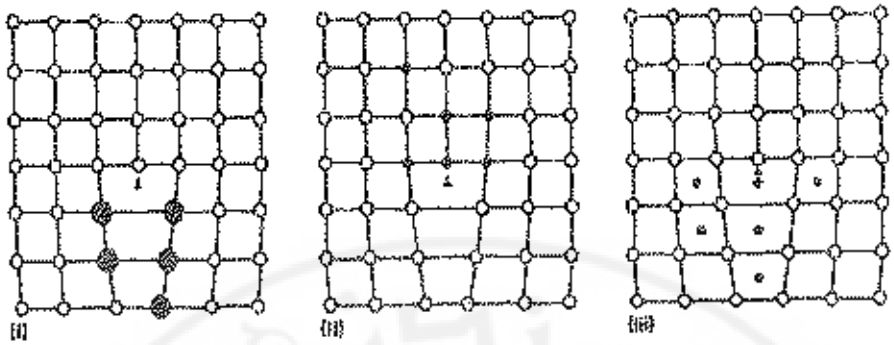
الشكل (2-9): ميكانيزم تحول الاوستنيت إلى برليت.

إذا بريدت سبيكة بسرعة كبيرة من درجة حرارة أعلى من الخط الذي يبدأ عنده تشكل البوتكتويد، فإن المحلول الصلب (أو من المحتمل تشكل المارتنسيت في الفولاذ) يبقى بأغلب الأحيان. هذا يظهر أن البوتكتويد لم يتشكل من السائل لكن كان قد أنتج في مرحلة تالية بالحالة الصلبة.

2-2-4: آليات تقوية الخلائط:

كما نعلم أن السبب الرئيسي الخلط هو أن تزيد متانة الخضوع للمعدن، هذا يتضمن عرقلة حركة عمليات الإزاحة من خلال عمل تعديلات في البنية البلورية للمعدن.

1- تقسية المحلول الصلب: بسبب ظهور الإزاحة في معدن مشغل على البارد إلى تشويه ذلك الجزء من بنية الهيكل الشبكي، هذا التشوه وكمية الطاقة المرتبطة به يمكن أن تخفض بوجود ذرات من العنصر المذيب. إن ذرات المحلول البديل الكبيرة الحجم ستؤدي إلى تخفيض التشوه إذا اتخذت المواقع التي استطالت فيها بنية الهيكل الشبكي نتيجة الإزاحة كما يوضحه الشكل (2-10(i))، بينما ذرات المحلول الصلب البديل الصغيرة ستكون حينها ذات تأثير مماثل إذا استبدلت في المناطق التي يكون فيها الهيكل الشبكي قد انضغط. شكل (2-10(ii)). وعندما تتوضع هذه الذرات بين ذرات المحلول المذاب، فإن حركة عمليات الإزاحة ستعرقل، ويجب أن نطبق إجهادا أعظم لتحريكهم. بمعنى آخر، حد الخضوع يزاد في المحاليل الصلبة البينية، فإن ذرات المذاب الصغيرة نسبيا ستتجه لاحتلال المواقع حيث الهيكل الشبكي يكون مستطيلا كما يوضحه الشكل (2-10(iii)) وذلك لأن شحوات بينية ستكون أكبر في هذه المناطق.



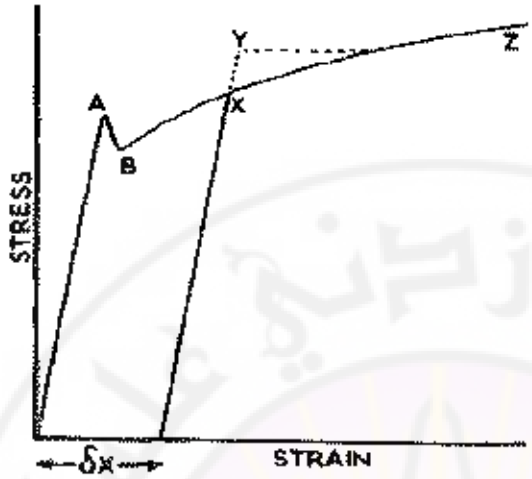
الشكل (2-10): آليات تقوية الخلائط

في الشكل. (2–11) نقطة الخضوع A المقابلة للإجهاد ضرورية لتحرك عمليات الإزاحة بعيدا عن ذرات الكربون البينية التي أصبحت مثبتة بها، بينما النقطة B تشير إلى أن الإجهاد ضروري لإبقاء عمليات الإزاحة تتحرك عند بدئها.

بسبب تأثير نقطة الخضوع في الفولاذ المعتدل تشويهاً وضعياً غير موحد، يؤدي إلى تشكيل إجهادات (أو انفعالات موسعة) stretcher strains على سطح مثل هذه المنتجات مثل السحب العميق لهياكل موتورات السيارات.

مثل هذه العلامات تؤدي إلى تشوه السطح، ويتم تجنب تشكلها بتطبيق تشويه أولي طفيف على المادة. على سبيل المثال، بواسطة مرور رول خفيف. مثل هذا التشويه يحدث بالضغط بدلا من الشد، لمنع تشكل إجهادات نقالة.

افترض أنه، أثناء هذه المعالجة، تم شدّ المادة الى النقطة X كما بالشكل (2–11). وقد وصلت المادة الآن إلى حد الخضوع، فلن تصادف نقطة خضوع أثناء عملية الرسم اللاحقة. ومنحني الإجهاد سيتبع لـ XZ. إذا، على أية حال، فإن الفولاذ مسبق الإجهاد يسمح له بالبقاء في درجة حرارة الغرفة لمدة بضعة شهور ، أو إذا سخن إلى 300 °C لمدة بضع ساعات، تكون ذرات الكربون قادرة على جعل الانخلاعات تعود إلى مواقعها الأولية. لذا يعود تأثير نقطة الخضوع. و لكن في النقطة الجديدة Y وهذا ناتج عن عمليات الإزاحة. هذا التأثير، الذي يعرف بالإجهاد طويل الأمد، يمكن أن يكون سببه وجود نسبة قليلة 0.003 % من الكربون أو النتروجين. هو أحيانا يستعمل لتقوية النوابض بعد لفها.



الشكل (2-11): تحرك نقطة الخضوع نتيجة عمليات التشكيل.

2- التصلب الانتشاري: إن وجود حبيبات منفصلة صغيرة في التركيب المجهري يمكن أن يعرقل حركة الإزاحة حيث إن هذه الجزيئات تكون أقوى من المادة الرابطة والموجودة ضمنها. تعتمد درجة التقوية الناتجة أيضا على حجم الجزيئات، و على قيمة البعد فيما بينها وقوة الترابط بين الجزيئات. إن حصول الإزاحة عبر خليطة تحوي جزيئات معزولة يبينه الشكل (2-12). على افتراض أن الجزيئات أقوى من المادة الرابطة، فإن الإزاحة لا تستطيع المرور عبرها، لكن إذا كان الإجهاد عاليا بما فيه الكفاية، فالإزاحة يمكن أن تسلك طريقا جانبيا تاركة حلقة إزاحة حول كل جزيئة. هذا سيجعل مرور الإزاحة الثانية أصعب بكثير، خصوصا وأن عمليات الإزاحة ستجد صعوبة أكبر في المرور بين الجزيئات القريبة إلى بعضها البعض.

ترسّب جزيئات الطور المنفصل غالبا من محلول صلب خلال التبريد صفيحات السمنتيت في البرليت على سبيل المثال، ويؤدي وجودها إلى تقوية الفولاذ. تدعى مثل هذه الجزيئات التي فصلت لتشكيل تراكيبها البلورية الفردية الخاصة باسم رواسب غير متماسكة. قبل الترسيب الفعلي للجزيئات المنفصلة، على أية حال، توجد حالة متوسطة في أغلب الأحيان حيث إن الذرات المشاركة بمادة المذاب تبدأ بتشكيل مجموعات ضمن الهيكل الشبكي للمعدن المذيب. هذه

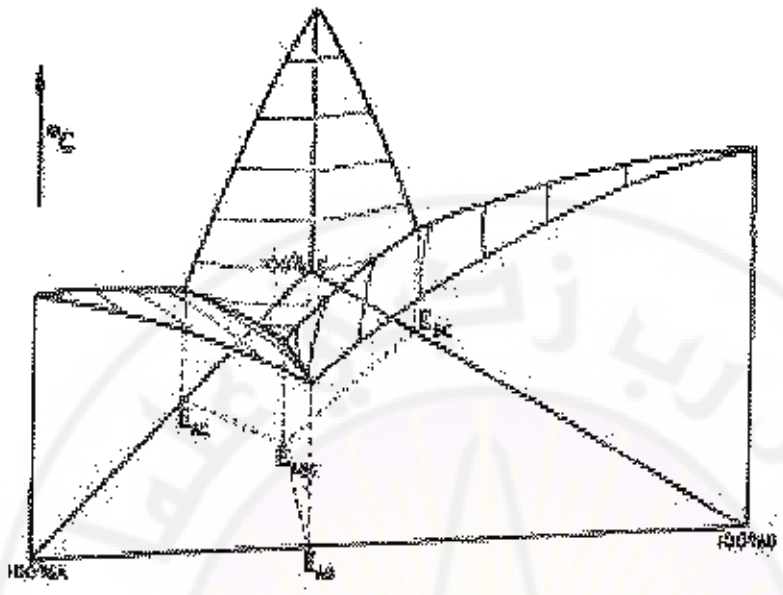
المناطق الصغيرة المكونة من أقل من مئة ذرة على الحافة، تدعى بالرواسب المتماسكة. بالرغم من أنه ما زال جزء التركيب البلوري المستمر للمادة الرابطة يحاول أن يشكل بلوراتهم المنفصلة الخاصة التي سيكون عندها بلورة مختلفة النمط، فإن وجود هذه الرواسب المتماسكة ينتج شريط تشوهات مرنة حادة تعرقل حركة عمليات الإزاحة. وهي عموما أكثر فعالية من الرواسب غير المتماسكة.

2-3 : مخططات الإتزان الحراري للخلائط الثلاثية التكوين:

في هذا الفصل تعاملنا فقط مع المخططات التي تحتوي ثلاثة معادن مختلفة، إذاً هناك متغير ثالث في هذه المخططات، لذلك لم نعد نستطيع أن نمثل النظام السبائكي من قبل مخطط ثنائي الأبعاد. بدلا من ذلك يجب أن نعمل في ثلاثة أبعاد في تمثيل نظام السبيكة بشكل كاف. قاعدة التخطيط الثلاثي الأبعاد ستكون مثلثاً متساوي الأضلاع، كل معدن صافي يمثل بقمة مثلث. درجة الحرارة ستمثل بإحداثي عمودي على القاعدة المثلثية كما بالشكل (2-13) الذي يبين خليطة ثلاثية لسبيكة معدنية C،B،A الذي فيه الأنظمة الثنائية A-B، B-C وA-C كلها من النوع الأنصهاري البسيط. تشكل خطوط السيولة الثلاثة سطح السيولة في المخطط الثلاثي وتتقاطع هذه السطوح في ثلاث النقاط الأنصهارية للنظام السبائكي وبشكل عمودي فوق EABC حيث درجة حرارته يجب أن تكون أخفض من تلك لأي من النقاط الأنصهارية الثنائية EAB، EBC أو EAC أو مخطط التوازن للسبائك من أربعة معادن أو أكثر حيث لا يمكن أن تمثل في مخطط وحيد و تتطلب أكثر من ثلاثة أبعاد.



الشكل (2-12): الية تقوية الخلائط بعملية التصلب الانتشاري.



الشكل(2-13): مخطط التوازن الحراري ثلاثي الأبعاد لخليطة ثلاثية العناصر.

في دراسة مثل هذه الأنظمة السبائكية يمكن أن يكون ممثلاً في أغلب الأحيان بشكل مفيد على شكل مخطط ثنائي زائف فيه تركيز مكون واحد يتغير بينما يبقى الآخران ثابتين – هذا مكافئ إلى أخذ الشريحة العمودية خلال نظام توازن ثلاثي يوازي إلى أحد الوجوه النهائية. مثل هذه الأنظمة يمكن أن تترجم بالطريقة نفسها كنظام ثنائي عادي. تعاملنا هنا فقط بمخططات توازن الأنواع الأساسية البسيطة. العديد من الأشكال المعقدة ممكن أن تصادف القارىء، ويحتوي مثل هذا التعدد في أغلب الأحيان مراحل مختلفة قادرة على استنزاف الأبجدية اليونانية. هذا صحيح بشكل خاص في مخططات التوازن التي تمثل أنظمة السبيكة النحاسية الأساسية التي فيها عدد من المركبات الوسيطية المتشكلة والتي فيها تفاعلات بريتكتيكية مشتركة أيضا. عموما، نحن مهتمون فقط في أجزاء المخطط القريبة إلى نهاية إحداها، حيث نجد عادة محلولاً صلباً مع كميات صغيرة لمركب وسيطي. والتفسير يصبح أسهل كثيراً، إذا كان القارئ مجهزاً بالمعلومات الكافية من هذا الفصل للتعامل مع أغلب أنظمة السبيكة التي من المحتمل أن يصادفها.

- إذا ما هي مخططات الاتزان الحراري الثلاثية؟ بالتعريف هي عبارة عن مخطط يمثل العلاقة التوازنية بين الأطوار المختلفة التي تشكل مركبات الخليطة السبائكية الثلاثة

كتابع لدرجة الحرارة. وعادة الضغط تؤخذ قيمته واحد ضغط جوي ولا يعتبر كمتغير بالتركيبة الطورية أثناء رسم منحني الاتزان الحراري.

- قانون جيبس للنظام السبائكي ثلاثي المركبات:

$$F = C + 2 - P$$

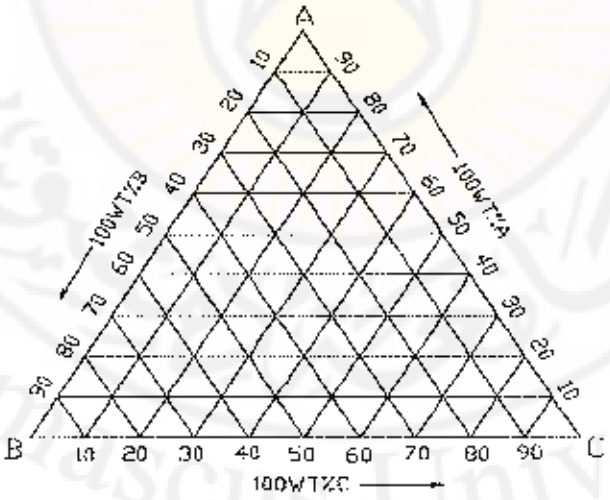
وعند ضغط جوي متساو وثابت، قيمته واحد ضغط جوي تصبح المعادلة:

$$F = C + 1 - P$$

من أجل $C = 3$ العدد الأعظمي للأطوار والذي يكون عندما $F = 0$، بالتعويض $P = 4$ هو عدد المركبات المستقلة.

- تتطلب دراسة النظام السبائكي الثلاثي معرفة بعض البنود الرئيسية التالية:
  - المزج الكلي.
  - عدد الأطوار.
  - المزج الكيميائي للأطوار مفردة.
  - كمية كل طور.
  - مراحل التجمد أثناء التبريد.

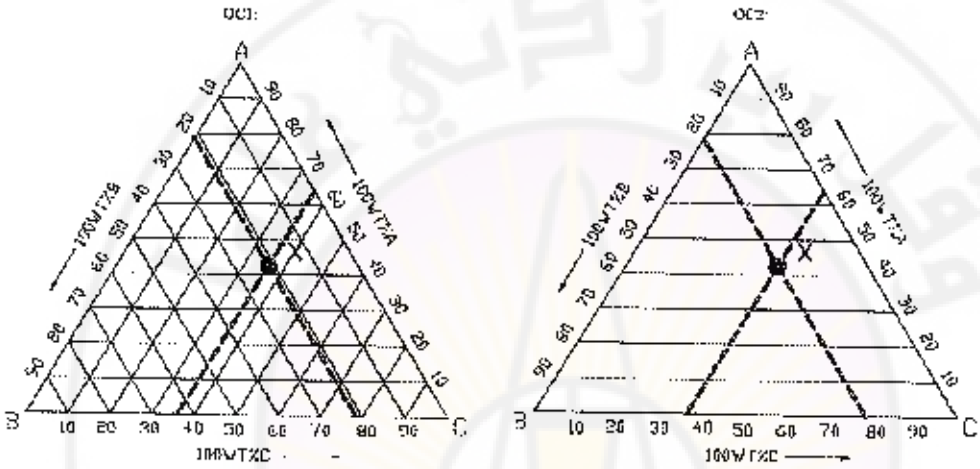
المزج الكلي: يدل على تركيز كل عنصر من النظام السبائكي الثلاثي ويعطى كنسبة مئوية Wt. %. إن مجموع النسب يجب أن يكون مساوياً إلى 100 %. ويمثل كل معدن صاف برأس من رؤوس المثلث متساوي الأضلاع وفق مثلث جيبس للنظام السبائكي الثلاثي كما يظهره الشكل (14-2):



الشكل(14-2): مثلث جيبس النظام السبائكي الثلاثي.

هناك ثلاث طرق متبعة لحساب نسبة المزج الكلية بالخليطة:

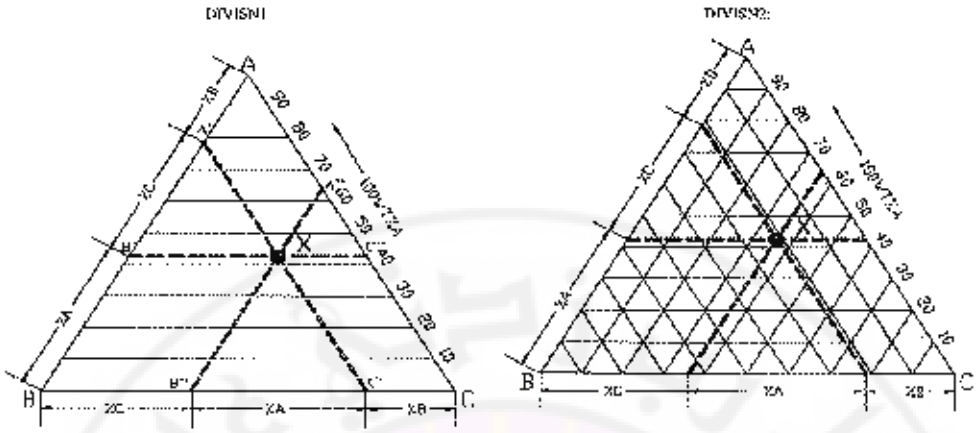
الطريقة الأولى: وفق الأشكال OC1 و OC2 شكل(2-15)، لنفرض أن المزج الكلي ممثل بالنقطة X، نرسم خطوطاً مستقيمة تمر من X وموازية لكل جانب من المثلث، وكما هو واضح من الشكل فالخط الممثل بالنقطتين A' C' القاطعة للجانب AB تشير إلى تركيز B في X، وتركيز كل من A و C في X يمكن حسابهم بطريقة مماثلة.



الشكل(2-15): الطريقة الأولى المتبعة لحساب تركيز العناصر بالنظام المبانكي الثلاثي.

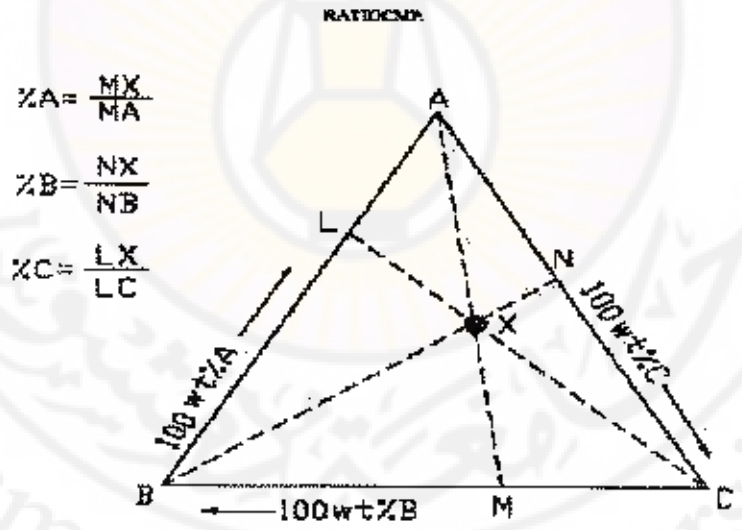
الطريقة الثانية: تتم برسم خطوط مستقيمة موازية لحروف مثلث جيبس كما بالشكل(2-16) بحيث $A'C'$ تتقاطع مع AB في A'. و مع $B'C''$ تقطع AB في B' ويكون تركيز $B = AA'$ وتركيز $C = A'B'$ وتركيز $A = B'B$ هذه الطريقة يمكن أن تكون في بعض الأحيان غير دقيقة ولا ينصح بالعمل بها.

Damascus University



الشكل(2-16): الطريقة الثانية المتبعة لحساب تركيز العناصر بالنظام السيانكي الثلاثي.

<u>الطريقة الثالثة:</u> استخدام قانون العتلة بصورة عكسية، ويتم ذلك برسم خطوط مستقيمة من كل قمة بالمثلث إلى النقطة X وعندها تكون نسب التراكيز كما يوضحه الشكل(2-17).



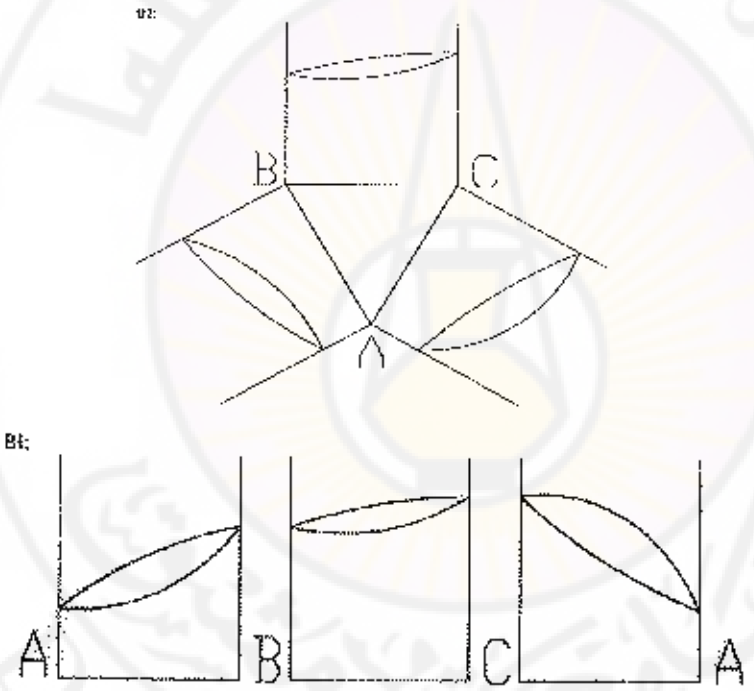
الشكل(2-17): الطريقة الثالثة المتبعة لحساب تركيز العناصر بالنظام السيانكي الثلاثي.

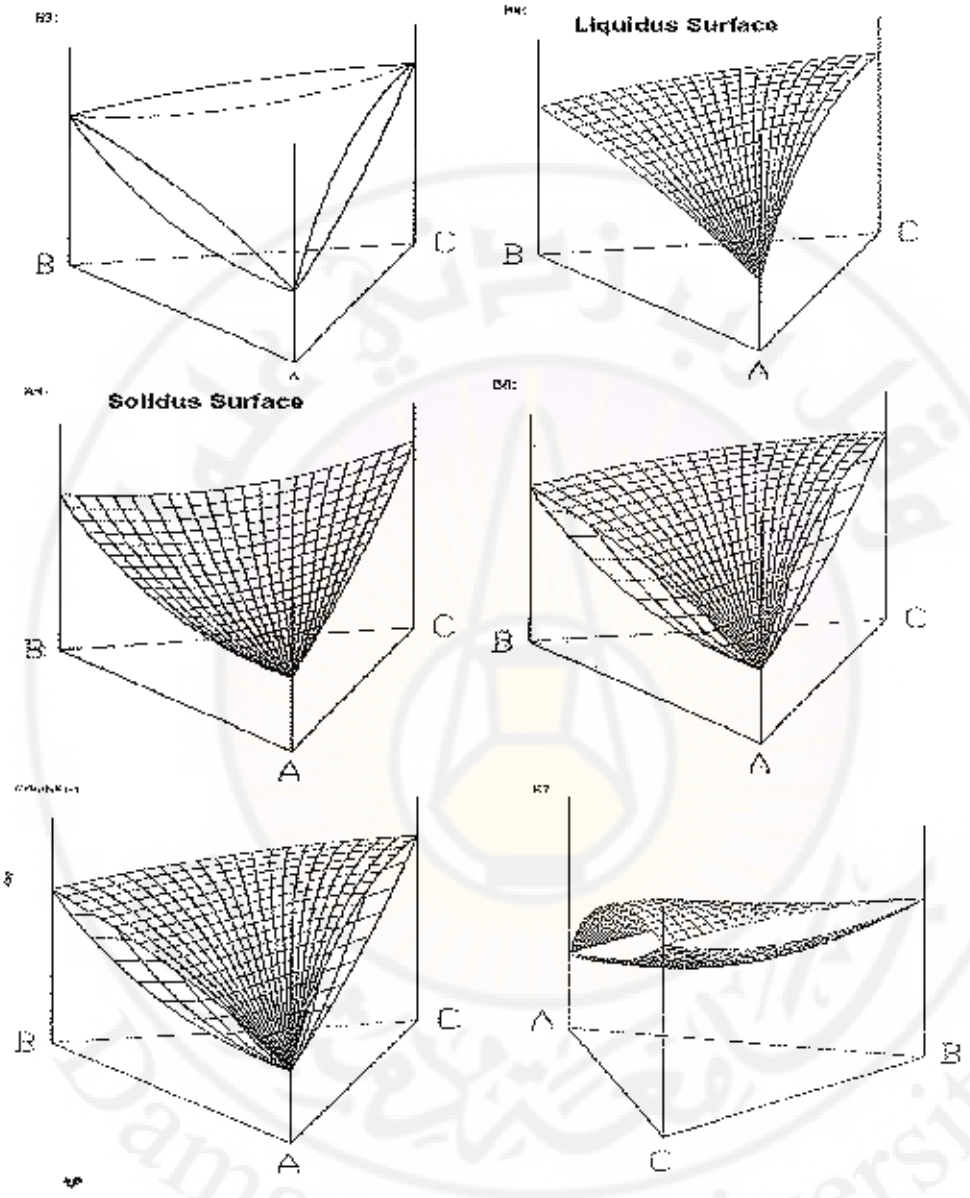
وبناء عليه يمكن دراسة أهم الأنظمة السبائكية الثلاثية وهي:

1- النظام الثلاثي المتماثل الخواص (**Ternary Isomorphous System**): هو نظام سبائكي ثلاثي فيه فقط طور صلب واحد بحيث تكون كل مركبات النظام السبائكي الثلاثي مذابة في المركبات الأخرى. لذلك فهذا النظام يتألف من ثلاثة أزواج تظهر المحلول الصلب الكلي. شكل(2-18).

سطح السيولة : يبين بالرسم درجات الحرارة التي تكون الخليطة الثلاثية فوقها بشكل سائل متجانس من أجل أي نسبة مزج كلية معطاة.

بينما سطح الصلابة: يرسم درجات الحرارة التي تحتها أشكال الطور الصلب المتجانس من أجل أي قيمة مزج لهذه الخليطة.





الشكل(2-18): النظام الثلاثي المتماثل الخواص.

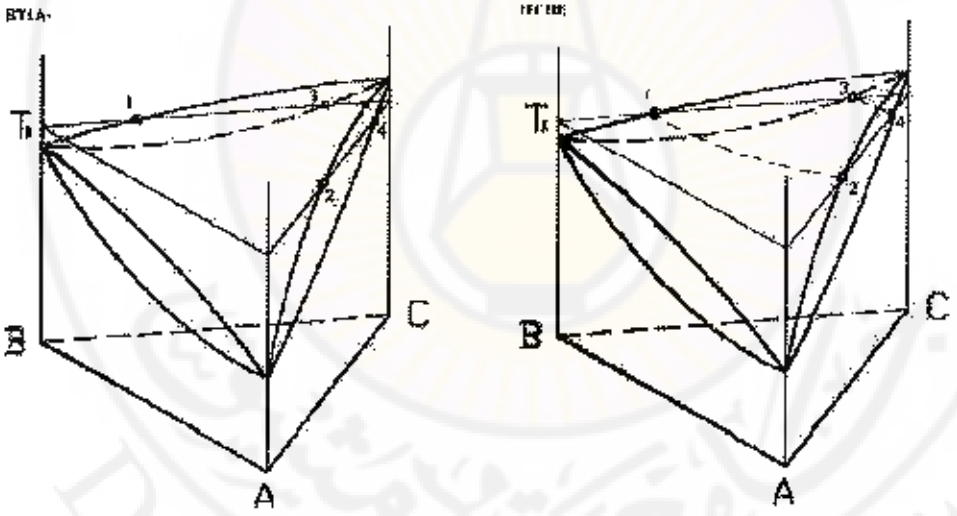
القطع عند درجة حرارة ثابتة: هو مقطع أفقي لمنحني الأطوار الثلاثية نحصل عليه من خلال تصور إجراء قطاع فراغي عند درجة حرارة ثابتة. بالإشارة إلى الأشكال BT_1A, BT_1B و BT_1C وبفرض T_1 درجة الحرارة الايزوترمية قيد الدراسة يقطع المستوي الأفقي المرسوم بالفراغ سطوح السيولة والصلابة عند النقاط 1, 2, 3, 4 وبالوصل بين النقاط 1 و 2 بمنحنيات تعكس سطح السيولة، وبالوقت نفسه بالوصل بين 3 و 4 نحصل على منحن يعكس منحني الصلابة. شكل(2-19)

خط الوصل بين النقاط 1 و 2 تمثل القطاع الأفقي عند درجة حرارة ثابتة لسطح السيولة أما خط الوصل بين النقاط 3 و 4 فتمثل القطع عند درجة حرارة ثابتة لسطح الصلابة.

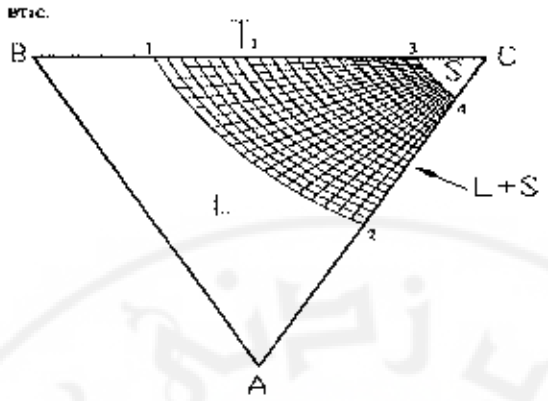
المساحة A-B-1-2 تمثل طور سائل متجانس.

المساحة C-3-4 تمثل طور صلب متجانس.

بينما المساحة 1-2-3-4 فتمثل منطقة الـ Mushy Zone حيث يتوافر فيها الطوران السائل والصلب.

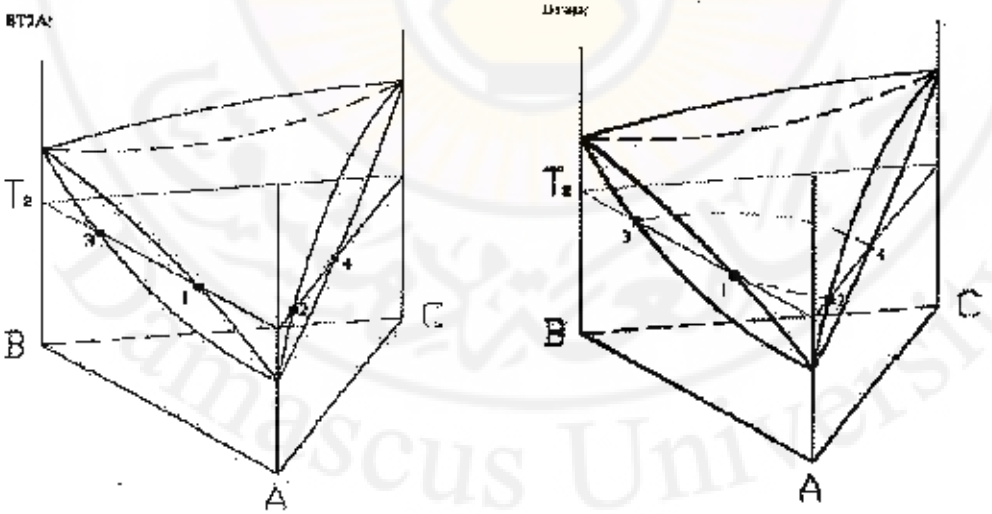


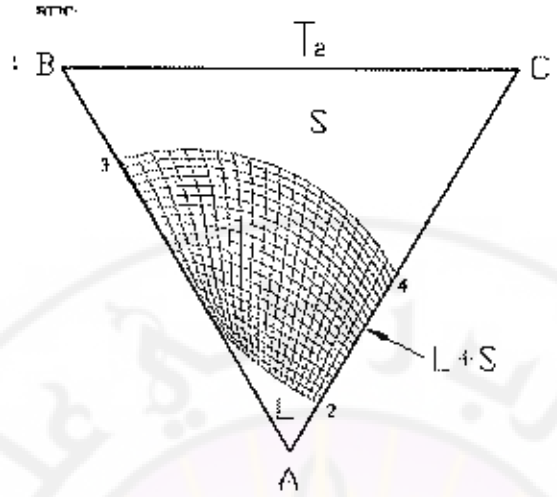
Damascus University



الشكل(2-19): القطع بمستو أفقي عند درجة حرارة ثابتة T_1 لمخطط التوازن الحراري للخلائط الثلاثية.

يأخذ قطاع آخر عند درجة حرارة ثابتة T_2 تحت درجة انصهار كل من العنصرين A و B وفوق درجة انصهار النقطة C نجد أن المساحة A-1-2 تمثل طور سائل متجانس، أما المساحة B-C-4-3 فتمثل طور صلب متجانس، والمساحة 1-2-3-4 تمثل منطقة وجود الطورين السائل والصلب معا. شكل (2-20).





الشكل(2-20): القطع بمستو أفقي عند درجة حرارة ثابتة T_2 لمخطط التوازن الحراري للخلائط الثلاثية.

لتحديد نسبة المزج الكيميائي للأطوار الموجودة وقيمة كل طور عندما يكون المزج الكيميائي في منطقة ذات طورين:

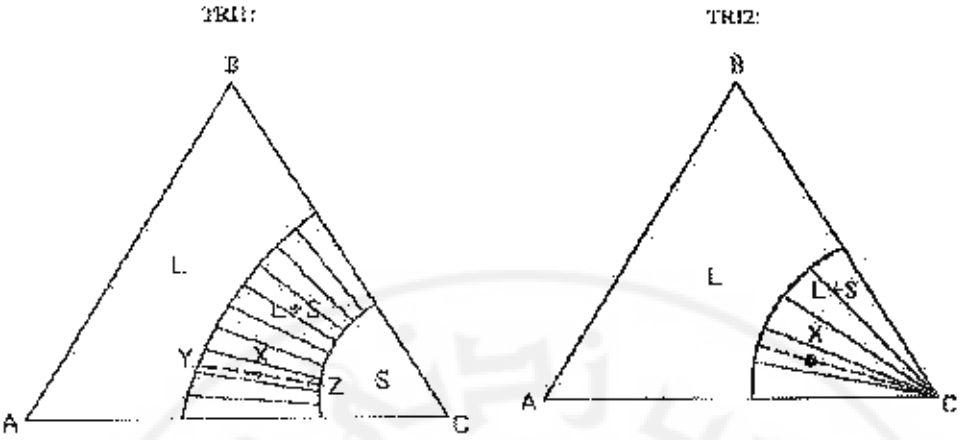
1- نحدد مكان السبيكة الثلاثية المراد دراستها باستخدام مثلث جيبس.

2- نرسم خط توصيل يمر من النقطة X ويقطع حدود الأطوار في Y و Z كما في الشكل(2-42). إن خط التوصيل (Tie Line) عبارة عن خط مستقيم يصل أي مزجين كيميائيين بالخليطة الثلاثية، وإن اتجاهات هذا الخط تتغير تدريجيا من خط توصيل لآخر دون حصول تقاطعات بين الخطوط، ويجب أن يكون واصلاً بين منطقتين طوريتين مختلفتين، ماعدا بالنسبة للنقاط المحاطة بالقمم الممثلة لتراكيز المعادن النقية فيصبح الخط واصلاً من القمة باتجاه الخليطة قيد الدراسة وحتى يقطع الخط المحيط الحدي.

3- المزج الكيميائي للطور السائل يعطى حسب موقع النقطة Y ضمن مثلث جيبس.

4- المزج الكيميائي للطور الصلب يعطى حسب موقع النقطة Z ضمن مثلث جيبس.

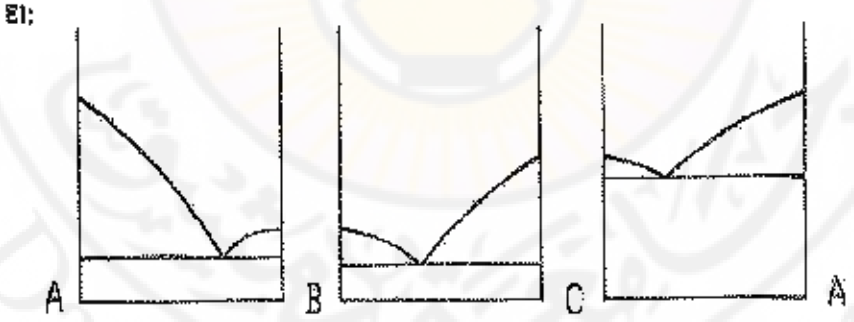
5- إن كمية كل طور بالخليطة نحدده باستخدام قانون العتلة: حيث نسبة الصلابة تساوي YX/YZ ونسبة السيولة ZX/YZ. كما في الشكل نفسه(2-21).

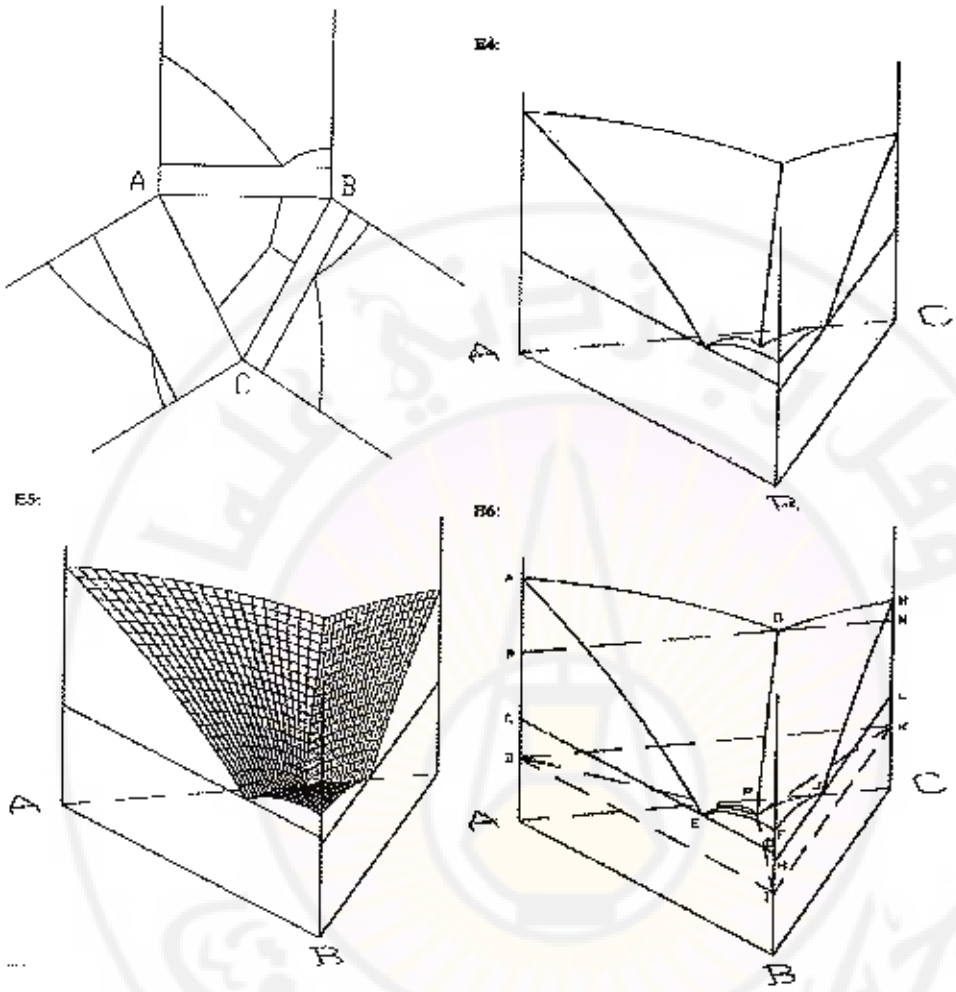


الشكل(2-21): طرق تحديد نسب المزج الكيمياني بمخططات التوازن الحراري للخلائط الثلاثية.

2- النظام الثلاثي اليوتكتيكي **Ternary Eutectic System**: لا وجود هنا للانحلال الصلب:

التفاعل اليوتكتيكي الثلاثي يكون بالشكل: $L = \alpha + \beta + \gamma$ حيث الطور السائل يتجمد مكونا ثلاثة أطوار صلبة منفصلة تؤدي إلى ثلاث بنيات يوتكتيكية ثنائية كلها غير قابلة للانحلال بالحالة الصلبة. كما بالشكل(2-22).





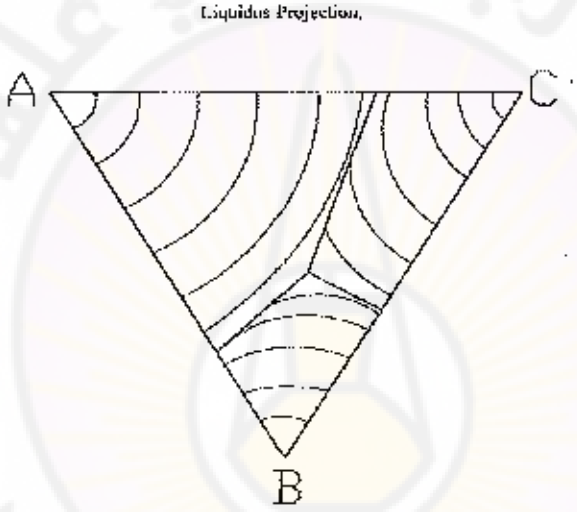
الشكل(2-22): تمثيل النظام الثلاثي السيانكي اليوتكتيكي.

تظهر مناطق الطور بإحدى الأشكال التالية:

- طور سائل متجانس.
- سائل + طور صلب وحيد.
- سائل + طوران صلبان.
- ثلاثة أطوار صلبة

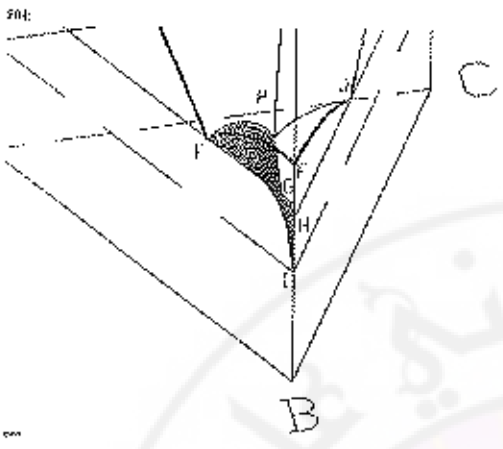
سطح السيولة (منحدر للأسفل) في كل أماكنه في الوسط إلى حد الوصول للنقطة اليوتكتيكية للنظام السبائكي الثلاثي التي سوف تكون عند درجة حرارة دون كل درجات الحرارة اليوتكتيكية للسبائك الثنائية منفصلة.

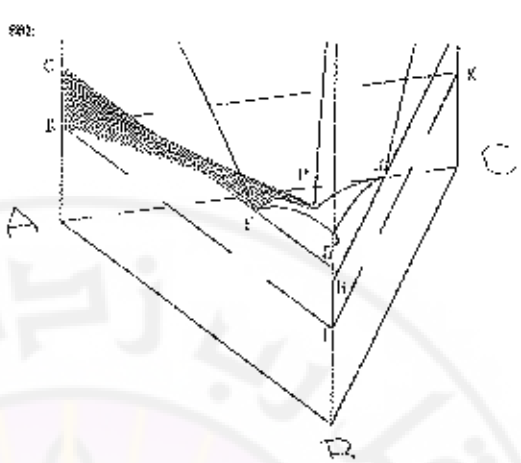
كل النقاط التي تقع بالفراغ دون سطح السيولة تتمثل بوجود طورين أو أكثر. مسقط سطح السيولة على المستوي يشير إلى مناطق الطور وإلى المناطق ذات الثبات الحراري، كما أن سطح السيولة سيمثل الحدود بين السائل وحيد الطور وبين مناطق (سائل + طور صلب). شكل(2-23).

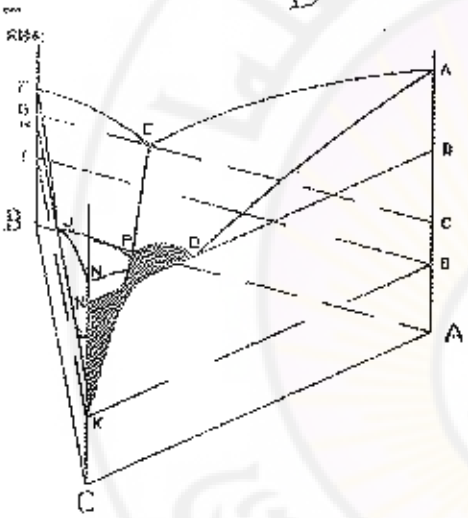


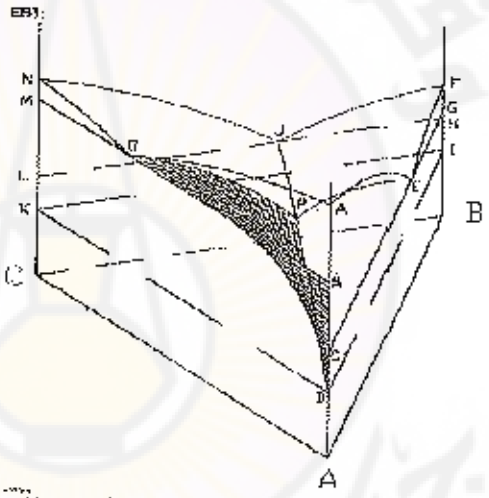
الشكل(2-23): تمثيل النظام السبائكي الثلاثي اليوتكتيكي كمسقط افقي.

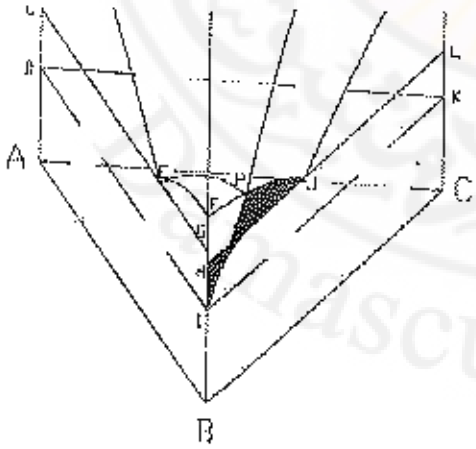
الخطوط المعادلة التي تقع بين منطقتين أو ثلاث مناطق طورية كما يظهرها الشكل(2-24) EB_1 تبين: أن السطح P-E-F-J يمثل الخطوط المعادلة بين منطقة الطور السائل ومنطقة الطورين (سائل + صلب)، بينما السطوح P-E-G-I-P و P-J-H-I-J-P فتمثل الخطوط المعادلة المنطقة التي فيها طوران (سائل + صلب) وبين منطقة (سائل + طورين صلبين).

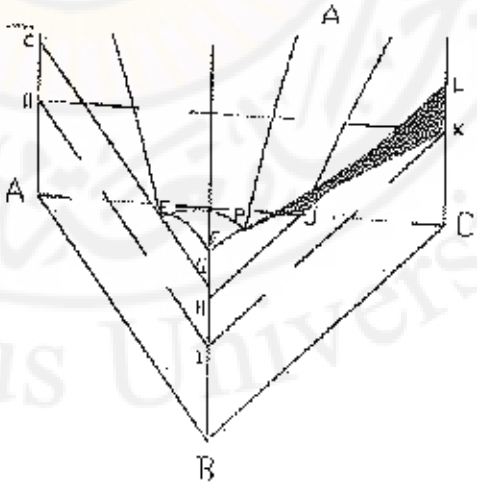

C
B

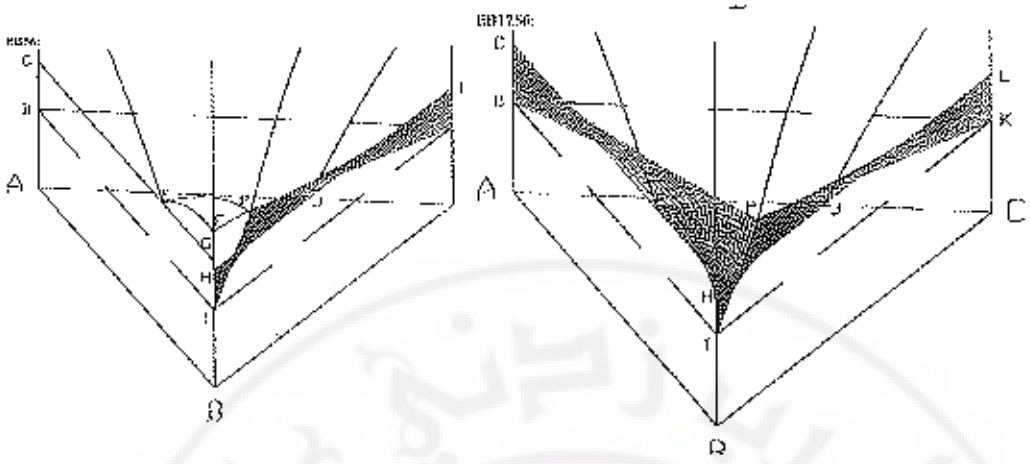

K
C
A
B


A
B
C
K
C
B
A


N
M
L
K
C
B
A

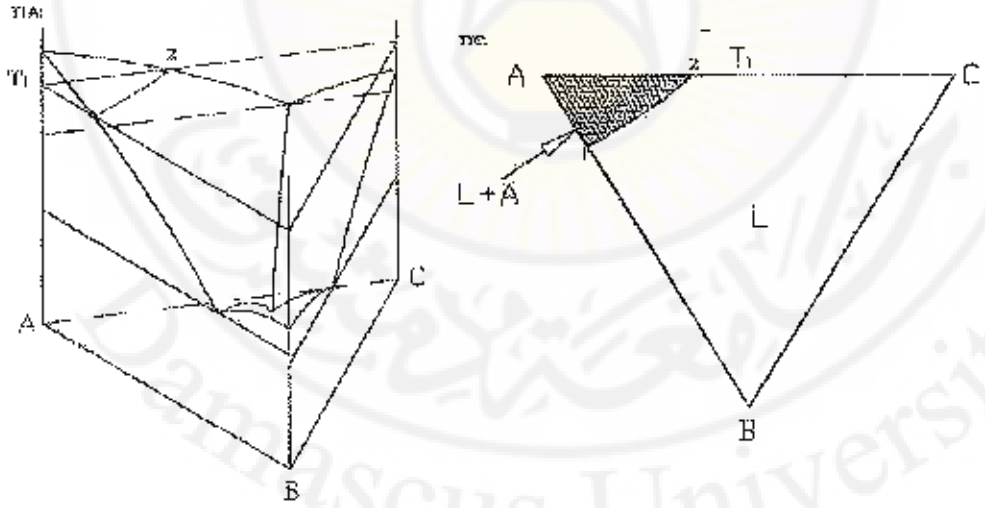

A
L
K
C
B


A
L
K
C
B



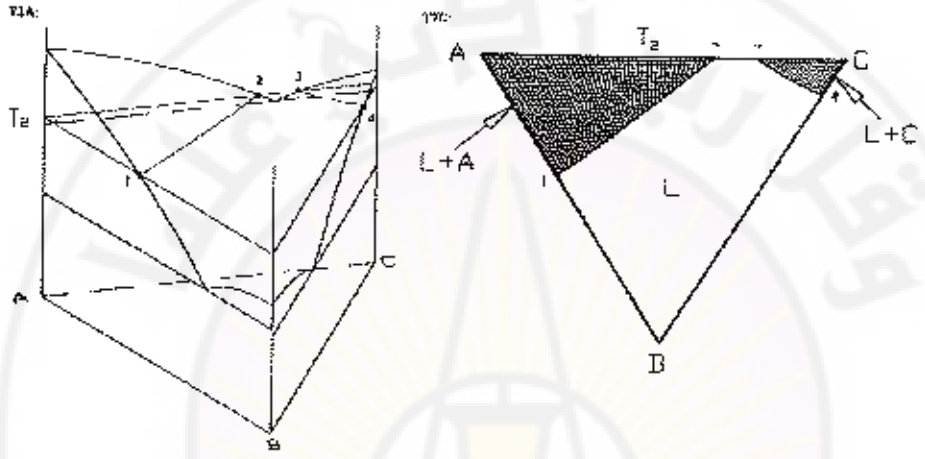
الشكل(2-24): تمثيل الخطوط المعادلة التي تقع بين منطقتين أو ثلاث مناطق طورية.

القطع بمستوٍ يكون عند درجة حرارة ثابتة T_1 أخفض من نقطة انصهار العنصر الخلائطي A وأعلى من نقطة انصهار كل من العنصر B و C والتي تميز وجود منطقتين: منطقة السيولة ومنطقة سائل + A، الخطوط المعادلة أو الحدية Boundary Lines بين هاتين المنطقتين تمثل بمنحنيات منسجمة مع سطح السيولة. شكل(2-25).



الشكل(2-25): تمثيل الخطوط المعادلة كمسقط أفقي.

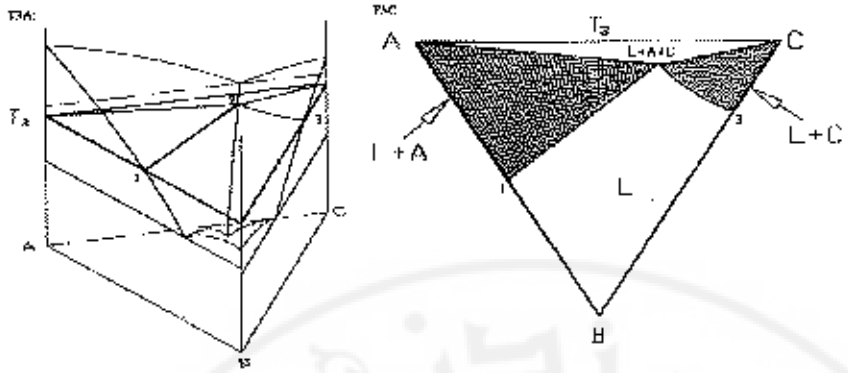
القطع بمستو يكون عند درجة حرارة ثابتة T_2 أخفض من نقطة انصهار العنصر الخلائطي A و العنصر C وأعلى من نقطة انصهار كل من العنصر B أي أعلى من درجة الحرارة اليوتكتيكية لـ A-C هذا القطاع سيظهر ثلاث مناطق طورية منطقة السيولة (L) ومنطقة L+A ومنطقة L+C، الخطوط المعادلة بين L و L+A تحدد من خلال نقاط قطع مستوي الثبات الحراري لسطح السيولة. شكل(2-26)



الشكل(2-26): تمثيل الخطوط المعادلة وفق مستو قطع جديد عند درجة ثبات حراري T_2.

القطع بمستو يكون عند درجة حرارة ثابتة T_3 أخفض من درجة حرارة الخط اليوتكتيكي A-C لكنها لا تزال فوق نقطة انصهار العنصر الخلائطي B القطاع الإيزوثيرمي، في هذه الحالة يتألف من أربع مناطق: سائل، سائل +A، سائل + C، و سائل + A + C مع ملاحظة أن النقاط 2 و 4 تتقارب وتتحرك ضمن مثلث جيبس. وهذا يمثل المسار الذي يصل النقاط اليوتكتيكية A-C مع النقطة اليوتكتيكية الثلاثية. شكل(2-27)

خطوط المعادلة الواقعة بين مناطق الطور الواحد والطورين، والواقعة بين مناطق الطورين ومناطق الأطوار الثلاثة رسمت، لكن منطقة الطور الوحيد ومنطقة الأطوار الثلاثة التقت عند نقطة منطقة الأطوار الثلاثة للمثلث وتدعى عقدة المثلث.



الشكل(2-27): تمثيل الخطوط المعادلة وفق مستو قطع جديد عند درجة ثبات حراري T_3.

<u>قانون المراحل الطورية المتجاورة:</u>

$$R_1 = R - D^- - D^+ >= 0$$

حيث إن:

R_1: تمثل قيمة بعدية لخطوط المعادلة بين مناطق الطور المتجاورة، إذ إنها تساوي الصفر (0) عند نقطة الاتصال وتساوي 1 لخطوط الاتصال وتساوي 2 لسطوح الاتصال.

R: تمثل قيمة بعدية تتعلق بالرسم البياني وبالقطع، فعلى سبيل المثال من أجل مستوي القطع الإيزوثيرمي $R = 2$.

D^-: تمثل عدد الأطوار غير الظاهرة والتي تقطع عرضيا خطوط المعادلة من منطقة ذات الطور الواحد للآخر.

D^+: تمثل عدد الأطوار الظاهرة والتي تقطع عرضيا خطوط المعادلة من منطقة ذات الطور الواحد للآخر.

أشكال التجاور بين الأطوار:

منطقة طور واحد مع منطقة طورية محددة بطورين يمثلها : خط.

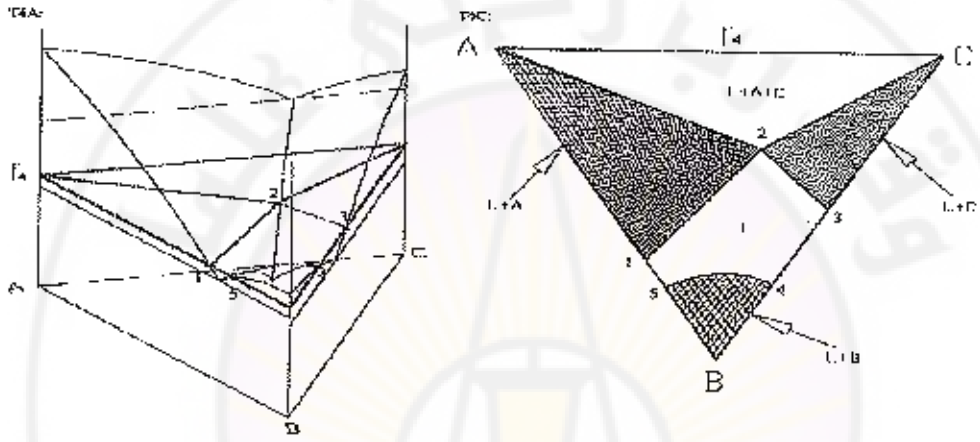
منطقة طور واحد مع منطقة طورية محددة بثلاثة أطوار تمثل بـ : نقطة.

منطقة طورين مع منطقة طورية محددة بثلاثة أطوار : عقدة – خط.

منطقة طورين مع منطقة طورية محددة بطورين : نقطة.

منطقة طور واحد مع منطقة طورية محددة بطور آخر وحيد تمثل بـ : نقطة.

القطع بمستو يكون عند درجة حرارة ثابتة T_4 أخفض من درجات انصهار كل من A و B C ودون خط اليوتكتيك A-C لكنها فوق درجات الحرارة اليوتكتيكة لكل من A-B و B-C. القطاع الإيزوثيرمي في هذه الحالة يتألف من خمس مناطق: سائل، سائل +A، سائل + B، سائل + C، و سائل + A + C مع ملاحظة بأن النقطة 2 ستتحرك بشكل إضافي ضمن مثلث جيبس باتجاه النقطة اليوتكتيكية للخليطة الثلاثية. شكل(2-28)

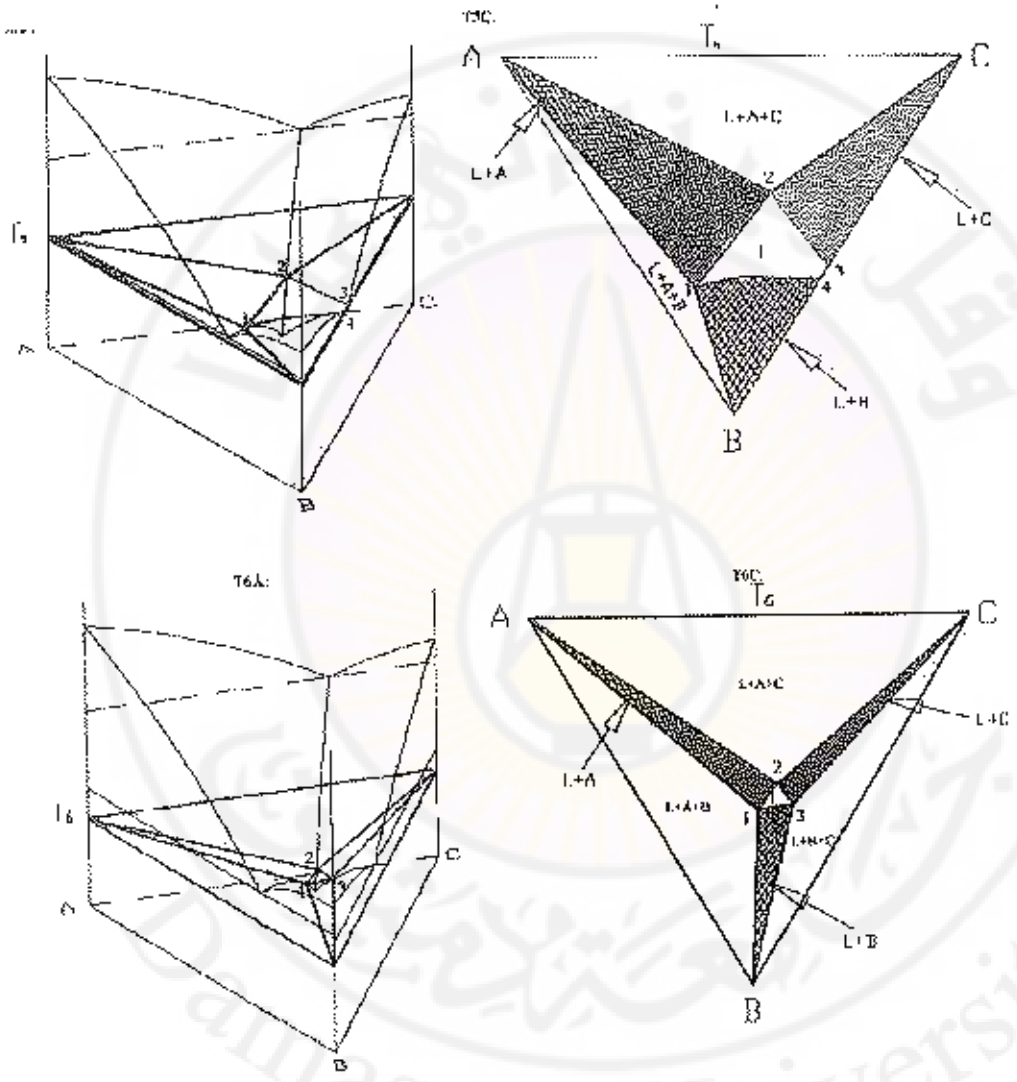


الشكل(2-28): تمثيل الخطوط المعادلة وفق مستو قطع جديد عند درجة ثبات حراري T_4.

القطع بمستو يكون عند درجة حرارة ثابتة T_5 فوق درجة حرارة خط اليوتكتيك B-C ولكنه أخفض من درجات انصهار كل من A و B C و باقي خطوط اليوتكتيك بالخليطة الثلاثية. القطاع الإيزوثيرمي في هذه الحالة يتألف من ست مناطق: سائل، سائل +A، سائل + B، سائل + C، سائل + A + C، و سائل + A + B بالإضافة إلى أن كل من النقطة 2 والنقطة 1 أيضا تتحرك ضمن مثلث جيبس باتجاه النقطة اليوتكتيكية للخليطة الثلاثية. شكل(2-29).

القطع بمستو يكون عند درجة حرارة ثابتة T_6 فوق درجة حرارة يوتكتيك الخليطة الثلاثية ولكنه أخفض من جميع درجات انصهار العناصر المركبة للخليطة A و B C و من باقي نقاط يوتكتيك المركبات الثنائية بالخليطة الثلاثية. القطاع الإيزوثيرمي في هذه الحالة يتألف من سبع مناطق: سائل، سائل +A، سائل+ B، سائل + C، سائل + A + C، سائل+A + B وسائل +

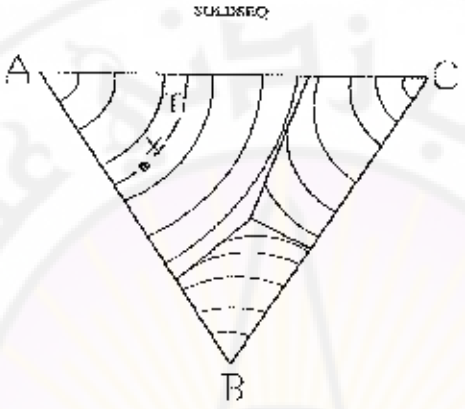
B + C . هنا بالإضافة إلى النقطتين 2 و 1 فإن النقطة 3 أيضا تتحرك ضمن مثلث جيبس باتجاه النقطة اليوتكتيكية للخليطة الثلاثية. لاحظ أن مناطق السيولة تتقارب ببطء باتجاه نقطة اليوتكتيك الثلاثية. شكل(2-30).



الشكل(2-30): تمثيل الخطوط المعادلة وفق مستو قطع جديد عند درجة ثبات حراري T_6.

تسلسل عملية التجمد (Solidification Sequence):

أعطي المزج الكلي للخليطة الثلاثية، عند مراحل تجمد الخليطة، بافتراض التجمد يتم بشروط توازنية وأن المزج الكلي أعطي عند النقطة X. برسم خط يعامد مستوي مسقط السيولة ماراً عبر X ويقطع سطح السيولة عند درجة الحرارة T_1. شكل(2-31) لجميع درجات الحرارة الواقعة في مجال حراري $T > T1$ يكون هناك طور سائل متجانس وحيد.



الشكل(2-31): تسلسل عملية التجمد في نظام سبانكي ثلاثي.

يبدأ التجمد عندما تصبح درجة الحرارة $T = T_1$ حيث يظهر أول طور صلب هو A. وعندما تصل درجة الحرارة إلى $T < T_1$، عندها تبدأ ترسبات العنصر A بالظهور، ومع الانخفاض بدرجة الحرارة فإن نسبة كمية الطور السائل تترحل على الخط XY، على سطح السيولة باتجاه النقطة Y. لنفرض درجة الحرارة عند Y هي T_2 فعند درجات حرارة $T_2 < T < T_1$، فهناك طوران في حالة التوازن هما A والسائل L. شكل(2-32).

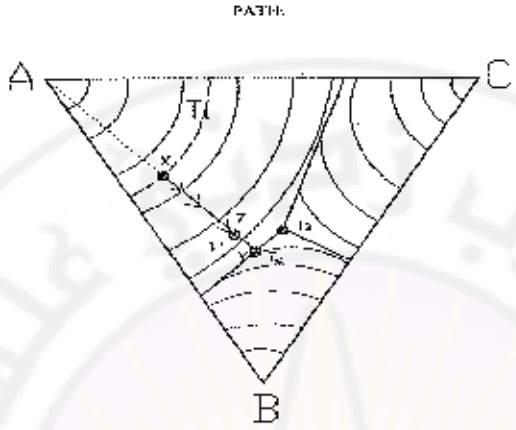
لكي نحدد مقدار كل طور موجود، نحتاج إلى تثبيت درجة الحرارة أولا. عندما تكون درجة الحرارة $T = T'$ عند النقطة Z نستخدم قانون العطلة العكسي:

نسبة السائل بالخليطة X يساوي $\frac{AX}{AZ}$ ونسبة العنصر A يساوي $\frac{XZ}{AZ}$

المزج الكيميائي للطور السائل يحدد من نسبة مزج النقطة Z ضمن مثلث جيبس.

عند النقطة Y حيث $T = T_2$ الطور الصلب الثاني B يبدأ بالترسب ضمن المجال الحراري T_2 $T > T_2$ كلا الطورين الصلبين A , B يوجدان في حالة توازن حراري مع السائل L.

كلا الطورين الصلبين A و B يكونان راسباً مختلطاً مع الانخفاض بدرجة الحرارة. شكل(2–33) التحليل عندما تكون درجة الحرارة "T = T على سبيل المثال عند النقطة M . تركيب السائل L يعطى بمعرفة تركيب النقطة M ضمن مثلث جيبس للسبيكة الثلاثية.



الشكل(2-32): تسلسل عملية التجمد في نظام سبائكي ثلاثي وظهور الطور A.

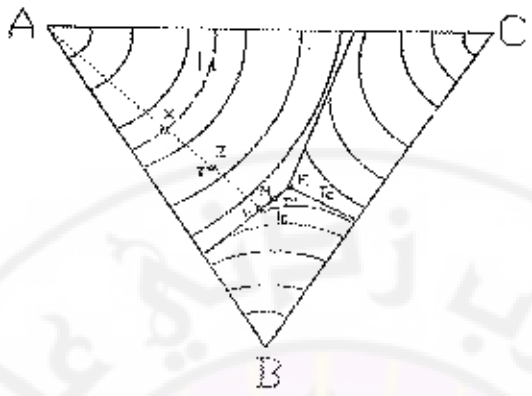
كيف نحدد كمية كل من A و B و السائل L ؟ بافتراض درجة الحرارة "T تمثل النقطة M ننشئ المثلث A-B-M الممثل للنظام السبائكي الثلاثي الذي يكون عنده المزج الكلي X ممثلاً في ثلاثة تراكيز:

نسبة المركب A تساوي: $\frac{PX}{PA}$

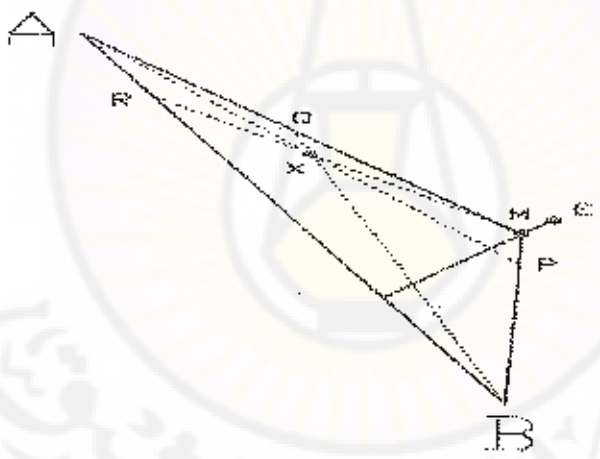
نسبة المركب B تساوي: $\frac{QX}{QB}$

نسبة السائل L تساوي: $\frac{RX}{RM}$

كما يبينها الشكل (2–34)



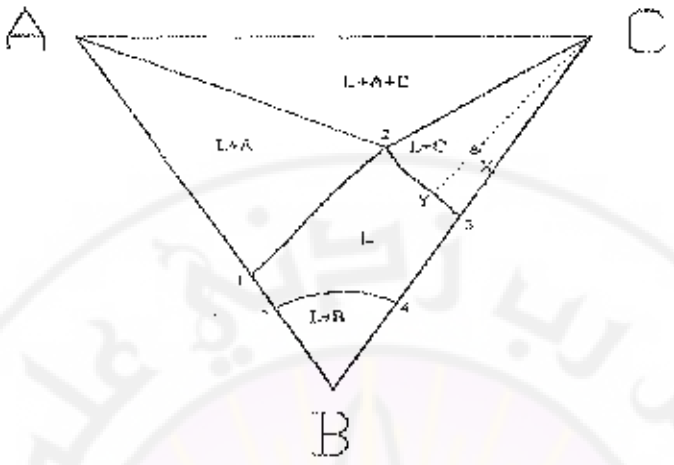
الشكل(2-33): تسلسل عملية التجمد في نظام سبائكي ثلاثي و ظهور الطورين A و B.



الشكل(2-34): طريقة حساب نسبة تركيب الأطوار بالمخطط السبائكية الثلاثية.

تحليل نسبة الأطوار عند درجة حرارة معطاة:

باستخدام القطع عند درجة حرارة ثابتة $T = T_2$ تمرسم لكل التراكيز الواقعة ضمن منطقة السائل L، المزج الكيميائي للطور السائل هو نفسه يمثل نسبة المزج الكلية. شكل(2-35).



الشكل(2-35): تحليل نسبة الأطوار عند درجة حرارة معطاة.

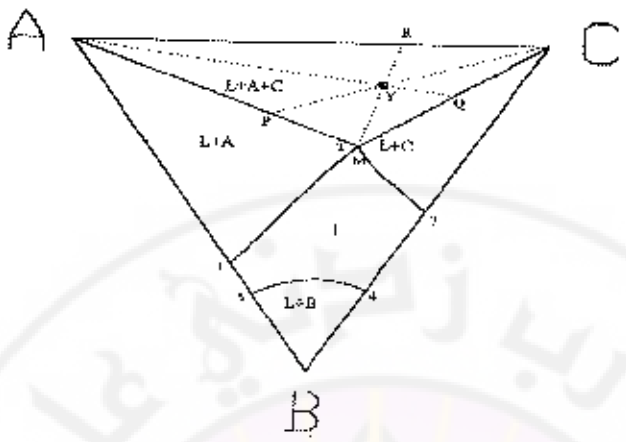
إذا أصبحت نسبة المزج الكلي مؤلفة من طورين، على سبيل المثال L + C عندها:

1. نحدد مكان المزج الكلي X ضمن مثلث جيبس.
2. نرسم خطوط في هذه الحالة تصل النقطة C بالخط 3-2 ونمر من X ونقطع الخط 3-2 في Y.
3. نطبق قانون العتلة العكسي لتحديد كمية كل من L و C.

نسبة السائل L تساوي: $\frac{CX}{CY}$

نسبة المركب C تساوي: $\frac{YX}{CY}$

نسبة المزج الكيميائي لـ C في هذه الحالة هي 100%، المزج الكيميائي للسائل L يعطى من خلال تحديد تركيز النقطة Y الممثلة في مثلث جيبس. شكل(2-36).



الشكل(2-36): تحديد نسبة تركيز العناصر بالخليطة الثلاثية عند درجة حرارة معطاة.

إذا كان المزج الكلي ممثلا لثلاثة أطوار سبائكية، على سبيل المثال: L+ A+C:

1. نحدد مكان المزج الكلي Y ضمن مثلث جيبس.
2. نرسم الخطوط المستقيمة التالية: A-Y-Q، M-Y-R، و C-Y-P.
3. نطبق قانون العتلة العكسي لتحديد كمية كل من L و A و C:

نسبة السائل L تساوي: $\frac{YR}{MR}$

نسبة المركب A تساوي: $\frac{QY}{QA}$

نسبة المركب C تساوي: $\frac{PY}{PC}$

نسبة المزج الكيميائي لـ A في هذه الحالة هي 100%، ونسبة المزج الكيميائي لـ C في هذه الحالة كذلك تساوي 100%، المزج الكيميائي للسائل L يعطى من خلال تحديد تركيز النقطة Y الممثلة في مثلث جيبس. الشكل(2-36) نفسه.

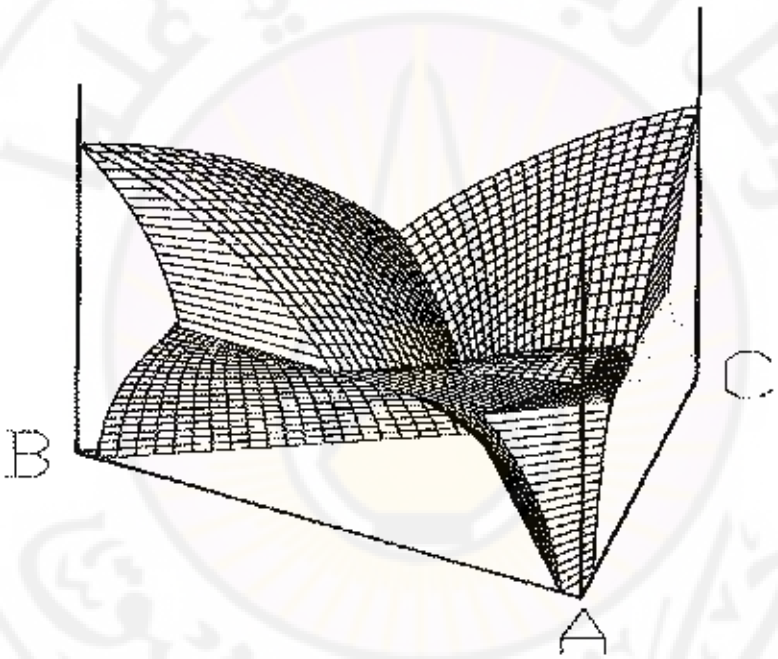
بعض القوانين المتعلقة بمخططات التوازن الثلاثية:

قاعدة الحدود Boundary Rule: أي منطقة طور P يمكن أن يحدها فقط بمناطق تحتوي عدداً من الأطوار P +/- 1 طور، حيث P تشير إلى عدد الأطوار.

قاعدة تقوس الحدود Boundary Curvature Rule: حدود مناطق الطور الواحد يجب أن تتماشى مع تقوسات الحدود المستنبطة ضمن مناطق الطور الثنائي المجاور.

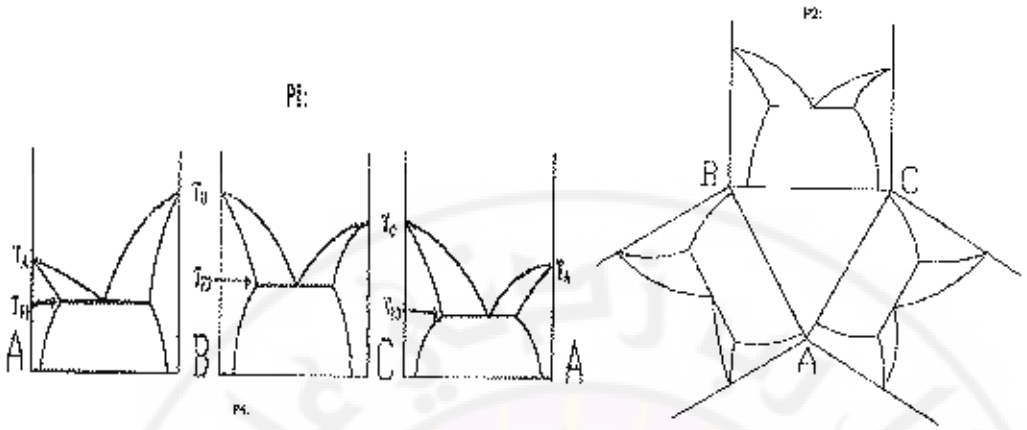
قاعدة الانحلال Solubility Rule: كل المركبات تنحل ولكن بنسبة معينة في كل الأطوار.

3- **النظام الثلاثي اليوتكتيكي Ternary Eutectic System**: مع وجود الانحلال الصلب:



الشكل(2-37): تمثيل للنظام السباكي الثلاثي مع وجود انحلال صلب.

تفاصيل هذا الشكل تبينه الرسومات التالية:



حيث أن:

T_A: نقطة انصهار العنصر A بالخليطة الثلاثية.

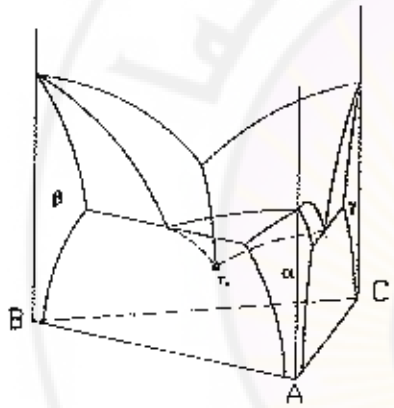
T_B: نقطة انصهار العنصر B بالخليطة الثلاثية.

T_C: نقطة انصهار العنصر C بالخليطة الثلاثية.

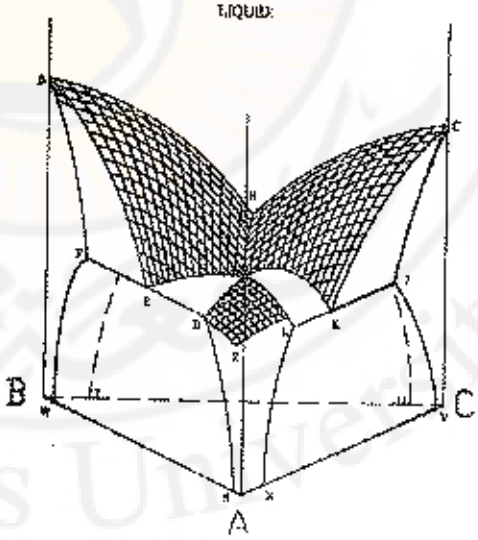
T_{E1}: درجة حرارة الخط اليوتكتيكي A-B.

T_{E2}: درجة حرارة الخط اليوتكتيكي B-C.

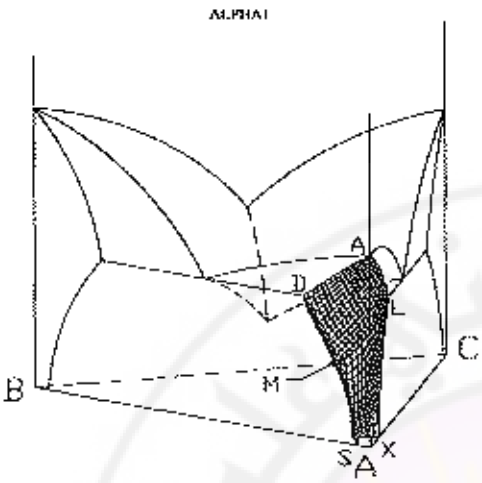
T_{E3}: درجة حرارة الخط اليوتكتيكي C-A.



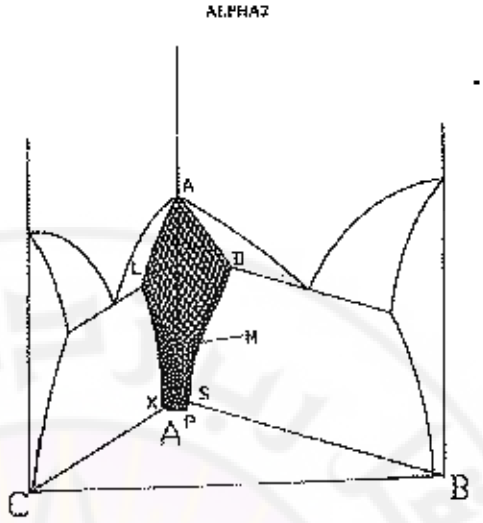
الشكل(2-38): رسم تخطيطي رئيسي للنظام السباتكي الثلاثي مع وجود النقطة اليوتكتيكية Ic و مناطق الطور الصلب الوحيد



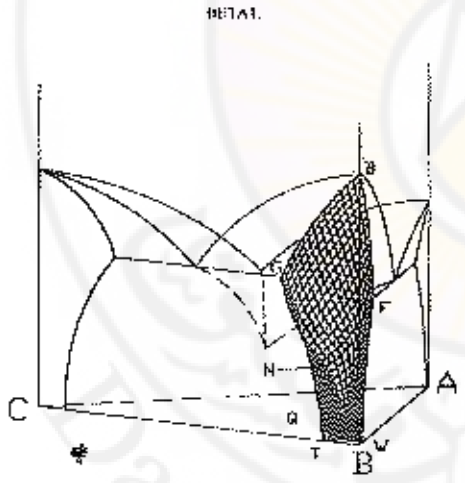
الشكل(2-39): كل سطوح السيولة (α+L) باللون الأحمر، (β+L باللون الأزرق، و (γ+L باللون الأخضر).



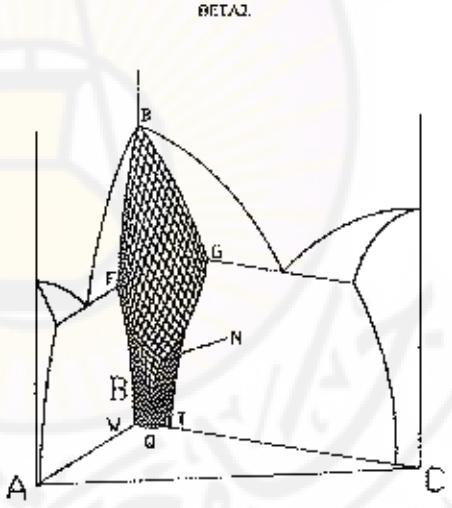
الشكل(2-40): منطقة الطور المفرد α يظهر بالزاوية A.



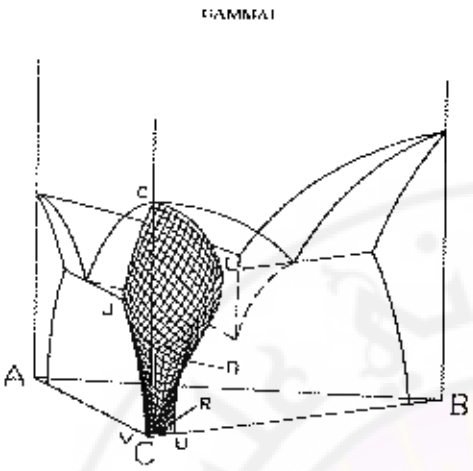
الشكل(2-41): منطقة الطور المفرد α يظهر من الجانب C-B.



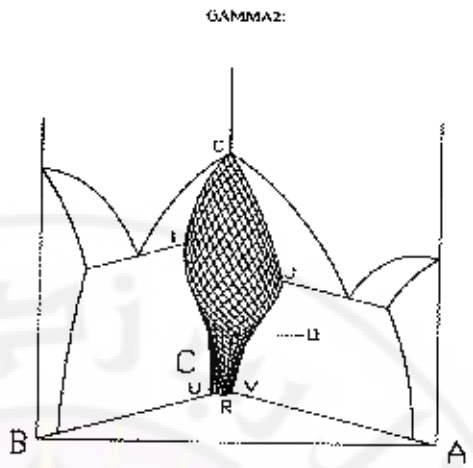
الشكل(2-42): منطقة الطور المفرد β يظهر بالزاوية B.



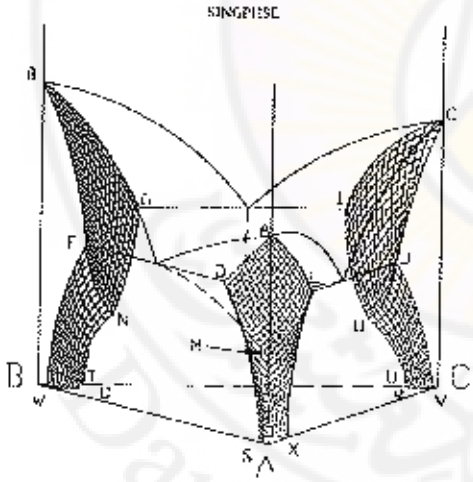
الشكل(2-43): منطقة الطور المفرد β يظهر من الجانب A-C.



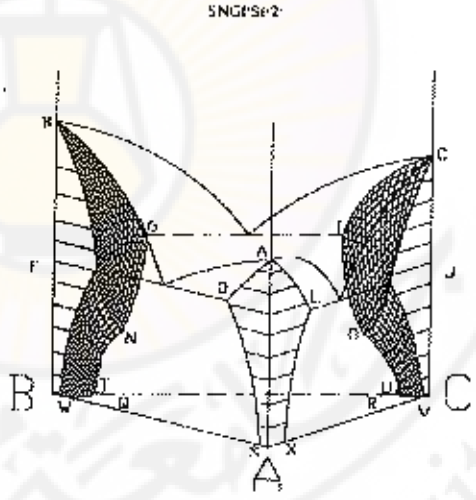
الشكل(2-44): منطقة الطور المفرد γ يظهر بالزاوية C.



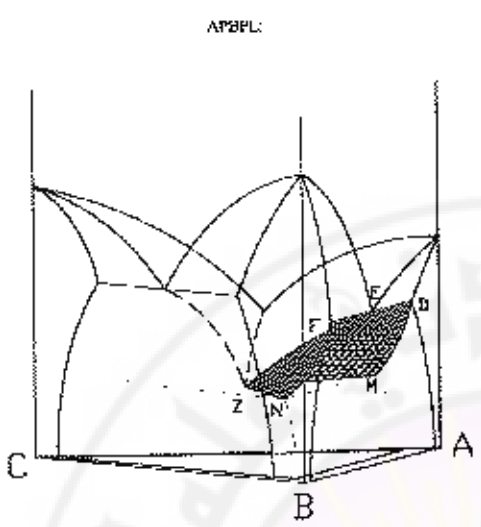
الشكل(2-45): منطقة الطور المفرد γ يظهر من الجانب B-A.



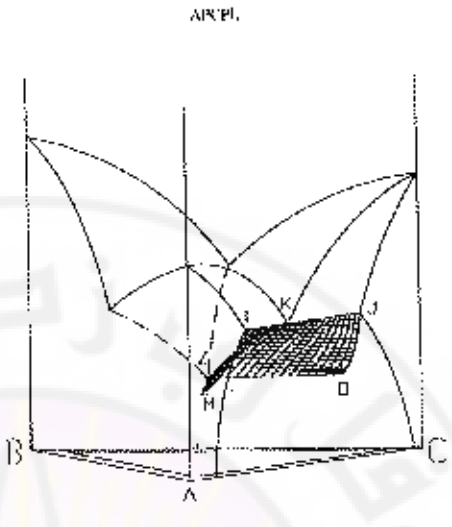
الشكل(2-46): حدود متاخمة بين منطقة الطور المفرد ومناطق الطورين.



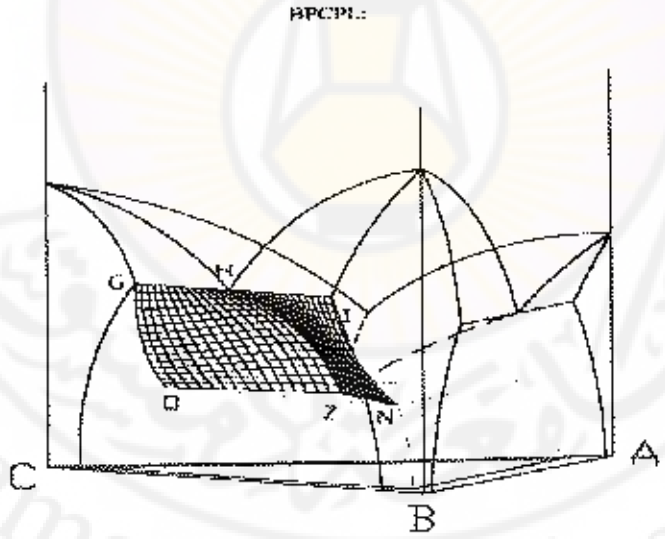
الشكل(2-47): مناطق الطور المفرد α، β، γ.



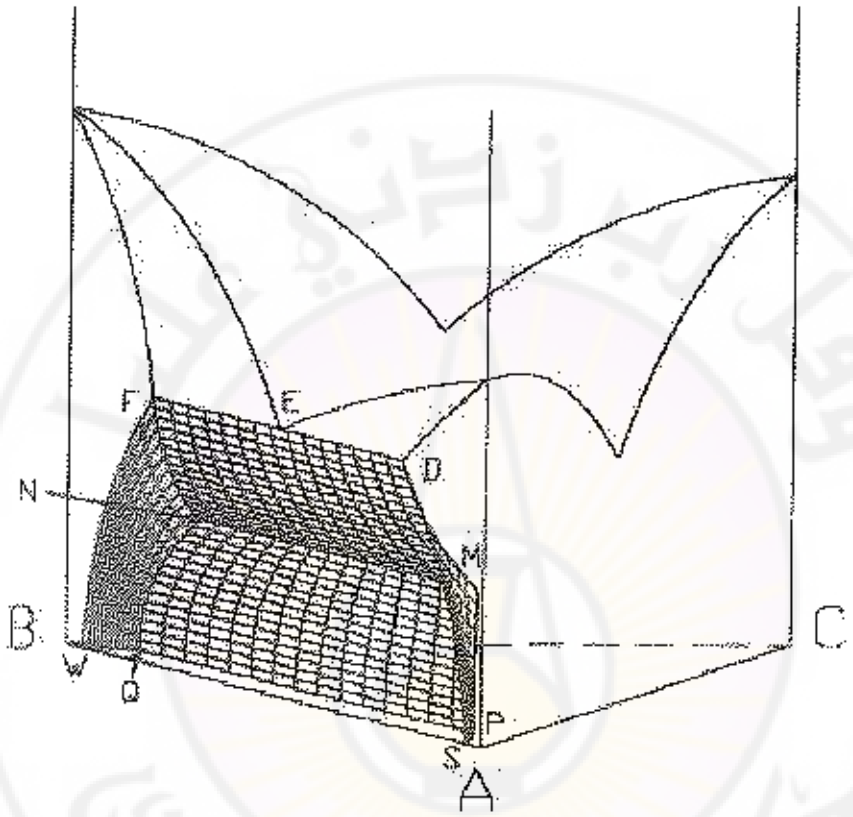
الشكل(2-48): منطقة ثلاثية الأطوار: 2 صلب وطور سائل (α+β+L).



الشكل(2-49): منطقة ثلاثية الأطوار: 2 صلب وطور سائل (α+γ+L).



الشكل(2-50): منطقة ثلاثية الأطوار: 2 صلب وطور سائل (β+γ+L).



الشكل(2-51): منطقة ذات طورين α و β

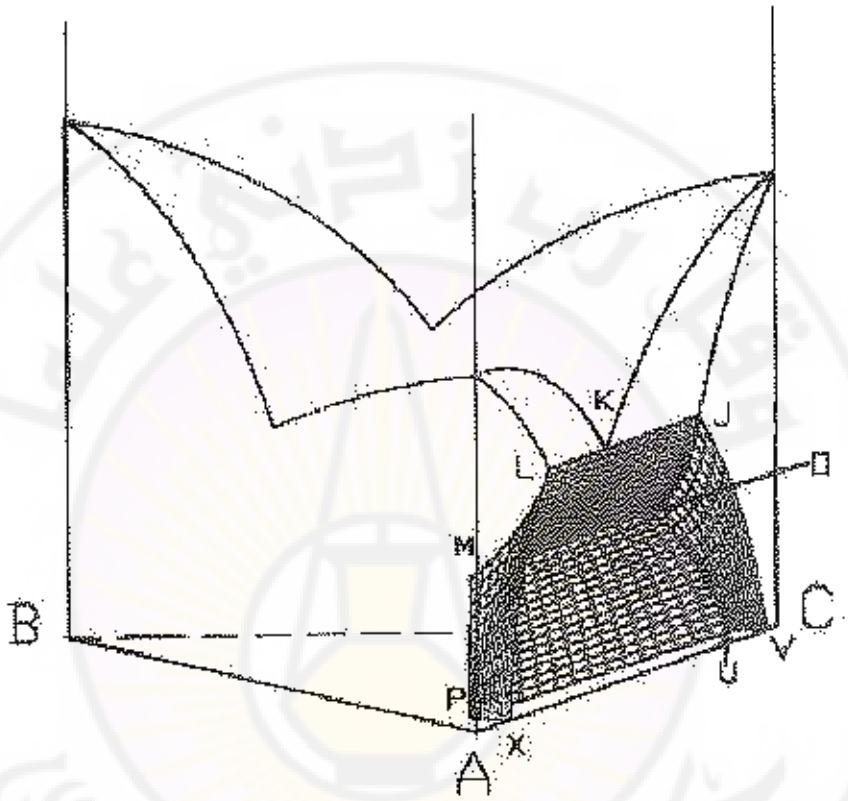
DMPS: حدود متاخمة لمنطقة α-β ولمنطقة α.

FNQW: حدود متاخمة لمنطقة α-β ولمنطقة β.

FEDMN: حدود متاخمة لمنطقة α-β ولمنطقة ثلاثية الطور (طورين صلبين وطور سائل).

NMPQ: حدود متاخمة لمنطقة α-β ولمنطقة ثلاثية الطور (ثلاثة أطوار صلبة).

APC



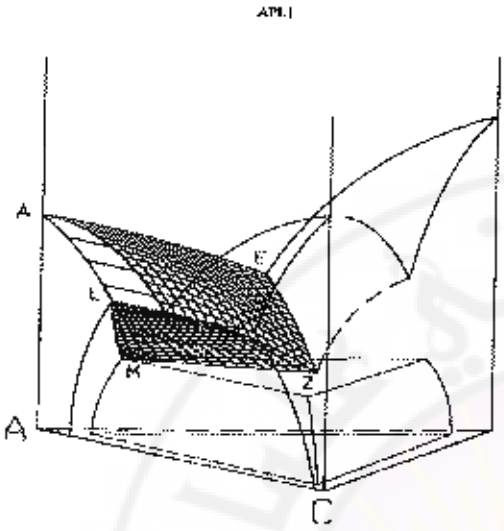
الشكل(2-52): منطقة ذات طورين α و γ

LMPX: حدود متاخمة لمنطقة γ-α ولمنطقة α.

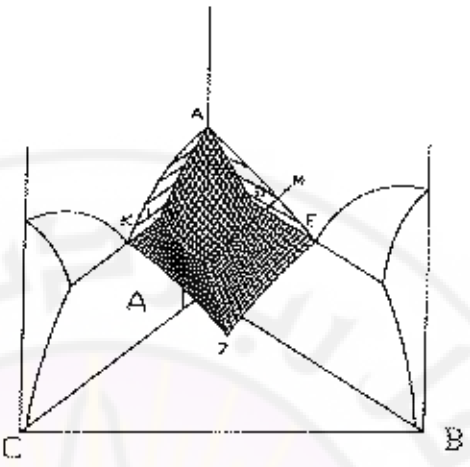
JOUV: حدود متاخمة لمنطقة γ-α ولمنطقة γ.

LKJOM: حدود متاخمة لمنطقة γ-α ولمنطقة ثلاثية الطور (طورين صلبين وطور سائل).

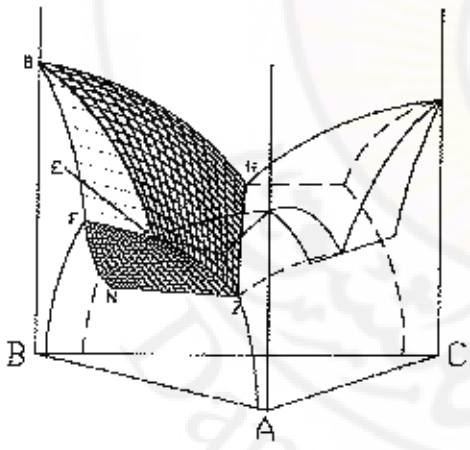
MOPU: حدود متاخمة لمنطقة γ-α ولمنطقة ثلاثية الطور (ثلاثة أطوار صلبة).



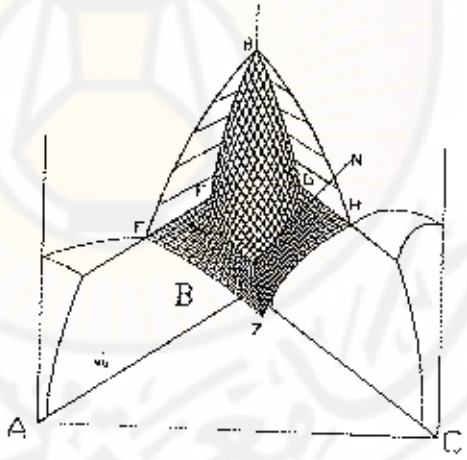
الشكل(2-53): منطقة ذات طورين L + α.



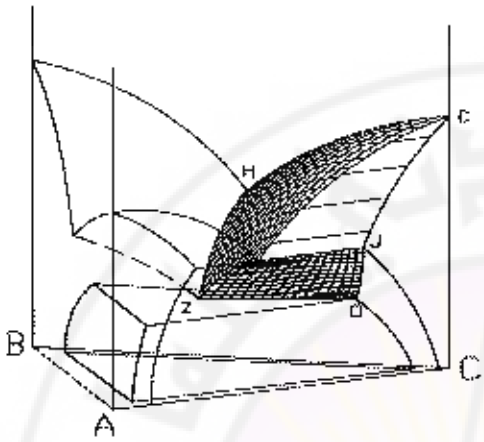
الشكل(2-54): منطقة ذات طورين L + α بدون سطح سيولة.



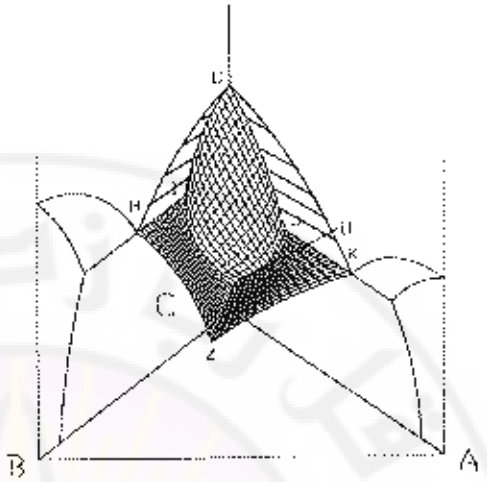
الشكل(2-55): منطقة ذات طورين L + β.



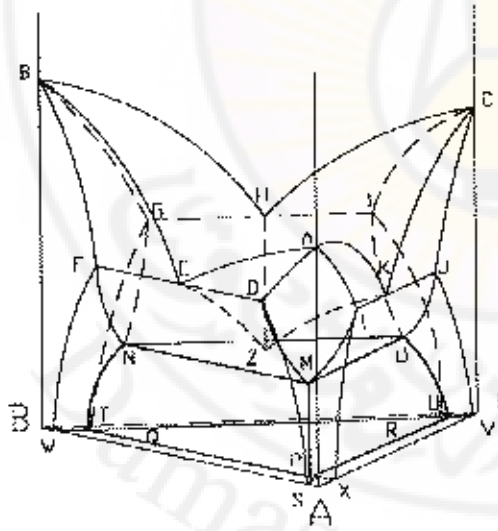
الشكل(2-56): منطقة ذات طورين L + β بدون سطح سيولة.



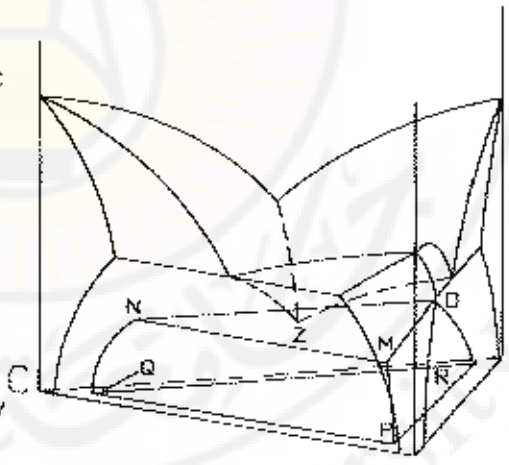
الشكل(2-57): منطقة ذات طورين L + γ.



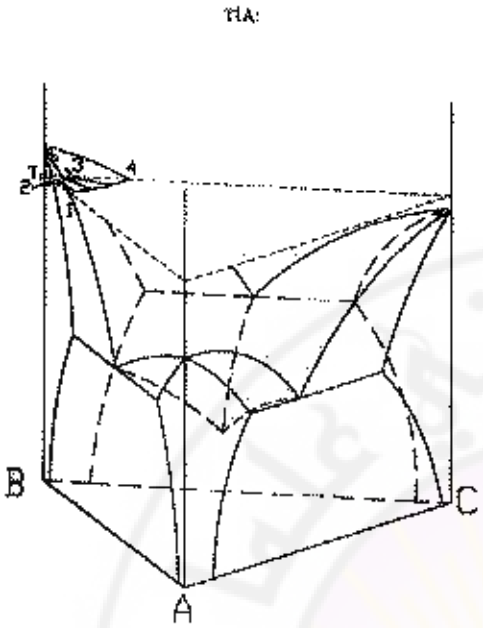
الشكل(2-58): منطقة ذات طورين L + γ بدون سطح سيولة.



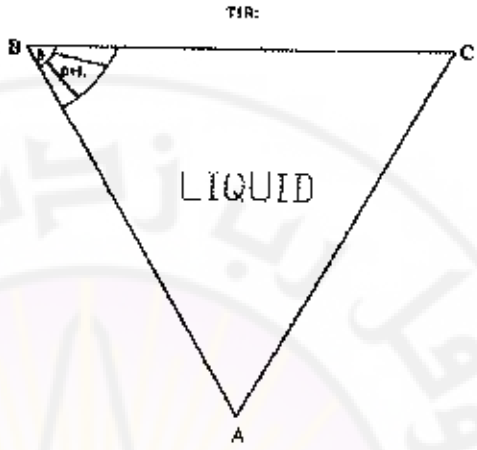
الشكل(2-59): منحني الاتزان الحراري لخليطة ثلاثية رسمت عليها الأطوار الثلاثة α+β+γ.



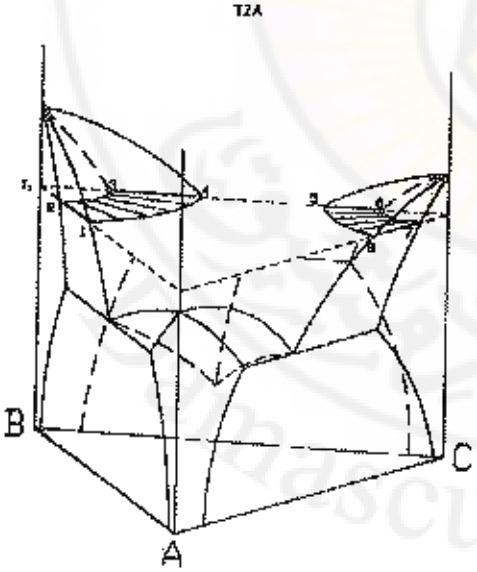
الشكل(2-60): منطقة تتألف من الأطوار الثلاثة α+β+γ (كلها صلبة).



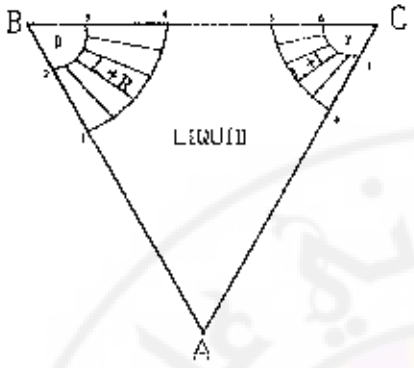
الشكل(2-61): قطاع عند درجة حرارة ثابتة $T_1 < T_B$ ولكنها أكبر من T_A و T_C.



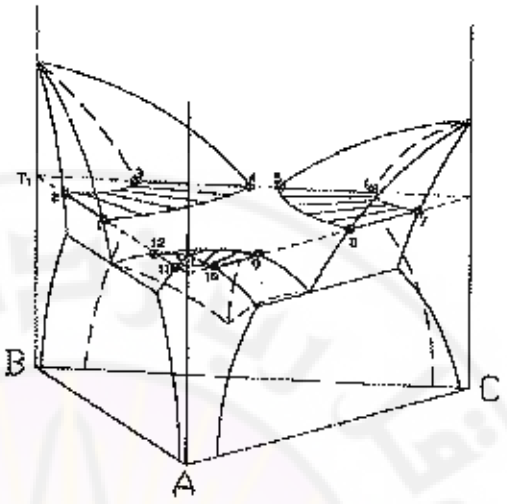
الشكل(2-62): قطاع عند درجة حرارة ثابتة $T = T_1$.



الشكل(2-63): قطاع عند درجة حرارة ثابتة $T_A < T_2$ ولكنها أصغر من T_B و T_C.



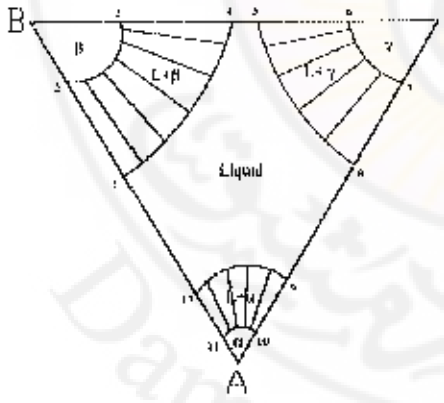
الشكل(2-64): قطاع عند درجة حرارة ثابتة $T = T_2$.



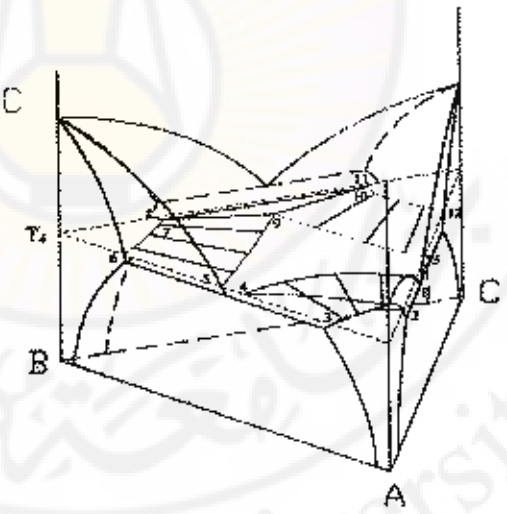
الشكل(2-65): قطاع عند درجة حرارة ثابتة

$T_3 < T_A , T_B , T_C$

ولكن $T_3 > T_{E1} , T_{E2} , T_{E3}$.

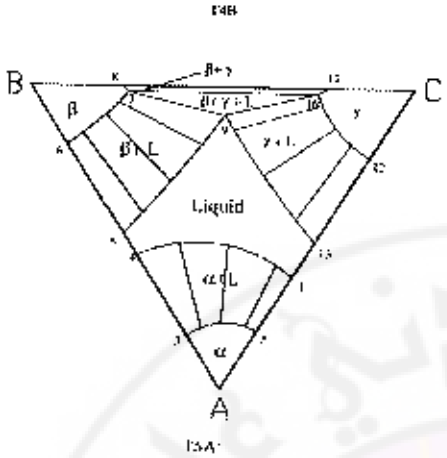


الشكل(2-66): قطاع عند درجة حرارة ثابتة $T = T_3$.

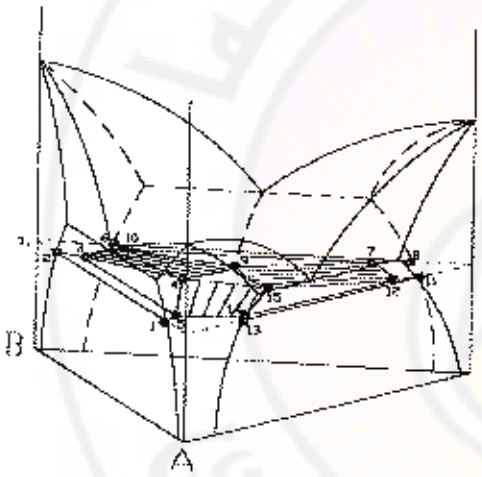


الشكل(2-67): قطاع عند درجة حرارة ثابتة

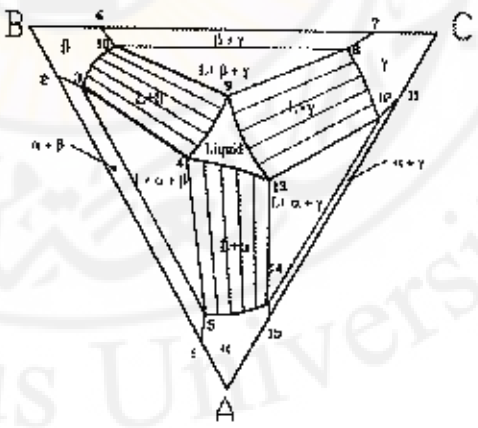
$T_4 < T_{E2}$ ولكن $T_4 > T_{E1} , T_{E3}$.



الشكل(2-68): قطاع عند درجة حرارة ثابتة $T = T_4$.

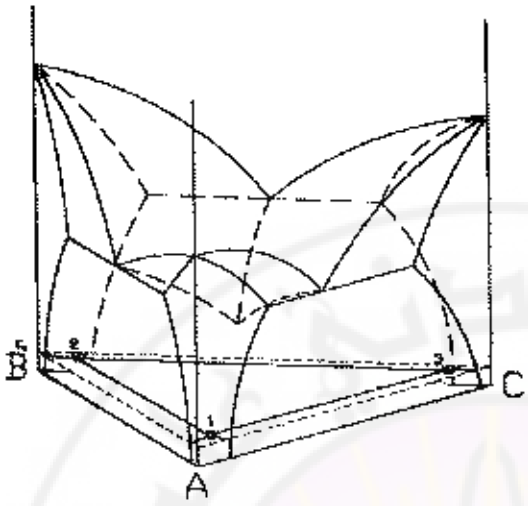


الشكل(2-69): قطاع عند درجة حرارة ثابتة أخفض من كل نقاط التحولات الميونكتيكية الثنائية ولكنها أعلى من نقطة الميونكتيك الثلاثية.



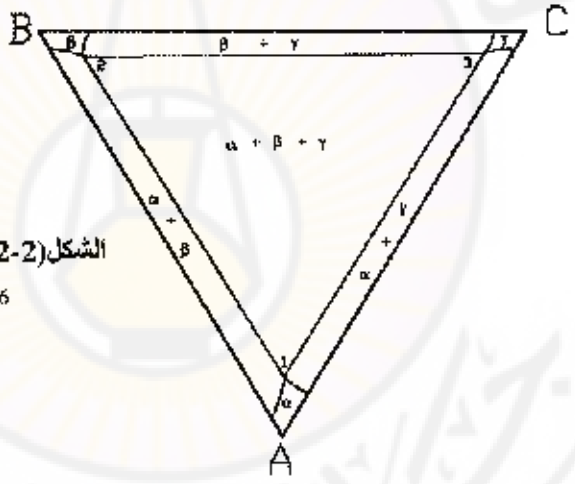
الشكل(2-70): قطاع عند درجة حرارة ثابتة $T = T_5$.

T6A:



الشكل(2-71): قطاع عند درجة حرارة ثابتة تقطة التحول اليوتكتيكية الثلاثية T_E.

T6B:

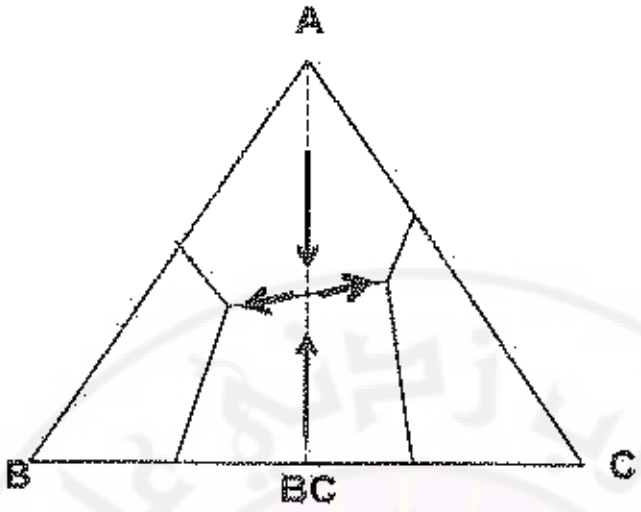


الشكل(2-72): قطاع عند درجة حرارة ثابتة $T = T_6$.

خطوط Alkamade:

هو أي خط يوصل تركيب البلورات الأولية الأساسية لمنطقتين تملكان خطاً متاخماً مشتركاً.

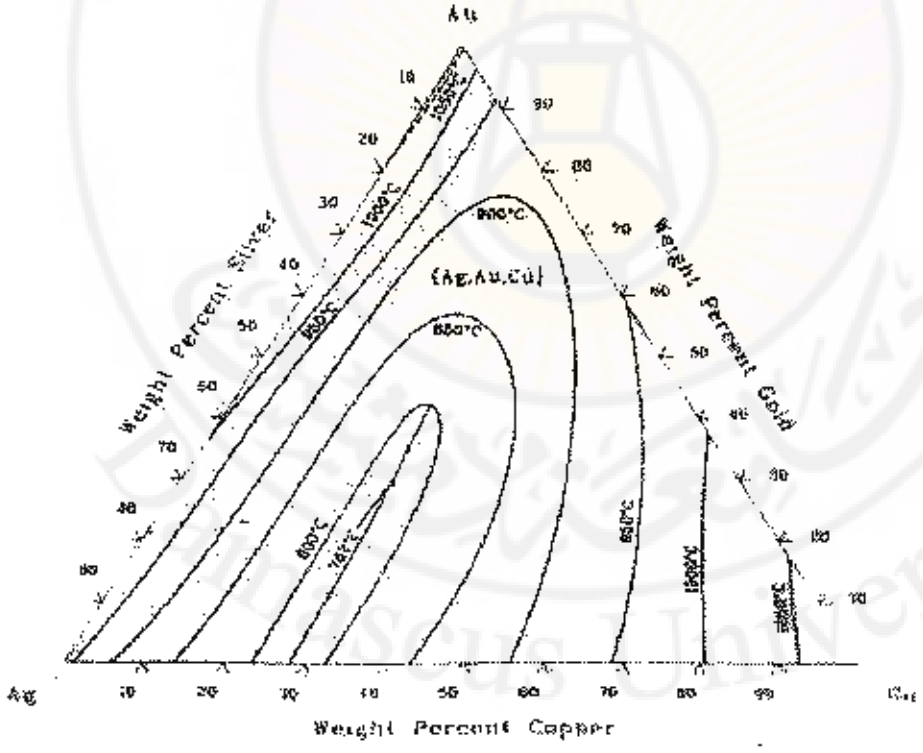
نظرية Alkamade: نقاط تقاطع الخطوط المجاورة مع الخطوط الممثلة لخطوط Alkamade تمثل أعلى درجة حرارة على الخط المتاخم، وأقل درجة حرارة على خط Alkamade، وخطوط Alkamade لن تقطع أبداً خطاً آخر. شكل(2-73)



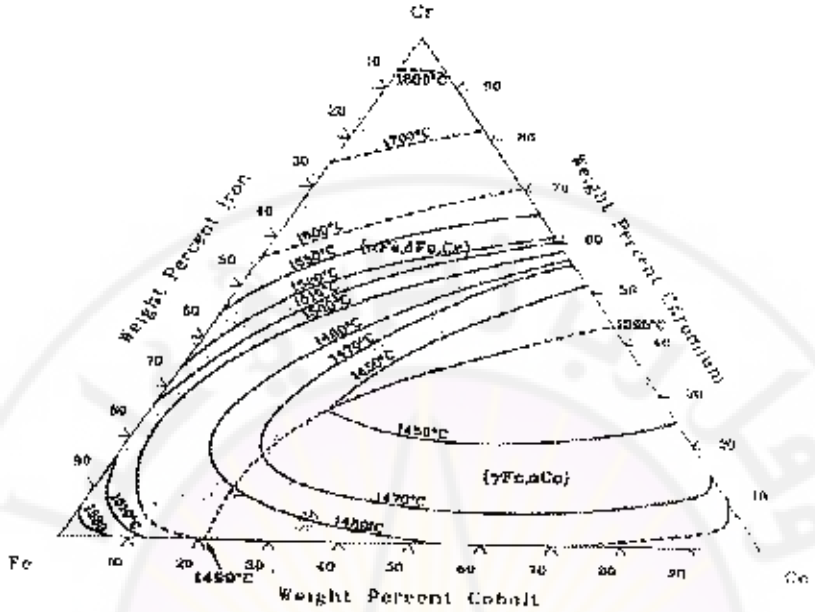
الشكل(2-73): يبين خطوط Alkamade وهي:

A-B B-C C-A

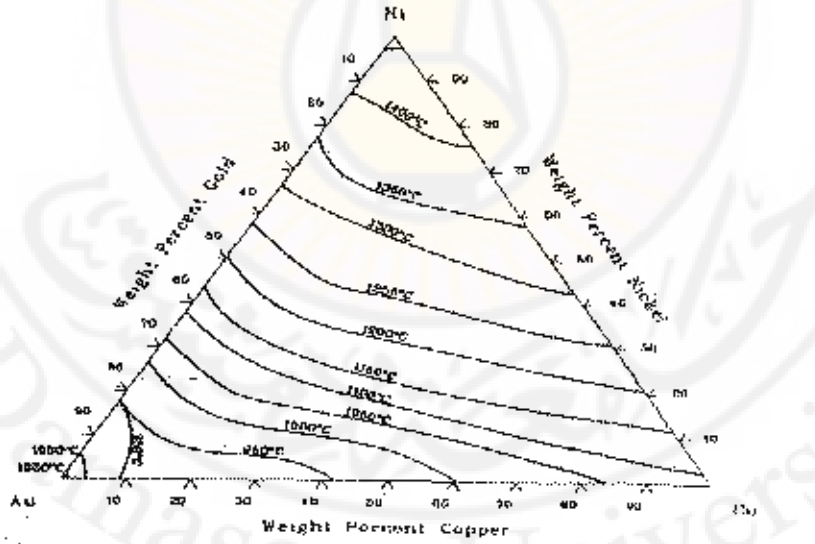
B-BC BC-C A-BC



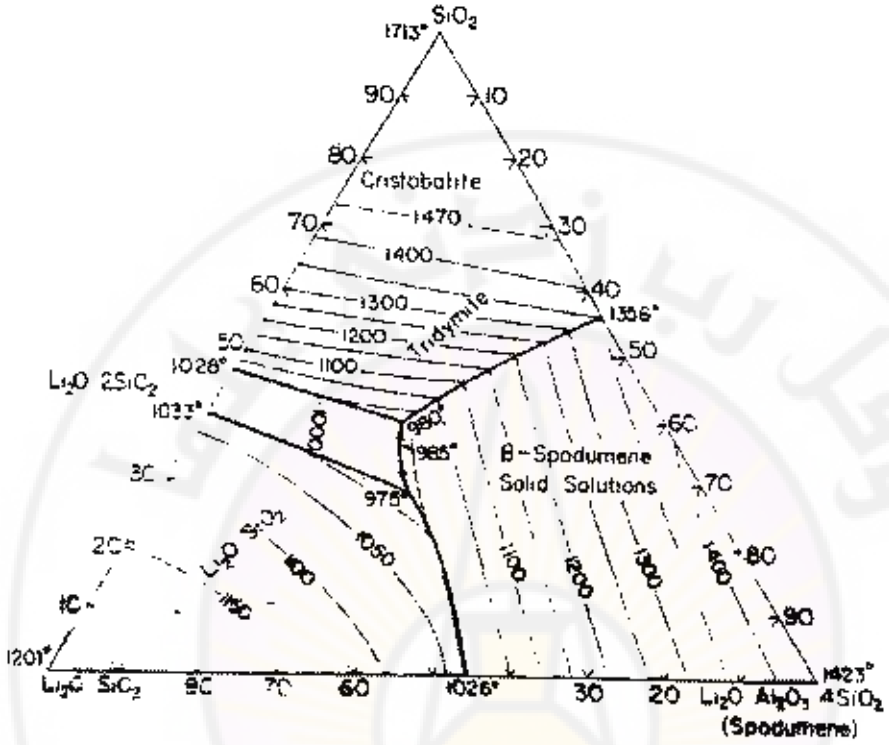
Co-Cr-Fe liquidus projection [88Ray]



Au-Cu-Ni liquidus projection [90Pri]



الشكل (2-74): يظهر التوزعات الحرارية (والأطوار) لعدة خلائط ثلاثية عند مستويات قطع مختلفة.



الشكل (2-75): يظهر التوزعات الحرارية والأطوار لتركيبة من مادة سيراميكية:
$Li_2O.SiO_2$-$Li_2O.Al_2O_3.4SiO_2$-SiO_2

الفصل الثالث

خلائط المعادن الحديدية

Ferrous Metals Alloys

3-1: الخلائط الفولاذية

إن المحاولة الأسبق المسجلة لإنتاج الخلائط الفولاذية كانت عام 1822 من قبل الباحث Michael Faraday وذلك بهدف الحصول على أدوات قطع وأدوات جراحة حادة لا تتأكسد. فقد عمل على سكب الحديد مع عدد من العناصر النادرة كالفضة، الذهب، بلاتين والروديوم، وبالصدفة أضاف الكروم ولكن لم تكن هذه هي الفترة التي تم اكتشاف الفولاذ المضاد للصدأ Stainless Steel من خليطة الفولاذ العالي نسبة الكروم (high-chromium stainless steel) وإنما تم اكتشافه بعد حوالي 90 سنة على العالم بريرلي عام 1922.

إن أول محاولة ناجحة لإنتاج سبيكة فولاذية كانت نتيجة أبحاث العالم البريطاني روبرت ماشيت Robert Mushet، وذلك من خلال تحضيره لشحنة في محول بسمر مدخلا الأكاسيد مع المنغنيز ، وبصعوبة بالغة صنع ماشيت سبائك الفولاذ مع المنغنيز والتنغستين في عام 1868 والتي كانت في الحقيقة بداية تطور الفولاذ عالي سرعة القطع HHS.

إن البحث العلمي المنهجي في خصائص سبائك الفولاذ سجل باسم السيد/ روبرت هادفيلد Sir Robert Hadfield's لاكتشافه H.M.S (High Manganese Steel) في العام 1882، وبعد ذلك بفترة ومن خلال كلمة للدكتور /I-E/ بخصوص هذا الفولاذ: ((هادفيلد أدهش عالم المعادن بتلك النتائج التي توصل إليها، فالمادة المنتجة كانت واحدة من أكثر المواد إنتاجا، فهنالك كميات كبيرة من هذه المادة أنتجت من قبل الشركة (شيفليد) التي لا تزال تحمل اسم المخترع، في الحقيقة إن شجاعة هذه الشركة بإنتاج هذه الكميات في القرن التاسع عشر جعلها اليد التي سيطرت على العالم)).

إن الفولاذ المعروف بفولاذ عالي نسبة الكربون يحتوي على أكثر من 1.0% من المنغنيز ومخلفات عمليات الأكسدة والكبرتة، كانت هذه النسب عموما مقبولة في السبيكة الفولاذية التي

تحتوي على أكثر من 0.1% موليبيديوم أو فاناديوم أو 0.3% من التنغستين أو الكوبالت أو الكروم أو 0.4% نيكل أو 2% من المنغنيز.

إن العصر الحديث في سبائك الفولاذ الميكروية Micro - Alloyed Steels قدم توضيحات وإضافات بقدر ما هو ممكن مثلا إن نسبة مثل: 0.0005% من بعض المواد تؤثر على خصائص الفولاذ واستخداماته.

المحاولة الناجحة الأولى في إنتاج سبيكة فولاذية كانت ناتجة من بحوث عالم المعادن البريطاني Robert Mushet روبرت موشيت، التي جعلت عملية هنري بيسمر مقترح فعال وذلك بإدخال أول أكسيد الكربون بالمنغنيز. كما قام موشيت بتقسية خليطة فولاذ منغنيز – تنجستين أنتجت في عام 1868 كانت في الحقيقة البداية لإنتاج الفولاذ سريع القطع High-Speed Steel.

Sir Robert Hadfield's من خلال أبحاثه اكتشف عام 1882 م الفولاذ عالي المنغنيز. وتوالت الأبحاث وتم الحصول على نتائج مدهشة بعلم الخلائط المعدنية للفولاذ الذي يحتوي 1.0 % منغنيز، وسبيكة فولاذية تحتوي واحداً أكثر من 0.1 % موليبدنوم أو فاناديوم؛ أو 0.3 % تنجستن أو كوبالت أو معدن كروم؛ أو 0.4 % نيكل؛ أو 2.0 % منغنيز. وفي وقتنا الحالي استطاعوا التوصل لـ micro-alloyed steels – بخلط دقيق وبإضافات صغيرة وصلت إلى 0.0005 % من بعض العناصر وذلك لتحسين خصائص الفولاذ واستخداماته.

3-1-1: الأهداف الرئيسية من إضافة عناصر خلائطية للفولاذ:

إن الأهداف الرئيسية من إضافة عناصر سبائكية للفولاذ هي:

1. لتحسين وتوسيع خصائص الفولاذ الكربوني.
2. بهدف الحصول على خصائص جديدة غير متوفرة بالفولاذ الكربوني Plain carbon steels.

وهكذا فإن إضافة كميات صغيرة من النيكل أو الكروم سوف يؤديان إلى تحسين عام في الخصائص الميكانيكية الأساسية وهي المتانة strength والجساءة toughness. بينما إضافة كميات أكبر من هذه العناصر سيبدي ظواهر جديدة مثل استقرار الأوستنيت في درجات الحرارة المحيطة مصحوبة بخسارة المغناطيسية الحديدية، والمقاومة العالية للتأكل Corrosion.

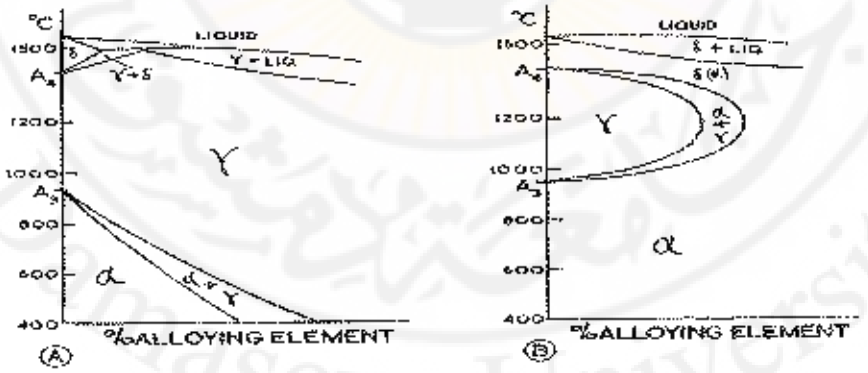
عناصر الخلط المضافة إما ببساطة تذوب بالفريت ferrite أو تندمج مع الكربون لتشكل كربيد الحديد Fe_3C، التي ترتبط بدورها بالكربيد الحديدي الموجود أصلا.

إن قرار استعمال الخلائط الفولاذية بدل الفولاذ الكربوني يجب أن يدرس باهتمام، وذلك لأن تكاليف الحصول على الخلائط المعدنية أكبر بكثير من تكاليف صناعة الفولاذ الكربوني، وهذا يرجع للتكاليف الباهظة لإنتاج المعادن مثل النيكل والكروم وغيره. علاوة على ذلك فإنه بالمعالجة الحرارية للفولاذ متوسط الكربون يمكن تحسين خصائصه الميكانيكية وبشكل كبير وبتكاليف أقل.

3-1-2: التأثيرات الأساسية التي تتمتع بها العناصر السبائكية على مستوى البنية الميكروية وخصائص الفولاذ تصنف كما يلي:

1. **التأثير على التحولات المتعددة الأشكال: (والمقصود بها هنا التحولات الآلوتروبية التي تصف التغيرات الحاصلة في البنية البلورية).**

إن التحولات الحرارية المتعددة الأشكال التي تهمنا هنا هي عند درجات الحرارة 910 °C أي عند تحول الحديد من النوع حديد ألفا إلى الحديد من النوع غاما وبالعكس $\alpha \leftrightarrows \gamma$ وأيضا عند درجة الحرارة 1400 °C عند حدوث تحول حديد غاما إلى دلتا $\gamma \leftrightarrows \delta$ وبالعكس، فعند تسخين الحديد من النوع (α) BCC أي الحديد إلفا إلى درجة حرارة أعلى من 910 °C فإنه يتحول إلى الحديد من النوع (γ)FCC أي الحديد من النوع غاما وإذا سخن إلى درجة حرارة أعلى من 1400 °C فإنه يعود ليتحول من جديد إلى الحديد دلتا من النوع (δ) BCC. هذه التحولات عكوسة بالتبريد، إن درجات الحرارة 910 و1400 درجة مئوية تشيران إلى النقطتين A3 ،A4 كما هو موضح بالشكل (3-1).



الشكل(3-1): التأثيرات النسبية لإضافة العناصر السبائكية على درجات حرارة التحول A_3 و A_4. (A): تميل لاستقرار حديد γ. (B): تميل لاستقرار حديد α.

إن النقطة A_1 هي عند درجة الحرارة 723 مئوية وهي أدنى درجة الحرارة الحرجة حيث يتم تحول الأوستنيت إلى برليت وبالعكس كما هو في الفولاذ متوسط نسبة الكربون، بينما النقطة A_2 هي عند درجة الحرارة 769 مئوية وهي نقطة كوري التي يفقد الحديد النقي بعدها مغنطته، علماً أن نقطة كوري ليس لها أهمية في هذا المجال.

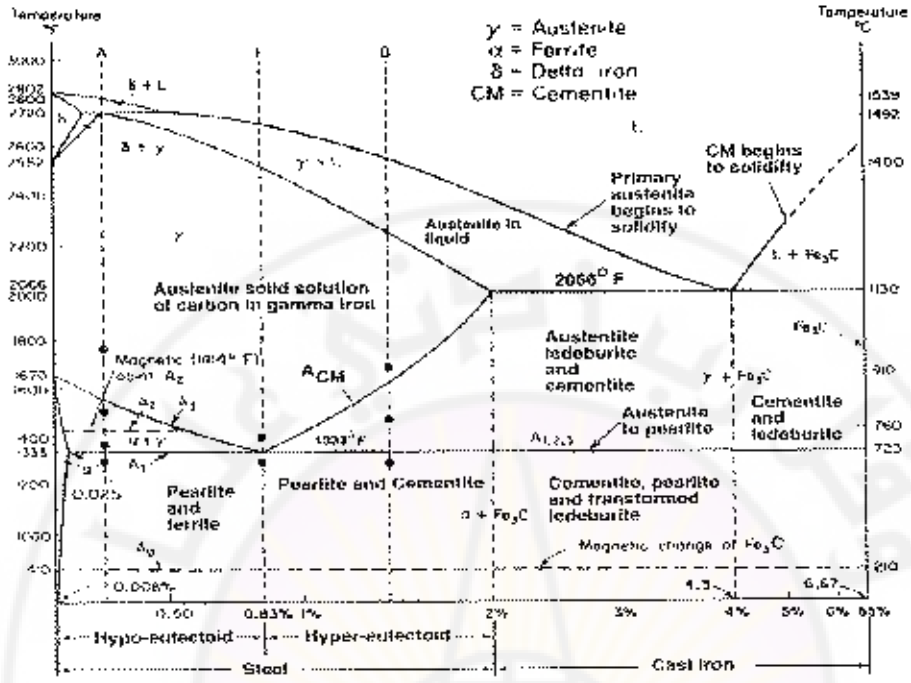
- بعض العناصر، وخصوصا: النيكل، المنغنيز، الكوبالت، النحاس تزيد درجة الحرارة للنقطة A_4 وتخفض حرارة النقطة A_3 كما هو موضح بالشكل (3-1)، لذلك عند إضافة هذه العناصر إلى الفولاذ الكربوني تتجه إلى تثبيت الأوستنيت، وتزيد في مجال الحرارة فوق الحد الذي يسمح للأوستنيت بالخروج عن حالة التوازن.
- بعض العناصر الأخرى ومن أهمها: الكروم، تنغستين، فاناديوم فهي تميل إلى تثبيت الفريت من خلال زيادة درجة الحرارة للنقطة A_3 وتخفض من حرارة النقطة A_4، وكما أن العناصر تحدد المجال الذي يمكن أن يوجد فيه الأوستنيت وهذا ما يدعى بالحلقة غاما.

العديد من العناصر التي تعمل على تثبيت الأوستنيت لها بنية بلورية من النوع FCC مثل بنية الأوستنيت تماما لذلك فهي تنحل بسهولة في الأوستنيت وبناء على ذلك فإنها تؤخر وتقاوم تحول الأوستنيت إلى فريت.

حتى الكربون ذاته له التأثير نفسه على التحول من غاما إلى ألفا في الحديد كما هو موضح في مخطط الحديد والكربون المعروف شكل(3-2).

وهذه العناصر بسبب انحلالها في الحديد FCC فإن هذه المجموعة من العناصر تؤخر ترسب الكربيدات وأيضا هذا له تأثير على المجال الحراري الواسع لتثبيت الأوستنيت.

العناصر التي تعمل على تثبيت الفريت تكون في البنية مثل بنية الحديد ألفا أي ذات بنية بلورية من نوع BCC ومع ذلك فإنها تنحل بسهولة أكبر في حديد ألفا من حديد غاما كما أن مجال تثبيت الفريت موضح بالشكل (3-1) السابق. إن الزيادة التدريجية في عنصر واحد أو أكثر من عناصر تثبيت الفريت ستجعل النقطة تبعد إلى خلف حدود الحلقة غاما، حيث إن الطور غاما لا يستطيع التواجد عند أي درجة حرارة، إنّ إضافة أكثر من 30% من الكروم إلى الفولاذ المحتوي على 0.4% كربون ستؤدي إلى إلغاء التحولات متعددة الأشكال كما أن الفولاذ لن يكون قابلاً للمعالجة الحرارية.



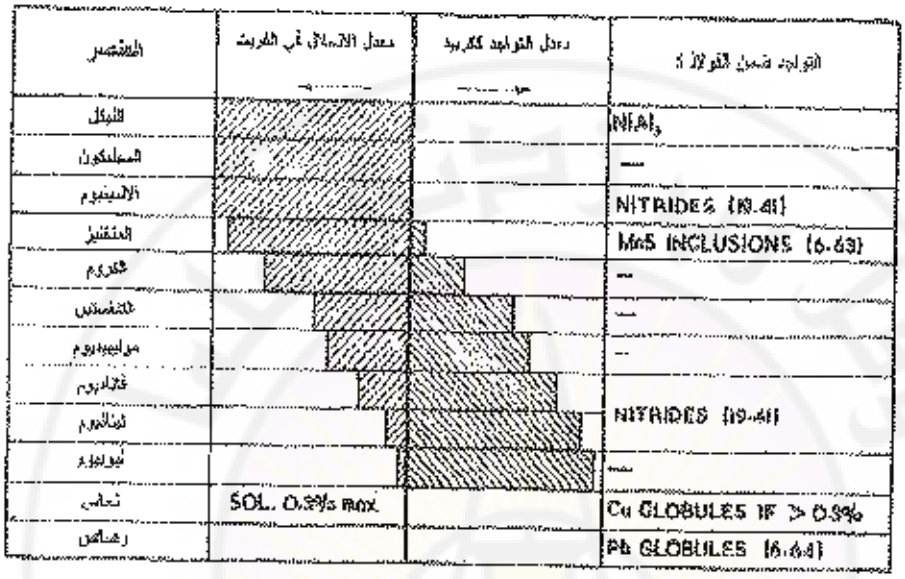
الشكل(3-2): مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون.

2. التأثير في تكوين واستقرار الكربيدات:

بعض العناصر السبائكية تشكل كربيدات مستقرة بشكل جيد كما هو موضح بالشكل (3-3)، هذا عموما للعناصر التي لها تأثير قوي على الفولاذ، خصوصا عندما تكون الكربيدات المشكلة أقسى من كربيد الحديد نفسه، كإضافة بعض العناصر مثل: الكروم، التنغستن، الفاناديوم، المولبيديوم، التيتانيوم، النيوبيوم. بعض هذه العناصر تشكل كربيدات قاسية ومنعزلة في البنية المكروية مثل: Cr_7C_3 / W_2C/ Mo_2C / Vc كما أن هناك كربيدات مضاعفة أو مركبة من الحديد وعنصر اخر أو أكثر من عنصر من هذه الكربيدات المركبة أو المفردة الموجودة في فولاذ الأدوات غالبا ما تكون بالصيغة التالية: M_6C / $M_{23}C_6$ / MC

حيث M تمثل الذرات المعدنية الكلية، بينما M_6C يمثل بـ Fe_4W_2C وFe_4Mo_2C، بينما MC يمثل بـ WC/Vc.

هناك بعض العناصر لا تستطيع تشكيل كربيدات قوية ولكن بالرغم من ذلك فإنها تساهم في تثبيت الكربيدات بشكل عام، مثل عنصر المغنتيز فإن كربيداته المتشكلة ضعيفة كما هو مبين بالشكل (3-3) ولكنه بشكل عام ذو تأثير جيد في زيادة تثبيت الكربيدات الأخرى.



الشكل(3-3): الحالات الفيزيائية الأساسية للعناصر السبائيكية ضمن الفولاذ.

بعض العناصر على وجه التحديد مثل: النيكل، الكوبالت، السيليكون، والألمنيوم لديها جاذبية كيميائية قليلة أو معدومة اتجاه الكربون، في الواقع لديها تأثير غرافيتي ضمن كربيد الحديد، لذلك فإنها تميل إلى صنع مركبات غير مستقرة تتحطم في النهاية محررة الكربون الحر، لذلك فإنه من الضروري إضافة كميات محسوبة من هذه العناصر إلى الفولاذ وخصوصا إلى ذلك الفولاذ الذي يحتوي على كميات ضئيلة من الكربون، وإذا كانت نسبة الكربون ضمن المجال المتوسط فإنه من الضروري إضافة عنصر من عناصر المجموعة الأولى لكي يبطل تأثير العنصر المغرفت ويمنع تشكيل مركبات غير مستقرة مثلا: بعض الخلائط تحتوي على النيكل بشكل مفرد والتي يجب أن تحتوي على النيكل والكروم معا.

3. التأثير على بذور التبلور:

إن معدل نمو البلورات يكون متسارعاً وخصوصا في درجات الحرارة العالية ووجود بعض العناصر السبائكية مثل عنصر الكروم، وبالتالي يجب توخي الحذر في الفولاذ الحاوي على مثل هذه العناصر بأن لا يسخن لدرجات حرارة عالية أو أن يترك فترات طويلة في درجات الحرارة العالية لأن ذلك سوف يؤدي إلى الهشاشية الناتجة عن كون بنية البلورة الواحدة كبيرة وخشنة نتيجة الحرارة العالية.

لسوء الحظ فإن معدل نمو البلورات سيكون بطيئاً بوجود عناصر مثل: الفاناديوم، التيتانيوم، النيوبيوم، والألمنيوم والقليل من النيكل حيث إن الفولاذ الحاوي على مثل هذه العناصر سيكون أيضا أقل حساسية للحرارة أثناء عمليات المعالجة الحرارية.

ويعتبر الفاناديوم من أفضل العناصر التي تعمل على إعادة التبلور حيث إن إضافة نسبة 0.1% تكبح عملية نمو البلورات وذلك من خلال تشكيل كربيدات ونتريدات متناثرة بالبنية، وتكون نسبيا غير قابلة للذوبان في درجات الحرارة العالية مشكلة بذور تبلور.

التيتانيوم والنيوبيوم تملك نفس السلوك، بينما في الخلائط الفولاذية المستخدمة لأدوات القطع فإن كربيدات التنغستين والموليبيديوم تقلل من نمو البلورات عند المعالجة بدرجات حرارة عالية.

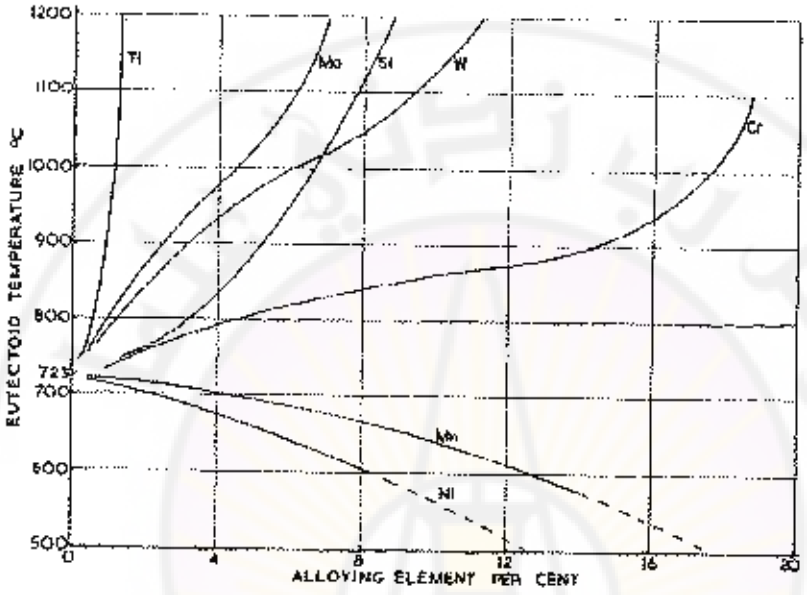
4. إزاحة النقطة اليوتكتويدية:

إن إضافة أي عنصر سبائكي إلى الفولاذ الكربوني سوف تقلل انحلالية الكربون في الأوستنيت نتيجة لذلك فإن النقطة اليوتكتويدية سوف تتجه نحو اليسار في مخطط التوازن، وستكون السبيكة الفولاذية ذات بنية برليتية بالرغم من احتوائها على أقل من0.8% كربون كما هو موضح في الشكل (3-3).

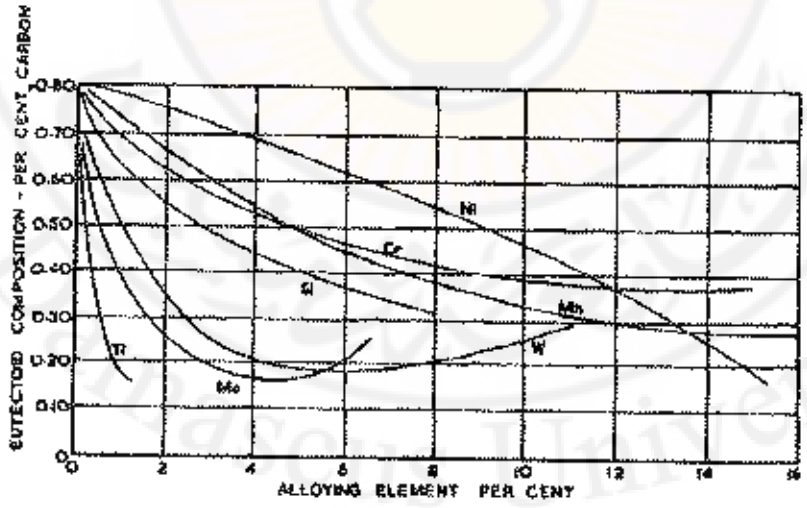
وهذا ما يفسر لنا لماذا تكون الخلائط الفولاذية الحاوية على كمية كربون أقل من تلك الموجودة في الفولاذ ذي نسبة الكربون الأعلى تتمتع بالصفات والاستخدامات نفسها.

بتعبير آخر، في الوقت الذي تكون فيه درجة حرارة النقطة A_1 متغيرة حسب نسب الخلط فإن عناصر تثبيت الفريت (الكروم، التنغستين، الموليبيديوم، التيتانيوم...) تزيد من درجة حرارة النقطة اليوتكتويدية وكذلك الأمر وبالطريقة نفسها بالنسبة للنقطة A_3، أما مثبتات الأوستنيت مثل النيكل والمنغنيز فإنها تقلل من درجة حرارة النقطة اليوتكتويدية كما هو موضح بالشكل(3-4 a,b,c).

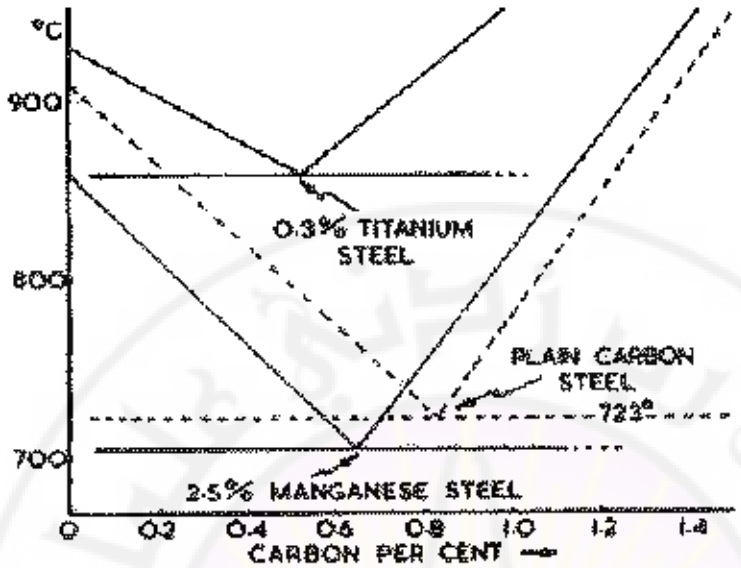
عند إضافة 2.5% من المنغنيز إلى الفولاذ الحاوي على 0.65 % من الكربون فإنه سوف يعطيه بنية برليتية في الحالة الطبيعية، مع تخفيض درجة الحرارة للنقطة اليوتكتويدية إلى700 درجة مئوية، كما هو الأمر أيضا في الفولاذ عالي سرعة القطع الحاوي على فقط 0.7% كربون فإن البنية الميكروية تشير إلى تكتل لكربيد حر وفق حزمة مزدوجة.



(a)



(b)



(c)

الشكل(3-4): تأثير نسبة العناصر السبائيكية على نسبة التواجد اليوتكتويدي (a&b) وعلى إزاحة النقطة اليوتكتويدية (c).

إضافة الكوبالت تؤدي إلى إنتاج المزيد من بذور التبلور للخليطة الفولاذية المحتوية على (Ti-Mo-A) وتؤدي إلى ترسيب Ni_3، في هذا الفولاذ تقريبا تعتمد قسم من المتانة على المارتنسيت الأصلي المكون من النيكل والحديد وتعتمد المتانة المتبقية على العناصر التالية في التقسية:

- إذا تم الترسيب والمعالجة في درجة حرارة تجاوزت 500 مئوية فوق درجة الإصلاد عندها تبدأ الصلادة بالانخفاض وذلك بسبب عودة البنية إلى الحالة الأوستينيتية.
- هذا الفولاذ يجمع بين القساوة مع متانة عالية عند شروط المعالجة الحرارية وفي هذه الحالة يتم التسخين حتى درجة حرارة 350 مئوية، وهي درجات التشكيل المناسبة من أجل عمليات التشكيل على البارد أو الساخن بينما قابلية اللحام جيدة ولكن مع القليل من المشاكل. المعالجة الحرارية تضمن بعض المشاكل والصعوبات حيث إنه يمكن أن تحدث إعادة كربنة ولاينصح بالتقسية بالماء وتعطي مميزات لهذا الفولاذ وميزة للبنية وهي مناسبة جداً من أجل عملية النتردة.

– هذا الفولاذ بالتأكيد ليس فولاذ ستانلس ستيل، وتحت العوامل الجوية سوف يصدأ خلال نصف المعدل لصدأ الفولاذ المنخفض الخلائطية، ولذلك فإن الحمايات السطح ضرورية مع العلم أن الستانلس ستيل متوفر ومبني على الكروم والنيكل والكوبالت والموليبدروم. فيما يبين الأكثر غرابة في استخدام هذا الفولاذ القاسي والغالي في تطبيقات الفضاء مثل الأغطية، محركات الصواريخ والأجزاء لنظام التعليق في المركبات، وبشكل عام في الأجزاء الهندسية في الأعمدة القائدة في الطائرات المروحية، أوعية الضغط، أسطوانات أجهزة الإطلاق السريع، مكابس البثق، قوالب التشكيل على البارد، معظم قوالب السباكة.....

5. معوقات معدلات الانتقال:

لاحظنا مما عرض سابقاً أن منحنيات (TTT) الخاصة بالفولاذ الكربوني تزاح إلى اليمين بسبب التأثيرات الناتجة عن الإضافات السبائكية، وبالتالي فإن هذه الإضافات تعوض النقص الحاصل في تحول الأوستنيت إلى برليت في درجات الحرارة بين 500 و 700 وبهذا فهي تخفض السرعة الحرجة الضرورية للتحول المارتنسيتي. ولهذه الخصائص فوائد واضحة فجميع العناصر السبائكية – باستثناء الكوبالت – ستخفض معدلات التحول.

للحصول على بنية مارتنسيتية كاملة في حالة خليطة 0.8% من الفولاذ الكربوني يجب تبريدها من 723°C إلى درجة حرارة الغرفة في ثانية واحدة. هذه المعالجة تتضمن تبريداً قاسياً، يقود بشكل عام إلى تحطم أو تصدع العناصر.

بإضافة كمية ضئيلة من العناصر السبائكية المناسبة كالنيكل والكروم فإننا نخفض معدل التبريد الحدي إلى مجال أقل قسوة ويكون التبريد بالزيت كافياً للحصول على البنية المارتنسيتية الكاملة. وبزيادة هذه الكمية ينخفض معدل التحول حتى يصبح التبريد بالهواء كافياً.

الفولاذ المقسى بالهواء له ميزات معينة تقلل نسبياً من التشوه الناتج عن التقسية: على سبيل المثال فإن فولاذاً يحوي 4.25% نيكل و1.25% كروم ويبرد في قطاع قليل السماكة يمكن تقسيته بشكل كامل وحتى مقطع يصل إلى 0.15m (هو قطر التبريد بالزيت)

تعتبر هذه الميزة ميزة كبيرة كونها تجعل التقسية تجعل جميع المنتجات ذات قساوة واحدة حتى عند نقلها على السير الناقل المشغل من قبل عامل قليل الخبرة.

ولها سيئة بسيطة هي أن جميع العناصر السبائكية – باستثناء الكوبالت– تنخفض درجة حرارة بدء التحول المارتنسيتي Ms وكذلك درجة حرارة انتهاء التحول Mf إلى مادون درجة الحرارة التي تعطي الأوستنيت المتبقي في البنية المبردة.

6. زيادة خواص مقاومة التآكل:

يمكن زيادة مقاومة التآكل بإضافة عناصر كالألمنيوم والسيلكون والكروم هذه العناصر تشكل طبقة رقيقة وكثيفة من الأكسيد الذي يحمي سطح الفولاذ من التآكل فيما بعد. من العناصر المذكورة يبقى الكروم أكثرها فعالية عند الأخذ بعين الاعتبار الخواص الميكانيكية، بينما يضاف النيكل بكميات معينة للمحافظة على البنية الأوستنيتية في درجة حرارة الغرفة بحيث يبقى محتوى الكربون منخفضاً لتصبح البنية بكاملها لمحلول معدني صلب، هذا أيضاً يساعد على الإبقاء على المقاومة العالية للتآكل مُخفِضاً احتمال التآكل الكهربائي.

7. التأثير على الخصائص الميكانيكية:

إن أحد أهم أسباب السباكة هو زيادة الخواص الميكانيكية للفولاذ هذه التحسينات في الخواص الميكانيكية تنتج عن التغيرات الفيزيائية المشار إليها سابقاً. على سبيل المثال تزداد القساوة بالعناصر التي تثبت الكربيدات وتزداد المتانة بالعناصر السبائكية التي تنحل في الفريت أما الصلابة فتزداد بالعناصر التي تصقل الذرات.

3-1-3: تصنيف الفولاذ:

تخطيطيا يمكن تصنيف الفولاذ بمخطط صندوقي كما يبينه الشكل (3-5).

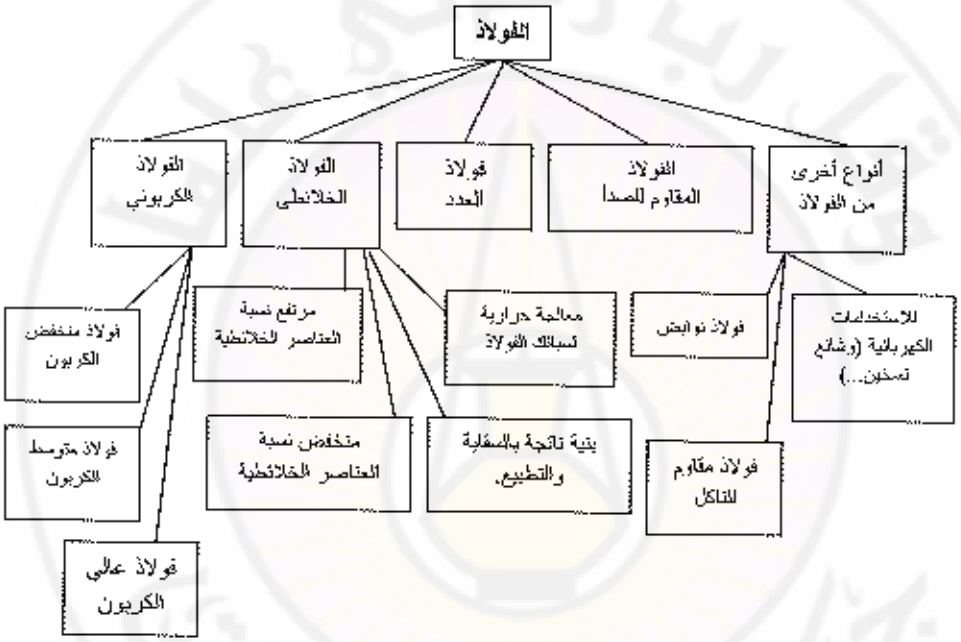
3-1-4: الفولاذ الخلائطي المحتوي على البورون:

البورون عنصر غير معدني يوجد البورون النقي في الطبيعة بصيغة الملح Borax، والبورون لونه رمادي غامق مع درجات حرارة انصهار عالية 2300 درجة مئوية. ويضاف إلى الفولاذ على شكل (Ferro–boron) البورون الحديدي.

إن إضافة قيم صغيرة جداً من البورون (0.0005– 0.005%) إلى الفولاذ المؤكسد تزيد قابليته للتقسية من خلال إزاحة مخطط الـ TTT إلى اليمين وذلك من خلال تقليل معدلات تحول

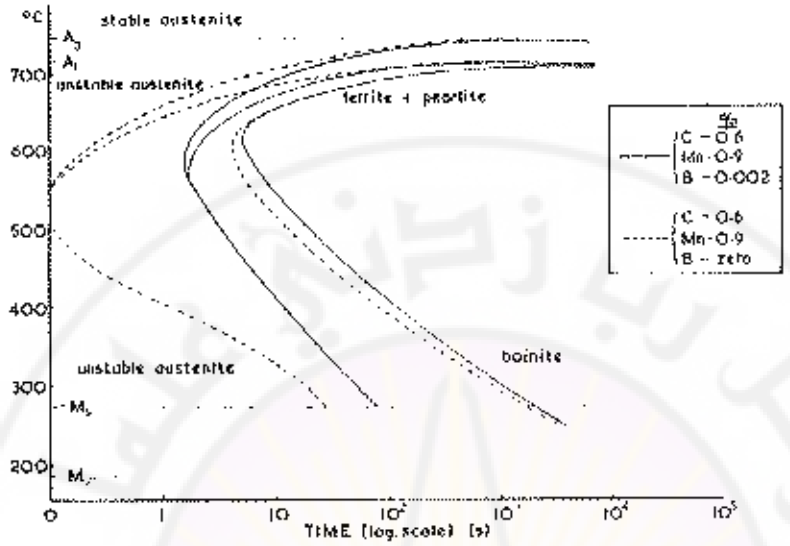
الأوستينيت إلى فريت وبرليت، وهذا يظهر جلياً في الفولاذ منخفض الكربون C%(0.2–0.4) ولكن تأثيره ببنية الفولاذ في المنطقة البوتكتويدية يكون مهملاً. شكل(3–6).

سمة هامة أخرى هي أن قابليه التقسية وقيمة العناصر الخلائطية الأخرى في الفولاذ المنخفض نسبة العناصر الخلائطية يمكن أن ينخفض إلى النصف عند إضافة كميات صغيرة من البورون وبدون تقدير فإنها تزيد من معدلات التحول بالاضافة الى تقليل التكلفة وهذا يعني زيادة قابلية التشكيل على البارد وزيادة قابلية التشغيل.



الشكل(3-5): تصنيفات الفولاذ الشائعة الاستخدام.

الفولاذ المنخفض نسبة الكربون والمحتوي على المنغنيز والبورون يستخدم في صناعة براغي الشد– وأدوات القلوظة، ويمكن أن تضاف إليها بعض عناصر مثل النيكل، الكروم، الموليبديوم ... كما يبينها الجدول (3–1)



الشكل(3-6): تأثير الكميات الصغيرة من البورون في إعاقة معدلات تحول الأوستنيت.

3-1-5: الفولاذ الخلائطي المحتوي على السيليكون:

يوجد السيليكون بالفولاذ المستخدم من أجل السباكة الرملية وبشكل طبيعي بقيمة لا تتجاوز 0.35 % حيث يعمل السيليكون على زيادة سيولة الفولاذ المصهور، مع العلم أن معظم الفولاذ المتوسط والعالي نسبة الكربون تكون فيه نسبة السيليكون محدودة ولاتتجاوز 0.25 % وذلك بسبب تأثيره الغرافيتي في البنية ولديه انجذاب عالٍ للأوكسجين ولذلك يستخدم كمؤكسد في معظم أنواع الفولاذ.

إن اضافة السيليكون تؤدي إلى الزيادة بمقاومة التآكل نتيجة الصدأ عند درجات الحرارة العالية. لذا يستخدم الفولاذ السيليوني في صناعة مسامات الحرارة الفولاذية كما يبينه الجدول (3-2).

جدول (3-1): يبين نسب واستخدامات وخصائص بعض العناصر الممكن اضافتها للفولاذ البوروني

C %	Mn %	Ni %	Cr %	Mo %	B %	اجهاد الخضوع N/mm^2	اجهاد الشد N/mm^2	الاستطالة	الاستخدام
0.2	1.5	-	-	-	0.0005	690	790	18	فولاذ الانشاءات ذات القساوة العالية
0.17	0.6	-	-	0.6	0.003	690	860	18	فولاذ الانشاءات عالية الشد
0.18	0.85	-	0.1	0.2	0.003	690	900	15	فولاذ الانشاءات ذو القساوة العالية جداً
0.45	0.85	0.3	0.45	0.12	0.002	700	1000	15	المركبات واستخداماتها الهندسية
0.16	1.4	-	0.6	0.25	0.002	630	930	14	وصلات لحام، جسور، رافعات شاحنات
0.25	1.2	-	0.5	0.2	0.002	1300	1550	8	مصاعد،حفارات، نواقل، بلدوزرات

خليطة (السيليكون -- الحديد) مغناطيسية، ويعمل السيليكون المدخل في الفريت ازيادة كل من المتانة والقساوة مع الحفاظ على كمية فريت ثابتة، كما يرفع كلا من A_1, A_3 شكل(3-7) الفولاذ المنخفض الخلائطية والمحتوي على السليكون له خواص غرافيتية لذلك يضاف عادة للفولاذ عنصر سبائكي آخر مثلا 1% مغنيز كعنصر كربيدي ثابت، هذان العنصران يجتمعان في تقوية الفولاذ وزيادة قابليته التقسية، ولذلك فإن الفولاذ الحاوي على السيليكون والمنغنيز يستجيب للتقسية بالزيت والإرجاع ويعطي ترابطاً جيداً بين المتانة ومقاومة الصدم. لذلك فإن هذا الفولاذ له استخدامات واسعة في الوشائع والحفارات والأزاميل وغيرها التي تحتاج إلى مقاومة جيدة للصدم.

3-4-6: الفولاذ الخلائطي المحتوي على النحاس:

مع العلم أن النحاس له بنية FCC تقوم بتثبيت الأوستنيت وعندما يضاف الى الفولاذ يحل في الفريت شكل(3-8) هذه الانحلالية تتناقص من 0.1% عند درجة حرارة 835 درجة مئوية الى

0.3 % عند الدرجة صفر درجة مئوية. النحاس لا يشكل كربيدات ولكن لديه تأثير غرافيتي، يضاف النحاس أحيانا الى الفولاذ منخفض الكربون فقط وبنسبة لا تتجاوز 1.5%، والنحاس له تأثيرات في الفولاذ:

1- يزيد من مقاومة التآكل

2- يقلل من القابلية للتقسية ويمكن الوصول الى إجهاد شد مساو الى ($175\ N/mm^2$) بإضافة النحاس.

الخط المنحني SV في الشكل (3-8) يشير إلى أن التقسية اللاحقة ممكنة للفولاذ المحتوي 1% من النحاس مثلاً وإذا عولج بدرجة حرارة فوق X وبعدها برد فاذا كان محتوى الكربون قليلاً فان المارتنسيت لن ينتج حتى إذا كان الفولاذ قد برد من الحالة (γ). بعض أنواع هذا الفولاذ يبينه الجدول (3-3).

جدول (3-2): يبين نسب عناصر الفولاذ المحتوي على السيليكون.

رمز الفولاذ	C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	نوع الفولاذ
250A53	0.53	1.9	0.85	-	-	فولاذ النوابض
250A61	0.61	1.9	0.85	-	-	
250A60	0.60	1.9	0.85	0.3	0.25	
-	0.07	4.3	0.08	-	-	الحديد المنخفض المغناطيسية من اجل تصنيع قلوب المحولات

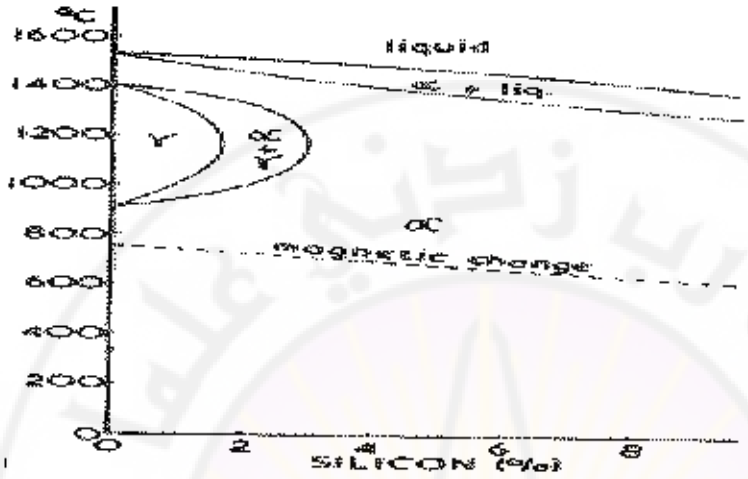
3-1-7: الفولاذ الخلائطي المقاوم لدرجات الحرارة العالية:

يستخدم الفولاذ المقاوم لدرجات الحرارة العالية في العديد من الأماكن:

- في صمامات العادم بالمحركات الهوائية.
- بالمطابخ.
- سلاسل الأفران (مبيور معدنية).
- العنفات الغازية.
- صناديق التلدين.
- فوهات الاشتعال والاتهام.

إن المتطلبات الرئيسية من مثل هذا الفولاذ:

1. المقاومة للأكسدة من غازات الجو الحامل.
2. متانة عالية بما فيها الكفاية (مقاومة للزحف) عند درجات الحرارة العالية.
3. عدم حدوث تغيرات بنيوية عند هذه الدرجات من الحرارة.



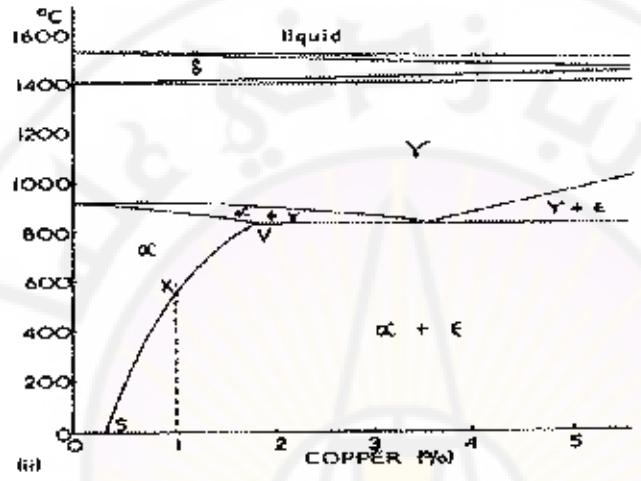
الشكل(3-7): يبين مخطط الإتزان الحراري للفولاذ السيليكوني.

جدول (3-3): يبين نسب وبعض الخصائص الميكانيكية للفولاذ المحتوي على النحاس.

C %	Mn %	Cu %	Ni %	Other	إجهاد الخضوع	إجهاد الشد	Elongation %
0.25	1.3	0.4	---	---	340	490	20%
0.2	1.0	1.0	---	---	450	620	20%
0.006	0.5	1.2	0.02	---	550	620	8%
0.2	0.7	0.4	---	Cr 0.3	350	500	22%
0.2	1.0	1.25	1.5	Mo 0.25	550	700	18%

هذا الفولاذ يعمل عند درجات حرارة فوق 700 °C مع تشكل طبقة أكسدة على السطح تزداد مع ارتفاع درجات الحرارة بحيث تصبح أكسدة تدميرية بشكل خاص نتيجة حركة الأيونات المعدنية واللامعدنية ضمنها مثل أكاسيد البريليوم، الألمنيوم، السيليكون ومعدن الكروم والذي تكون قابليتها للحركة الأيونية منخفضة تميل لتكوين كثيف على السطح يعمل على حماية السطح من

الأكسدة. الثلاثة الأولى (أكاسيد البريليوم، الألمنيوم، السيليكون) تميل إلى عمل تأثيرات مؤذية على الخصائص الميكانيكية، أما الكروم مع نسب قليلة من السيليكون فتعمل على تشكل طبقات رقيقة مانعة للأكسدة، كذلك يضاف النيكل لمنع نمو الحبيبات بشكل كبير وللتغلب على الغازات التي تحتوي على الكبريت، حيث تعمل على تشكيل طبقة هشة لحدود البلورات من كبريتيد النيكل.



الشكل(3-8): يبين مخطط الإتزان الحراري للفولاذ المحتوي على النحاس، الطور ε عبارة عن محلول صلب يمثل هنا غالبا النحاس النقي.

$$Ni \rightarrow Ni^{++} + 2e^{-}$$

$$S + 2e^{-} \rightarrow S^{--} \quad \text{Nickel Sulphide}$$

يساهم معدن الكروم في مقاومة درجات الحرارة العالية، ويؤدي لرفع مقاومة الزحف، وبشكل عام المقاومة للزحف تزداد بإضافة كميات قليلة من التنغستين، والموليدنيوم والفاناديوم والتيتانيوم والنيوبيوم والألمنيوم أو النتروجين، والحصول على بنية ذات جزيئات ناعمة من كربيد النوبيوم أو التنجستين والموليبدينيوم أو الفاناديوم أو التيتانيوم.

التنجستين والموليبدينيوم والكوبالت أيضا تشكل فولاذاً مقاوماً لدرجات الحرارة العالية لذلك يستخدم لصنع فولاذ العدد القاطعة (الفولاذ سريع القطع).

تستخدم أجهزة دقيقة لتقييم مقاومة الزحف بالمعادن تصل دقتها [Paxhour] % 0.0001 عند درجات الحرارة العالية القصوى.

والعمل الآمن مبني بنسبة % 50 على مثل هذه الأجهزة والاختبارات التي تجرى تحت شروط التحميل الستاتيكي المحوري عند درجات الحرارة الموحدة نسبياً.

ولكن عند ظروف تحميل ديناميكية (صدم أو درجات حرارة فجائية) عندها تدخل عوامل أمان بالحسبان تصل قيمتها %(25-33) من إجهاد الزحف المستنتج بالتحميل الستاتيكي للمادة.

3-1-8: الفولاذ الخلائطي المحتوي على الموليبديديوم:

يعمل الموليبديديوم بشكل أساسي في الخلائط الفولاذية منخفضة نسبة النيكل ونسبة الكروم ليخفض الهشاشية في الفولاذ المعالج بالتقسية بالزيت، وإن نسبة Mo 0.3% كافية في هذا المجال. ويجعل الفولاذ مقاوماً جيداً للصدم Impact بغض النظر عن معدلات التبريد بعد عملية التطبيع Tempering، إضافة إلى مقاومته للتأكسد والحموض.

خليطة (Ni-Cr-Mo) لها خصائص ميكانيكية جيدة من قابليتها العالية للشد مع المطيلية الجيدة وذلك بالقطع كبيرة الحجم.

يضاف الموليبديديوم أيضا للفولاذ الكرومي لتحسين قابليته للتشغيل على الآلات وتحسين خصائصه الميكانيكية، بينما يضاف للفولاذ النيكلي لتقسيته.

يضاف الموليبديديوم بنسبة لاتزيد عن 1% لبعض أنواع الفولاذ المحملة بقوى دائمة وفي درجة حرارة مرتفعة (مثال أنابيب البخار) ليزيد متانتها ومقاومتها في تلك الدرجات من الحرارة.

3-1-9: الفولاذ الخلائطي المحتوي على الفاناديوم:

في العام 1801 وجد الباحث (DEL RIO) معدناً جديداً في الخام المكسيكي وأطلق عليه (السيرونيوم) مستوحى من GREEK ERYTHROS التي تعني أحمر وذلك لأنها شكلت مركبات حمراء. لاحقاً اكتشف الباحث SEFSTORM ما اعتقد أنه معدن جديد في فلزات الحديد السويدي وسماه فانديوم، لكن الكيميائي البارز WOHLER عرف الفانديوم المكتشف بأنه نفسه الذي اكتشفه (DEL RIO). وفي هذه الايام تعد جنوب أفريقيا المنتج الرئيسي لهذا المعدن وتتبعها بذلك أميركا وفنلندا والنرويج.

يضاف الفاناديوم للفولاذ الكرومي بنسبة 0.2% لتحسين الخصائص الميكانيكية بالمقاطع الفولاذية الصغيرة والمتوسطة الحجم، وكذلك الفولاذ المنخفض نسبة الكروم والمنخفض نسبة النيكل مؤديا إلى إجهاد خضوع أعلى.

الفاناديوم يشكل مع الحديد كربيدا قاسيا يعمل على زيادة قساوة الفولاذ مما يجعله صالحاً لصنع الأدوات والعدد القاطعة.

أهم الخواص التي يكسبها الفاناديوم للفولاذ هو نعومة البلورات والتكوين الدقيق للعينة البلورية ويزيد من أمد عمر أدوات القطع التي تصنع منه ويقاوم درجات الحرارة العاليةعند نسب فاناديوم تصل إلى 5%.

يصنع من فولاذ الفاناديوم أيضا الإسطمبات (القوالب المعدنية) المستخدمة في قوالب الحدادة على الساخن، بعمليات البثق، بالسباكة بالقوالب المعدنية.

3-1-10: فولاذ HSLA:

فولاذ عالي المتانة منخفض نسبة العناصر السبائكية – العقود الأخيرة أظهرت تحسنا كبيرا في النقاوة الكيميائية للفولاذ، كما أن إضافة عناصر الخلط المناسبة ستؤدي إلى تحسن في الخصائص الميكانيكية للفولاذ والى التقليل من الشوائب وأدت إلى زيادة المتانة مع تحسين قابلية الفولاذ للتقسية والطرق.

إن كميات صغيرة من الفاناديوم V والنيوبيوم Nb والتيتانيوم Ti والألمنيوم Al استعملت لعمل سبيكة HSLA ذات الاستخدام الواسع في صناعة هياكل السيارات وتشييد الأبنية والجسور وخطوط الأنابيب (مياه، نفط ، ....).

الهدف من هذه الخليطة هو الحصول على فولاذ فيه عناصر تؤثر على الكربون والنتروجين الموجودين بكميات قليلة به، وتؤدي إلى تشكيل مركب مترسب بشكل كربونتريدي TiN, TiC, NbCN يقيد ويمنع نمو الحبيبات بالبنية البلورية أثناء ظروف العمل على الساخن. متانة فولاذ HSLA تزداد مع انخفاض حجم الحبيبات بالبنية.

3-1-11: فولاذ أدوات القياس:

يجب أن يتسم هذا النوع من الفولاذ بقساوة مرتفعة ومقاومة عالية للتشغيل الاحتكاكي، مع عدم تغيير أبعاده أثناء التشغيل، ولصناعة هذه الأدوات يستخدم الفولاذ ذو المزج الكيميائي:

%C (0.9-1.1) + %Cr(1.3-1.65)، يكتسب هذا الفولاذ قساوة مرتفعة بعد إجراء التقسية والمراجعة المنخفضة. يحدث بالفولاذ عند درجة حرارة الغرفة وخلال فترة زمنية طويلة مايدعى بالتعتيق (تفكك جزئي بالمارتنزيت وتحول كمية معينه من الأوستنيت المتبق إلى مارتنزيت) ويؤدي هذا التعتيق إلى حدوث تغير بالأبعاد الطولية والحجمية للمنتجات، وهذا التغير غير مسموح به في أدوات القياس العالية الدقة. ولمنع حدوث التعتيق كثيراً ماتعرض أدوات القياس بعد معالجتها الحرارية للمعالجة بالتصقيع عند درجات حرارة بين °C(70 – 65) تحت الصفر (لتحويل الأوستنيت إلى مارتنسيت بشكل أكثر اكتمالاً) وبعد هذه المعالجة تعرض أدوات القياس للمراجعة عند درجة حرارة بين °C(130 – 120) لفترة زمنية طويلة (12-24) ساعة. وتصل قيمة القساوة بهذه المعالجة من HRC(64-62).

3-1-12: الفولاذ المقاوم للصدأ:

إن أكثر المواد مقاومة للتآكل وأكثرها استخداما في الإنشاءات المعدنية هو الفولاذ المقاوم للصدأ. الفولاذ المقاوم للصدأ عبارة عن خلائط ذات أساس حديدي تحتوي على %10.5 أوأكثر من الكروم ، ويوجد حاليا ما يزيد عن 70 صنفا من الفولاذ المقاوم للصدأ.

يتجاوز الإنتاج العالمي من الفولاذ المقاوم للصدأ 12.5 مليون طن، وتعود المحاولات الأولى لإضافة الكروم إلى الفولاذ الطري إلى سنة 1900م.

وحسب ما يبدو كانت هذه المحاولات نتيجة ملاحظة المقاومة العالية التي أبدتها بعض أجزاء الفولاذ المطلي بالكروم في مقاومة التآكل، وأسفرت هذه التجربة عن انتاج عائلة الفولاذ المقاوم للصدأ.

الفولاذ المقاوم للصدأ ليس مادة واحدة كما يوحي اسمه، لكنه عبارة عن مجموعة واسعة من العناصر والخلائط كل منها بيدي خواص ميكانيكية وخواص مقاومة للتآكل.

ينتج الفولاذ المقاوم للصدأ بطريقتين إما بطريقة السبائك المصبوبة حسب معهد (ACI) أو بطريقة التشكيل المطاوع حسب المعهد الأمريكي للحديد والفولاذ (AISI)، عموما جميع الخلائط ذات أساس حديدي مع %12-30 من الكروم و%0-22 من النيكل، وكميات قليلة من الكربون والكولومبيوم، والنحاس والموليبيدنيوم والسيلينيوم والتتاليوم حيث إن لها مقاومة للتآكل ومقاومة حرارية وهي مواد غير ملوثة وسهلة التصنيع بأشكال معقدة.

I. تصنيفات الفولاذ المقاوم للصدأ:

هناك ثلاثة أنظمة أساسية للتصنيف تستخدم لتحديد الفولاذ المقاوم للصدأ، الأول يتعلق بالبنية الميتالورجية، أما النظامان الآخران فهما نظام ترقيم (AISI) ونظام الترقيم الموحد، طورا بواسطة (ASTM) و (SAE) وذلك بغرض التصنيف التجاري للمعادن والخلائط المعدنية الجدول (3-4) تبين مقارنة بين نظام AISI و UNS.

إن خلائط الفولاذ المقاوم للصدأ يمكن أن تقسم ضمن سبع عائلات أساسية:

- الفريتية. - المارتنسيتية. - الأوستينيتية.
- المتصلب بالترسيب Precipitation Hardenable:
- السوبر فريتية. - (الفريتية - أوستينيتية). - السوبر اوستينيتية.

جدول (3-4): يبين مقارنة بين نظام AISI و UNS لتصنيفات الفولاذ المقاوم للصدأ

الفولاذ الاوستينيتي			
AISI TYPE	UNS Designation	AISI type	UNS Designation
201	S20100	308	S30800
202	S20200	309	S30900
204	S20400	309S	S30908
204l	S20403	310	S31000
205	S20500	310S	S31008
209	S20900	314	S31400
22-18-s	S20910	316	S31600
18-8.8 plus	S20220	316l	S31603
301	S30100	316F	S31620
302	S30200	316N	S31651
302b	S30215	317	S31700
303	S30300	317L	S31703
303se	S30323	321	S32100
304	S30400	329	S32900
304l	S30403	330	N08330
	S30430	347	S34700
304n	S30451	348	S34800
305	S30500	384	S38400

الفولاذ الفريتي			
405	S40500	446	S44600
409	S40900	439	S43035
429	S42900	444	S44400
430	S43000	26-1	S44627
430F	S43020	26-3-3	S44660
430FSE	S43023	29-4	S44700
434	S43400	29-4	S44735
436	S43600	29-4C	S44800
442	S44200		
الفولاذ المارتنسيتي			
403	S40300	420f	S42020
410	S41000	422	S42200
414	S41400	431	S43100
416	S41600	440A	S44002
416SE	S41623	440B	S44003
420	S42000	440	S44004

- **عائلة الفريت:**

اسم هذه العائلة مشتق من الطور الفريتي، أو نسبة إلى مكون الحديد الصافي للفولاذ الكربوني الذي يبرد ببطء من منطقة الأوستينيت، إن طور الفريت للحديد النقي هو طور مستقر موجود عند درجة حرارة تحت 910 درجة مئوية، ويكون الطور الأوستينيتي لخلائط (الحديد- كروم) منخفضة نسب الكربون موجوداً عند درجات الحرارة العالية لغاية نسب 12% من الكروم، وفوراً بعد هذه النسبة من التركيب الخلائط تكون فريتية في كل الدرجات حتى نقطة الانصهار، بشكل الكروم بسهولة أكاسيد تتصف بأنها شفافة، وتؤدي إلى حدوث مقاومة عالية جداً. الكروم أقل فعالية من الحديد وعندما يخلط مع الفولاذ فإنه يشكل أكاسيده أو لا، بزيادة محتوى الكروم في الفولاذ بالتدريج حتى 2% يحسن مقاومة الخليطة للتآكل الجوي، ويستمر ذلك بشكل خطي حتى نسبة 12% حيث يتوقف التآكل.

أثناء استعمال الفولاذ في بيئات رطبة معتدلة، فإن إضافة ما يقارب 11% من الكروم كاف لمنع صدأ الفولاذ.

الخلائط الفولاذية الفريتية تمتلك خاصية المغنطة، ولها بنية ذرية على شكل مكعب متمركز حجميا وخواص ميكانيكية شبيهة بالفولاذ الكربوني، ومع ذلك فهي أقل قابلية للطرق، ويمكن أن تقسى بالتشكيل على البارد ولكن ليس بالمعالجة الحرارية.

إن إضافة الكروم باستمرار يحسن من مقاومة التآكل في البيئات الأكثر حدة، وبشكل خاص يقاوم تأثير المؤكسدات البيئية عند درجات الحرارة العادية والمرتفعة، محتوى الكروم ضمن خلائط الفولاذ الفريتية محدودة لغاية 28% تقريباً، وتعرف هذه الخلائط بمجموعة الفولاذ المقاوم للصدأ 400 حيث تبدأ التسميات بالعدد 400.

- **عائلة المارتنسيت:**

هذا الاسم مشتق من الطور المارتنسيتي المتجانس في الفولاذ الكربوني، ينتج المارتنسيت من تحول طوري عند التبريد السريع للفولاذ من منطقة الاوستينيت، وهذه الخلائط قابلة للتقسية بسبب التحول الطوري من المكعب المتمركز حجميا إلى الشكل الرباعي BCC وكما هو الحال مع خلائط الفولاذ فإن هذا التحول يخضع للتحكم الحراري ، والفولاذ المارتنسيتي يحوي على الأقل 11-13% من الكروم ويعتبر فيرو مغناطيسيا.

ولهذا فإن مقاومة التآكل للفولاذ المقاوم للصدأ تتعلق بنسبة الكروم، وللسبب نفسه فإن نسبة الكربون بشكل عام أعلى منها في حالة الخلائط الفريتية، على كل حال فإن مقاومة التآكل الجيدة في البيئات المعتدلة بالإضافة للمتانة العالية للفولاذ جعلت عناصر عائلة المارتنسيت مفيدة لتطبيقات الفولاذ المقاوم للصدأ.

- **عائلة الأوستينيت:**

هذه المجموعة الثالثة سميت بعد طور الأوستينيت، أي الحديد النقي الموجود في بنية مستقرة في درجات الحرارة بين 910-1400 °C وهو الطور الرئيسي أو الطور الوحيد للفولاذ الأوستينيتي في درجة حرارة الغرفة، موجود بحالة مستقرة متعلقة بتركيبه واستناداً إلى الإضافات لخلائط الأوستينيت، بشكل خاص فإن فولاذ النيكل والمنغنيز يمتلك بنية الأوستينيت المتمركز وجهيا عند درجات حرارة أدنى بكثير من الصفر المئوية حتى درجات حرارة الانصهار، وهذه العائلة من الفولا المقاوم للصدأ تعد الأكثر استعمالا بين كل أنواع الفولاذ، وهذه المواد غير مغناطيسية وغير قابلة للتقسية بالمعالجة الحرارية – ولكن يمكن أن تقسى بالتصلد الانفعالي عند المعالجة على البارد - لها بنية مكونة من مكعبات متمركزة وجهيا وتمتلك خواص ميكانيكية مشابهة

لخواص الفولاذ متوسط نسب الكربون لكن لديها قابلية أفضل للتشكيل، التصلد الانفعالي من المعالجة على البارد يكسبها مقدارا قليلا من المغناطيسية.

لقد تبين أن بعض العناصر وخصوصا الكروم والموليبيدنيوم والسيليكون تساعد على تشكل الفريت، أما الألمنيوم والنيوبيوم فقد تؤثر على تشكل الفريت حسب نظام الخليطة، أما العناصر الأخرى مثل النيكل والمنغنيز والكربون والنيتروجين وتساعد على تشكل الطور الأوستينيتي.

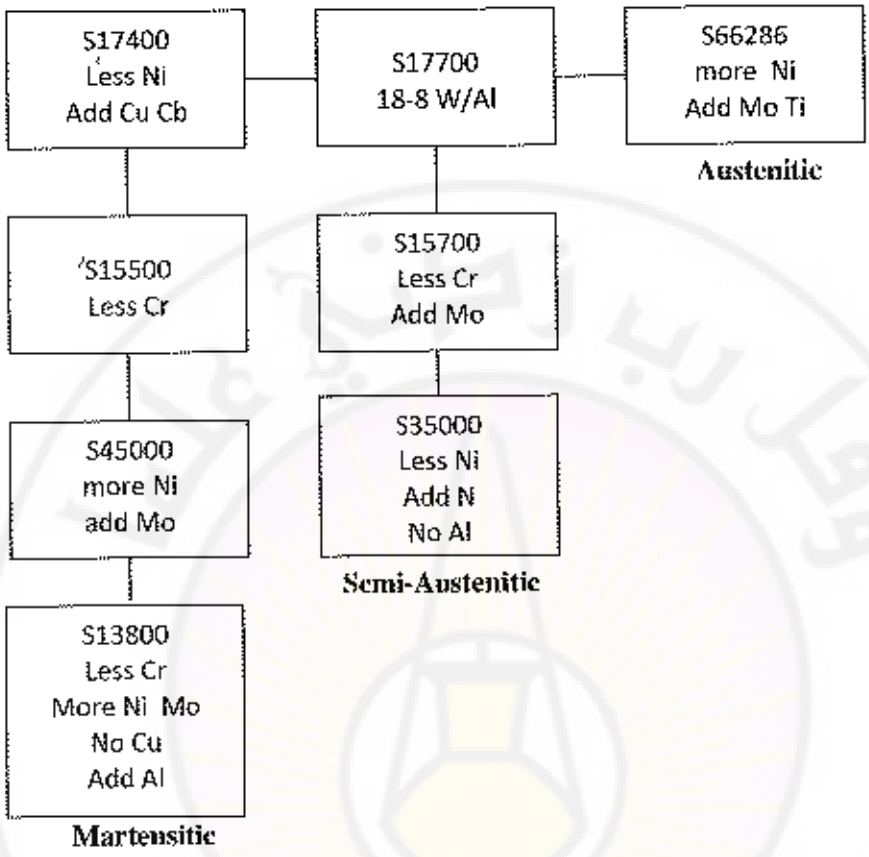
للحصول على مقاومة تآكل سطحية فإننا نحتاج لإضافة 18% كروم، إن إضافة ما يعادل 8% تقريبا من النيكل هو ما نحتاجه للتحول من الطور الفريتي إلى الطور الأوستينيتي، هذه الخلائط تضاف بشكل أولي لتشكيل البنية الأوستينيتية، وتمتاز بقساوتها وقابلية التشكيل وقابلية اللحام، والهدف الأساسي هو زيادة مقاومة التآكل للصدأ، وإن مقاومة التآكل للفولاذ الأوستينيتي يمكن أن تتحسن إلى حد كبير عند إضافة الموليبيدينيوم والتيتانيوم والعناصر الأخرى الخواص الميكانيكية والفيزيائية.

- **عائلة الفولاذ المقساة بالترسيب:**

تستخدم المعالجة الحرارية عن عمد لترسيب أطوار تسبب زيادة متانة الخليطة، إن إضافة عنصر من التيتانيوم والنيوبيوم والموليبيدنيوم والنحاس والألمنيوم تولد الطور المترسب، السبيكة النهائية تكون محلولاً لذا فإن عناصر السبيكة كلها في المحلول الصلب والمادة أنعم وأكثر ليونة وفي هذه الشروط يمكن للمادة أن تشكل وتشغل وتلحم، بعد التصنيع فإن العناصر تعرض لدورات حرارية مرتفعة أي ترسيب الأطوار المرغوبة وذلك لزيادة الخواص الميكانيكية.

هناك ثلاثة أنواع للتقسية بالترسيب للفولاذ المقاوم للصدأ وهي: المارتنسيتة والأوستينيتية والنصف أوستينيتية. العلاقة بين هذه السبائك موضحة بالشكل (3-9)، الفولاذ نصف الأوستينيتي يعتبر أوستينيت غير مستقر وهو شرط العمل ويجب أن يتحول إلى مارتنسيت قبل الشيخوخة، أما الفولاذ المارتنسيتي والأوستينيتي المقسى بالترسيب فيمكن أن يقسى مباشرة بالمعالجة الحرارية.

هذه السبائك تعطي خواص ميكانيكية عالية، ولكن ليس بمقدار خلائط الفولاذ المارتنسيتية منخفضة نسب الكربون ، بالإضافة إلى خواص مقاومة التآكل، وبشكل عام خواص هذه السبائك لمقاومة التآكل أقل من أنوع الفولاذ 304 ، بالرغم من أن هناك خلائط تقترب من مقاومة الفولاذ 316.



الشكل(3-9): يبين العلاقة بين سبائك الفولاذ المقاوم للصدأ (المارتنسيتة والأوستينيتية والنصف اوستينيتية).

- **الفولاذ سوبر فريتي:**

خلال فترة 1970 كانت الجهود العلمية موجهة نحو إنتاج معادن فرينية قادرة على تحمل الظروف العامة وبالتحديد معادن مقاومة للتنقر، السبيكة التجارية الهامة التي كانت تحقق هذه المواصفات كانت تحتوي على 26% كروم و 19% مولبيديوم، ومن أجل الحصول على مقاومة التآكل المطلوبة وخواص الصناعة المقبولة، كانت المواد تعرض لشعاع الكتروني تحت ضغط الخلاء، وأنتجت تحت اسم خلائط E-Brite، وكانت مستويات الكربون بالإضافة للنتروجين تحت مستوى 0.020%.

الخلائط سوبر فريتية تتحمل مقاومة تآكل ممتازة والخلائط المضاف لها النيكل لها تتحسن صلابتها الميكانيكية، وتكون أقل عرضة للتأثر بالعناصر الشائبة (العناصر البينية)، على كل حال فإن توفرها محدود جداً واستخدامها ما يزال محدودا حتى سماكات 0.20 إنش وذلك يعود بسبب تشكل الأطوار الهشة أثناء التبريد إلى حرارات التلدين، السماكات الكبيرة لا يمكن تبريدها بسرعة كافية وذلك تجنباً لخسارة قساوة الخليطة.

- **العائلة الفريتية الأوستينيتية:**

الفولاذ الفريتي- لأوستينيتي يحتوي تقريبا على 50% من الطور الأوستينيتي و50% من الطور الفريتي ويتمتع بمقاومة للتآكل، هذه الخلائط تحتوي على كميات عالية نسبيا من الكروم وبما فيه الكفاية من النيكل ومواد تساعد على تشكل الطور الأوستينيتي .

الفولاذ المزدوج يحتوي على الموليبيدينيوم كمكون للسبيكة وهو مسؤول عن تحسين مقاومة الفولاذ للتآكل في البيئات الكلورية، والموليبيدينيوم يقلل من التأثر التنقري بفعل الكلور، ومن تآكل الشقوق والتصدع وبشكل عام مقاومة التآكل العامة للفولاذ الفريتي الأوستينيتي أكبر من مجموعة الفولاذ 316 في أغلب الأوساط، وهذه الخلائط تقدم متانة عالية أكثر من متانة الفولاذ الأوستينيتي.

يجب توخي الحذر عند اختيار هذه الخلائط حيث إن الحد الفاصل بين الأداء الجيد والأداء ضعيف لهذه الخلائط حاد جدا، ويجب ألا تستخدم تحت شروط عمل قريبة من شروطها الحدية المقبولة، الفولاذ الفريتي الأوستينيتي غير طروق بخلاف الفولاذ الأوستينيتي، واللحام يتطلب عناية خاصة أكثر من الخلائط الأوستينيتية بسبب القابلية الكبيرة لانفصال في تركيبه والحساسية لدرجات حرارة اللحام العالية.

- **الفولاذ السوبر أوستينيتي:**

الفولاذ السوبر أوستينيتي طور لتقديم خلائط مع مقاومة أفضل للتآكل المركز، وتتضمن هذه العائلة من الفولاذ تحسين مقاومة التآكل النقري، ومقاومة لتآكل الشقوق ومقاومة جيدة ضد التآكل للأكاسيد القوية.

2. صناعة الفولاذ المقاوم للصدأ:

تصنع أنواع الفولاذ المقاوم للصدأ كافة بوسائل تصنيع تقليدية.

- **التشكيل على الساخن:**

الفولاذ يشكل بسهولة بعمليات مثل الدرفلة على الساخن، البثق، والتشكيل والطريقة الأخيرة هي للعناصر المنهية أو نصف المنهية، الدرفلة على الساخن تستخدم بشكل عام لإنتاج صفائح من الفولاذ، أما البثق يستخدم مع الفولاذ الأطرى والمواد اللامعدنية، وفي طريقة البثق يتم انتاج القطعة المطاوبة عن طريق إدخال قضيب في قالب له فتحة تحدد شكل القطعة المطاوبة، وهناك العديد من الشركات تنتج الفولاذ بطريقة البثق على الساخن، نسبياً تعتبر الكميات الصغيرة عملية واقتصادية، وعملياً أي شكل له مقطع عرضي يتسع ضمن دائرة قطرها 165 mm يمكن معاملته بالبثق وأكبر وزن المنتج يمكن معاملته بالبثق الساخن هي بحدود 44.91 kg/m ومساحة المقطع الأصغري هي بحدود $18.07\ mm^2$ وأصغر ثخانة هي 3.175 mm ويمكن انتاج الأشكال المفرغة أيضا.

يستخدم التشكيل على نطاق واسع من أجل أنواع الفولاذ القاوم للصدأ كافة وبأحجام تتراوح من عدة أونصات إلى آلاف الباوندات والقطع الأصغر من الإنش إلى القطع التي يصل طولها لعدة أقدام، ومن العمليات الخاصة البلص والثقب والصك تندرج تحت التشكيل.

هناك ميزة خاصة للتشكيل وهي أن البلورات تتبع محيط القطعة بينما لا يحدث ذلك في عمليات التشغيل على الآلات وصب المعادن في قوالب ومن ميزات هذه الطريقة:

- خلال عملية التدفق في المعدن الصلب فإن عملية التشكيل تضع المتانة غالباً في الأ اكن الصحيحة.
- النسبة العالية للمتانة بالنسبة للوزن تسمح باستخدام مقاطع رقيقة خفيفة دون خسارة في عامل الأمان.
- التشكيل يحسن من مقاومة الصدم، مقاومة التعب، قابلية الطرق، التمزق والاستطالة والخواص الميكانيكية الأخرى.
- التفاوتات هي من رتبة جزء من الألف من الإنش وتتفاوت من قطعة لأخرى مما يقلل من عمليات التشغيل اللاحقة.
- التشكيل يحافظ على بنية متجانسة للمعدن.

- **التشكيل على البارد:**

الخواص الميكانيكية للفولاذ تفيد في معرفة قابليتها النسبية للتشكيل في حرارة الغرفة، الأوستينيت اللدن يصنف من حيث امتلاكه لمعامل خضوع منخفض ومتانة شد عالية واستطالة عالية، بعض هذه الخلائط لايمكنها العمل في درجات حرارة عالية عند العمل على البارد مما يرفع من متانتها، الخلائط الفريتية لديها قابلية طرق أقل من الخلائط الأوستينيتية وهي أقرب إلى الفولاذ الكربوني، مع الأخذ بعين الاعتبار خواصها الميكانيكية. وهي لا تعمل بصعوبة عند التشكيل على البارد بسبب خواصها الميكانيكية الممتازة، الفولاذ المقاوم للصدأ يعطي قابلية ممتازة للتشكيل على البارد.

3. الفولاذ المقاوم للصدأ عالي المواصفات:

ترسب جزئيات كربيدات الكروم يقود الى تقليل الأوستنيت المحيط في الكروم، لذلك الانحلال الكهربائي يثار بين المنطقة الفقيرة بالكروم والمناطق المجاورة الغنية بالكروم. لذلك من الضروري تسخين الخليطة لدرجة 1050C° ومن ثم تبريدها ليعود الكربون للحالة الصلبة. الراسب الكربيدي المتشكل يقود لخلل يعرف بـ "weld-decay". هذا الخلل ممكن أن يقل تاثيره بواسطة اضافة كمية قليلة من التيتانيوم والموليبيدينوم او النيوبيوم. العناصر التي تملك قابلية لتشكل الكربيد وهكذا معظم الكربون يتحول لكربيد عند درجات الحرارة العالية ولذلك الكربون يفقد قابليته لتشكل كربيد الكروم خلال التبريد البطيء في عملية اللحام. وفي هذه الحالة يتم تجنب اي اختلاف في محتوى الكروم خلال عملية تشكل البنية البلورية.

التطور في الصناعات الفضائية الزم الطلب على الفولاذ المقاوم للصدأ عالي المواصفات، وهذه الخلائط أصبحت موجودة في الكثير من الصناعات. هذا الفولاذ في بعض الأحيان يقوى باضافة النتروجين الذي يعكس الكربون ويقلل مشاكل التاكل. ويقوى هذا الفولاذ بتشغيله على البارد. في الولايات المتحدة يعد (النتروبيك) الفولاذ الاوستنيتي من هذه الفئة، مثل الـ(Nitronic33) الذي يحتوي على نسب مئوية (0.05C,0.32N,3.2Ni,12Mn, 18Cr) وهذا الفولاذ يمتلك ضعف ميزات الفولاذ المقاوم للصدا التقليدي. فحص هذا التركيب للفولاذ يشير إلى أن هذا الفولاذ سيبقى أوستنيتي بشكل كامل بعد لحامه ولايحدث تشكل المارتنسيت. بعض انواع الفولاذ المقاوم للصدأ في عملية التقسية الترسيبية يمكن أن تكون بنيته إمّا مارتنسيتية أو اوستنيتية، والفولاذ المارتنسيتي من هذا النوع يحتوي على (17Cr,4Ni,4Cu) وعلى كمية قليلة

من الموليبدينوم وبتسخين الفولاذ هذا للدرجة 1000°C ومن ثم تبريده بالهواء يعطي بنية مارتنسيتية ولاحقا تتم المعالجة الترسيبية بدرجة حرارة من °C (500-600) وتعطي بنية متنسة متماسكة. تركيب وخواص واستخدامات بعض انواع الفولاذ الحاوي على النيكل والكروم معطاة بالجدول(3-5).

جدول (3-5): يبين تركيب وخواص واستخدامات بعض انواع الفولاذ المقاوم للصدأ المحتوي على نسب عالية من النيكل والكروم.

الاستخدام	المعالجة الحرارية	الخواص الميكانيكية الرئيسية				نسب المزج					AISI/DIN
		منطقة إختزال الوزن %	الإستطالة %	مقاومة الشد N/mm^2	قيمة الإجهاد عند نقطة الخضوع N/mm^2	الوضع	عناصر اخرى	Cr%	Ni%	Mn%	C %	التسمية
في صناعات السكر وفي استخراج الفحم	تشكيل سريع عند الدرجة 1050 °C	–	27	550	335	طري	Ti0.25 Si0.5	11.5	0.75	0.75	<0.03	–
في الاعمال الخزفية		50 –		618 896	278 803	صقيلة مدلفنة على البارد مطراة	–	18	8.5	0.8	0.05	302S25
يستخدم بشكل مكثف بالزراعة لصناعة حامض النتريك		50 42	45 30	649 803	278 803	دلفنة على البارد مطراة	Ti0.6	18	8.5	0.8	0.05	321S20
مناسب لادوات المطبخ والمائدة		50	50	579	232	قطرية	–	12.5	12.5	0.8	0.05	–
مناسب للادوات المنزلية		65	60	618	232	قطرية	–	10.0	18.5	0.8	0.03	304S15

3-1-13: الفولاذ المحتوي على الموليبدينوم:

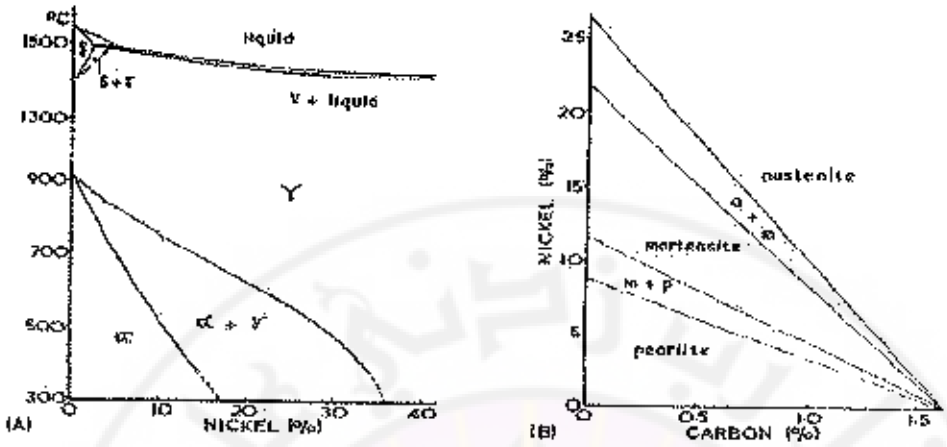
تعد الولايات المتحدة الأميركية المنتج الرئيسي للموليبدينوم في العالم كما وتعد كل من كندا والصين وتشيلي منتجين مهمين لهذا العنصر. وبشكل عملي معظم إنتاج العالم من هذه المادة كان يستخدم في صناعة موليبدات الامونيوم للكواشف الكيميائية، أما اليوم فالاستخدام الرئيسي للموليبدينوم هو في صناعة خلائط الفولاذ. إن أحد الاستخدامات الرئيسية للموليبدينوم هو تخفيض قابلية لـ (temper-brittleness) اي للهشاشة في الفولاذ منخفض نسبة النيكل والفولاذ منخفض نسبة الكروم واضافة كمية 0.3% من الموليبدينوم تكون كافية. حيث يمتلك الفولاذ الناتج مواصفات عالية بغض النظر عن معدل التبريد بعد عملية السقاية. والفولاذ الحاوي على (النيكل والكروم والموليبدينوم) افضل مزج في الخواص وبخاصة عند الحاجة لعنصر فيه مقاومة الشد عالية مع خواص طواعية جيدة.

يضاف الموليبدينوم أيضا للفولاذ الحاوي على كروم وذلك لإعطائه تحسناً عاماً في الخواص التشغيلية والميكانيكية، حيث يعد الفولاذ الحاوي على النيكل وا لموليبدينوم مناسب في الحالات المتطلبة قساوة. الموليبدينوم يدخل في الفريت الذي يقوى بشكل كبير وأيضا يشكل كربيد قاسي ثابت (MO_2C). كمية قليلة من الموليبدينوم تكون مؤثرة في تقليل معدلات التغير في البنية وبخاصة تحول الاوستنيت لبرليت. الموليبدينوم يقاوم درجات الحرارة العالية والاستطالة عند هذه الدرجات للخلائط. في الفولاذ المستخدم للسرعات العالية الحديثة معظم التنغستين تم استبداله بالموليبدينوم.

3-1-14: الفولاذ المحتوي على النيكل:

يستخدم النيكل بشكل واسع من أجل الأهداف الهندسية، عموما عند استخدام كميات فوق 5 % منه يكون الهدف هو زيادة المتانة والصلادة وأيضا استخدم بكميات كبيرة في الفولاذ المقاوم للصدأ Stainless Steel والفولاذ المعالج حراريا.

إن إضافة النيكل إلى الفولاذ متوسط نسبة الكربون تعمل على توازن الطور الأوستنيتي في درجات الحرارة العالية، وذلك بزيادة درجة حرارة النقطة A_4 وتخفيض درجة حرارة النقطة A_3، إن إضافة 25% من النيكل إلى الحديد الصافي يحولها إلى بنية أوستنيتية وغير مغناطيسية، وذلك حتى بعد التبريد البطيء إلى درجة حرارة الوسط المحيط، ويمكن استنتاج البنية الناتجة عن هذه المعالجة من خلال المخطط بالشكل (3-10B).



الشكل(3-10): يبين تأثير النيكل كعنصر سبائكي في الفولاذ.

لايشكل النيكل كربيدات، وفي الحقيقة فإن وجود النيكل في الفولاذ يشكل كربيد حديد أقل استقراراً وهذا يقود إلى اكتساب الأثر الغرافيتي، من أجل ذلك السبب لايضاف النيكل نهائيا إلى الفولاذ عالي نسبة الكربون مالم يكون مصحوباً بالعناصر التي تشكل كربيدات مستقرة، السبائك الفولاذية الحاوية على النيكل كعنصر سبائكي وحيد تكون قليلة الكربون، فولاذ قليل النيكل، عندما تكون السبيكة ذات كمية كربون أكبر ، عندما يكون المنغنيز موجوداً بكثرة لأنه يشكل كربيداً مستقراً.

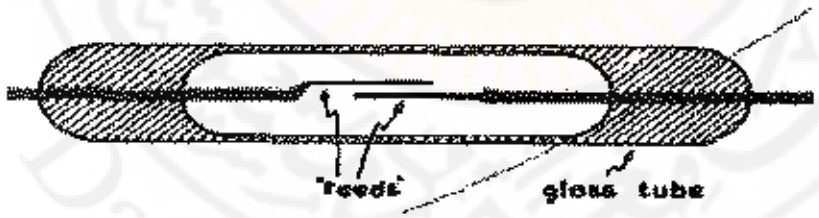
يزيد النيكل من متانة الشد والصلابة للفريت في الفولاذ المنخفض كبديل بسيط في المحلول الصلب، كما أن إعادة التبلور التي يتمتع بها لها أثر في جعل سبائك الفولاذ قليلة النيكل قليلة الكربون أفضل في عمليات التقسية، لذلك نمو البلورات سيتوقف خلال التسخين لفترات طويلة في مجال 900 درجة.

إن الفولاذ الحاوي على كميات كبيرة من النيكل وكميات صغيرة من الكربون يقدم وبشكل كبير تخلفية حرارية في التحول البوليمرفي. في الفولاذ الحاوي على 15% نيكل لن يبدأ التحول في التبريد حتى درجة حرارة حوالي 250 درجة، عندها يبدأ المارتنسيت بالتحول، على أي حال، المارتنسيت لن يتحول إلى أوستنيت حتى درجة حرارة حوالي 600 درجة، هذه التخلفية (التباطؤ) في التحول هو أساسي في استخدام النيكل مع الفولاذ المعالج حرارياً.

إن انتشار سبائك الفولاذ الحاوي على النيكل كعنصر سبائكي وحيد قليل وذلك بسبب التأثير الغرافيتي الذي يضيفه النيكل على السمنتيت، هذا ماجعل بشكل طبيعي استخدام المغنيز بنسب فوق 1% من أجل تحسين استقرار الكربيدات ومن النيكل نسب 3 و 5 % من أجل تحسين القساوة ولكن ذلك أدى إلى استبدال ذلك بسبائك نيكل – كروم ونيكل – موليبديوم ونيكل كروم مولبيديوم.

النيكل يخفض من معامل التمدد الحراري لسبائك الحديد نيكل بشكل تدريج، حتى بوجود 36% من النيكل المعامل يبقى صغيراً(36% Ni, less than 0.1 %C) تم تطويره أصلا بشكل أساسي من أجل أشرطة القياس المستخدمة في قياس مساحات الأرض، في عام 1920 العالم Guillaume نال جائزة نوبل في الفيزياء بسبب ذلك، وأيضا يستخدم في بعض أجزاء الساعات حتى أن بعض السبائك المشابهة يتم استخدامها في تطبيقات عديدة مثل بطانة للأوعية التي تحوي الغاز الطبيعي أو أجهزة قياس الحرارة الحديثة.

إن من أهم المميزات لسبائك الفولاذ عالية النيكل هو النفاذية المغناطيسية العالية، فمثلا في سبيكة تحوي 51% نيكل و 49% حديد لها معامل التمدد للزجاج نفسه وتستخدم بشكل كامل في إنتاج المفاتيح الأنبوبية كما هو موضح بالشكل (3-11) حيث يبين الشكل وجود انبوبين مصطفين ومغلقين في ظرف زجاجي محكم الإغلاق ويحوي غازاً خاملاً، من أجل المفتاح الحقل المغناطيسي يكون مطبقاً خارج الأنبوب، الأنبوبان يشغلان النابض الكابولي، المفتاح يستخدم بشكل واسع بالاتصالات الهاتفية والتطبيقات النصف إلكترونية.

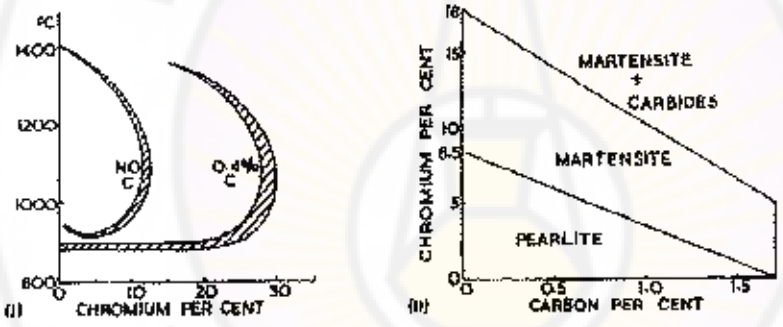


الشكل(3-11): يوضح مبدأ عمل الجهاز.

3-1-15: الفولاذ المحتوي على الكروم:

معظم الكروم المنتج يستخدم في صناعة سبائك الفولاذ، وفي الصناعات الإلكترونية. من المفروض أن إضافة الكروم إلى الفولاذ ستزيد بشكل أتوماتيكي القساوة، ولكن هذا ممكن حدوثه فقط عند وجود كمية كافية من الكربون، إن الزيادة في القساوة ترجع بشكل أساسي للكرابيد المستقرة التي يشكلها الكروم وهي قاسية مثل Cr_7C_3 و $Cr_{23}C_6$ ، بدلا من ذلك، ضعف هذه الكرابيد تتشكل في الحديد، وجميع هذه الكرابيد تكون صلبة وقاسية أكثر من السمنتيت العادي، ففي الفولاذ قليل نسبة الكربون إضافات الكربون تعمل على زيادة المتانة، مع خسارة بعض قابلية التطريق وذلك لتشكيله محلول صلب في الفريت.

لمعرفة تأثير الكروم على الفولاذ يجب دراسة مخطط التوازن لكربون كروم، شكل (3-12).



الشكل(3-12): يبين تأثير الكروم كعنصر سبائكي في الفولاذ.

فمن الواضح بأن المجال لغاما (γ) يتضيق بشكل كامل عند النسبة المئوية 12% أي أن التحول من γ إلى α لن يتم. فنستنتج أن الكروم من العناصر المثبتة للفريت، ويجب التمييز بين الفريت α الناتج عن الأوستنيت والفريت γ الناتج عن التفاعل البريتكتيكي، كما أن الحلقة γ على اليسار تدل على أن الكروم سيعطي عمقاً أكبر في القساوة بسبب التأخر الذي يحدث أثناء التحولات.

إن الفولاذ قليل الكروم قليل الكربون هو المنتشر حالياً، وذلك بسبب قساوته المعروفة، ويستخدم الفولاذ قليل نسبة الكروم ومتوسط نسبة الكربون في تصنيع المحاور والوصلات والمسننات.

الفولاذ الذي يحتوي على حوالي 1.0 % كربون والذي يعد هو المسؤول عن تحديد القساوة أيضا، يستخدم في صناعة القوالب المعدنية وفي تصنيع الكثير من أجزاء الآلات.

أيضا يضاف الكروم بكميات كبيرة فوق 25% وله دور كبير في مقاومة التآكل وذلك يعود إلى الطبقة الواقية والحامية التي تتشكل على السطح وهي من الأكاسيد، هذه الطبقة من الأكاسيد تكون رقيقة، وذلك لأن الفولاذ يتعرض لعمليات صقل.

هذه السبائك فريتية وغير قاسية وذلك يعود إلى وجود الكربون والنتروجين حيث يوجدان بشكل محدود.

إن أفضل الخواص الميكانيكية والتشكيلية يمكن الحصول عليها عندما تكون هذه الإضافات بمقدار أصغري حسب الضرورة لمقاومة التآكل. هذه المميزات المشتركة يمكن حسابها من العلاقة:

$$Ti + Nb = 0.2 + 4\,(C + N)$$

وذلك عند إعادة التبلور بحذر للفولاذ غير القابل للصدأ بحيث لا تزيد النسبة عن 0.01% لكل من الكربون والنتروجين، أما بالنسبة للتيتانيوم والنيبيوم فلاتزيد عن 0.28%.

الحديد الفريتي المقاوم للصدأ يستخدم بشكل واسع في الصناعات الهندسية والكيميائية. أما استخدام السبائك فيكون في عدة نواحٍ مثل أواني الطعام، وأوعية بسترة الحليب وغيرها....

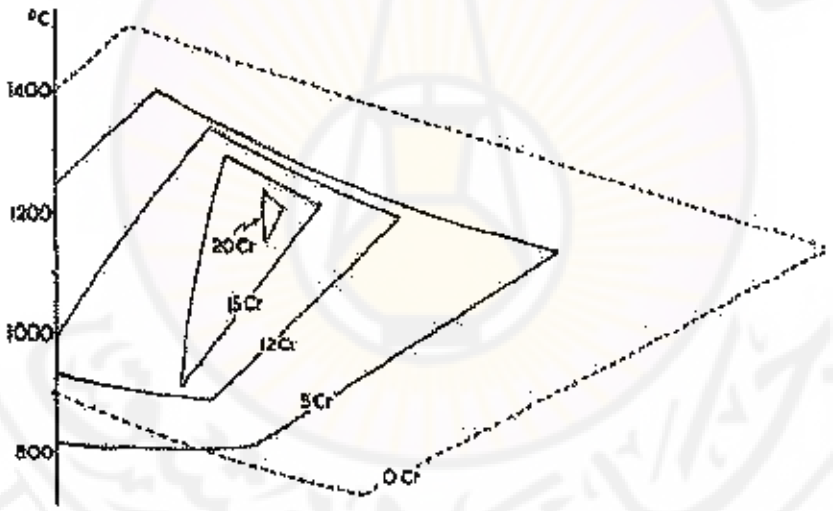
إن أفضل سبيكة معروفة حتى الآن من حديد الفريتي المقاوم للصدأ تحتوي على 13% كروم وعلى 0.05% من الكربون.

إذا كانت كمية الكربون الموجودة في الخليطة حوالي 0.1% تكون فولاذ غير قابل للصدأ تزداد متانته عند المعالجة بدرجات حرارة عالية، معظم السبائك في هذه المجموعة تحتوي على 13% كروم و 0.3% كربون، وهذا الفولاذ المستخدم في الأيام الحالية وطبعا هذا يختلف عن ستانلس ستيل الذي تم إنتاجه عام 1913 على يد العالم هاري بريرلي. شكل(3-13).

3-1-16: الخلائط الحديدية المركبة:

بذية الفولاذ عالي السرعة المعالج بالحرارة تتألف من كريات صغيرة معزولة من كربيد معقد في أرضية مارتنسيتية الذي بدوره يحوي عناصر الخليطة المذابة بشكل كاف ليخضعها بشكل بطيء لتأثيرات عملية المعالجة.

النمط التقليدي للفولاذ عالي السرعة، عندما يكون مقسى بشكل صحيح، سوف يحتفظ بالقساوة العالية حتى 550 °C، بينما معظم الفولاذ الكوبالتي سوف يحتفظ بقساوة مشابهة حتى أبعد من الدرجة 100°C الشكل (3-14). بالرغم من أن الفولاذ عالي السرعة عموما شهير باستخدامه في العمليات الآلية تحت ظروف صعبة قوته العالية في درجات الحرارة المرتفعة تجعله مفيدا في الأدوات التي تعمل على الساخن، من الأنماط الأخرى المقص الساخن والمثقب من أجل التشكيل على الساخن للصواميل.

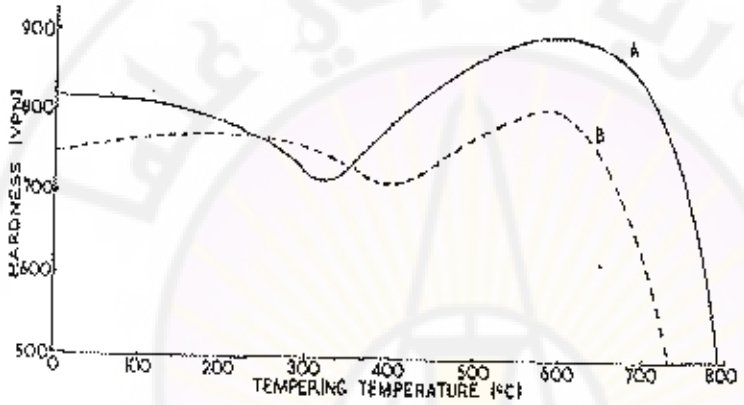


الشكل(3-13): يوضح تأثير الكروم أثناء وجوده في الطور الأوستنيتي للفولاذ.

التلبيس بالفولاذ في حد ذاته يمكن أن يعزز التطور النتريدي بعد أن تكون عملية المعالجة الحرارة العادية قد اكتملت.

أدوات القطع المصنعه من الكربيد السمنتيتي تحضر بمركزتها في درجات الحرارة العالية والضغط، في غلاف هيدروجيني، بمزيج من الكربيد التنغستيني المسحوق مع مسحوق الكوبالت. أحيانا الكربيد التنغستيني يستبدل بـ مسحوق كربيد من معادن أخرى مقاومة للحرارة مثل تانتاليوم، موليبديوم، تيتانيوم، والكربيدات السيليكونية، في كل حالة الكوبالت (أو بعض المعادن الخشنة الأخرى) تشكل المادة الأساس.

البنية النهائية تشبه إلى حد ما بنية الفولاذ عالي السرعة، لكن بينما صفات الفولاذ عالي السرعة تتطور بالمعالجة الحرارية فإن بنية الكربيد السمنتيتي تنتج بالطرق الميكانيكية.



الشكل (3-14): العلاقة بين القساوة ودرجة حرارة المعالجة للفولاذ عالي السرعة.

الغرض هو الجمع بين القوة في درجات الحرارة العالية والقساوة في الأوكسيدات المعدنية الملائمة، النتريدات المزودة بقابلية كافية للسحب والطرق من عنصر الربط المعدني، وبالتالي هذا يعطي المادة مقاومة حرارية وميكانيكية للصدم ومناسبة لاستخدامات متعددة كصناعة المحركات النفاثة أو الاستخدام في درجات الحرارة العالية كما في أدوات القطع.

- **الخصائص المغناطيسية للمواد:**

بالحديث إما عن المواد الممغنطة أو النواقل الكهربائية التي تنقل تياراً، إبرة البوصلة تعمل بموجب زوج ربط الذي بدوره يجعلها تدور. هذا الزوج يعزى إلى حضور قوة الحقل المغناطيسي المحيطة بالمواد الممغنطة أو الناقلة للتيار.

الحديد عموما يترافق بالمغناطيسية وهناك ثلاث مواد انتقالية هي: الكوبالت، النيكل، الفاناديوم تتصف أيضا بمغنطة قوية، أو فيرو مغناطيسية كما سميت (الفرومغناطيسية: اكتشفت العلاقة بين التدفق الكهربائي والحقل المغناطيسي من قبل العالم أمبير حيث ينشأ الحقل المغناطيسي من دوران الإلكترونات) ورغم ذلك فإن العناصر الأخرى تمتلك خصائص مغناطيسية ضعيفة.

العديد من المواد (بارو مغناطيسية) التي تجذب بشكل ضعيف من قبل حقل مغناطيسي قوي. وبناء على ذلك المواد البارو مغناطيسية مثل الكروميوم عندما توجد في حقل مغناطيسي يحمل على نحو ضعيف تدفقاً مغناطيسياً أكبر من المطابق له في الخلاء. بعض المعادن وجميع اللامعادن هي (ديامغناطيسية) تقاوم بشكل ضعيف الحقل المغناطيسي. هذه الديامغناطيسية ممكن أن تحمل تدفقاً مغناطيسياً ضعيفاً مقارنة بالخلاء.

فقط المعادن والسبائك والخلائط التي تملك خصائص فيرومغناطيسية تكون صالحة للاستخدام كمواد مغناطيسية وذلك تحت تأثير الحقل المغناطيسي.

في الذرات المستقرة يمكن اعتبار الالكترونات كدقائق صغيرة تتحرك ضمن مدارات حول النواة، وفي الوقت نفسه يمكن أن تعتبر أن كل الكترون يدور حول محوره الخاص وهذا الدوران يولد الحقل المغناطيسي.

حسب قانون بولي في الذرات المستقرة لا يمكن لأكثر من الكترونين أن يشغلا المستوى الذري نفسه. وحيث إن الدوران المتعاكس لهذه الالكترونات ينفي الحقل المغناطيسي الناتج عن كل الكترون لهذا تعتبر هذه العناصر غير مغناطيسية، ذرات بعض العناصر الناقلة تكون غير مشبعة وتحوي عدداً فردياً من الالكترونات في مداراتها، ولذلك سيكون للعديد من الذرات أثر مغناطيسي.

لهذا السبب العناصر الفيرومغناطيسية والعناصر ذات النفاذية المغناطيسية العالية توجد في جدول العناصر (مجموعة النواقل) في العناصر (الحديد، كوبالت، نيكل) يكون الأثر المغناطيسي واضحاً، وتكون الأيونات متوضعة بشكل مناسب في الهياكل الشبكية لذلك أثناء عملية المغنطة تصطف الذرات بشكل تكون محاورها متوازنة ويتولد حقل مغناطيسي قوي.

تعتمد الخصائص المغناطيسية بشكل كبير على المجال الذري، إذا كانت المسافة بين الذرات كبيرة نسبيا فإن قوى التجاذب تكون ضعيفة لتقاوم تأثير الهيجان الحراري في المدارات الخارجية لذلك لا يتكون أي حقل مغناطيسي. أما إذا كانت المسافة بين الذرات صغيرة فإن القوى الذرية الناتجة كبيرة بحيث لا تسمح للإلكترونات بالخروج عن مسارها، تكون الشروط ملائمة بشكل

واضح لتشكل الحقل المغناطيسي عندما تكون أنصاف أقطار الذرات بين (1.5–2) × نصف قطر المستوى الذري الأول لذلك (الحديد، الكوبالت، النيكل) تكون ملائمة لهذه الشروط بينما المعادن الناقلة الأخرى (تيتانيوم، كروم،منغنيز) تكون خارج هذا المجال (لا تحقق الشروط).

في الحقيقة عندما يحتوي المنغنيز على مسافات كافية لإذابة النتروجين ليملأ مجاله الذري بمقدار كاف يصبح المنغنيز غير مغناطيسي.

بشكل مشابه المسافات الذرية في بعض المواد السيراميكية مثل $6Fe_2O_3$، BaO_2 تجعلها ملائمة لتكون مواداً فيرومغناطيسية.

الخلائط المغناطيسية الحديثة لها خواص مشابهة بشكل ما من حيث الخواص مثل (الحديد، الكوبالت، الألمنيوم، النيكل) بينما أنواع السيراميك المركب يحتوي بورون، باريوم، وبعض العناصر النادرة مثل النيوبيوم وبشكل شائع المغانط التي تعتمد على عنصر النيوبيوم يمكن استبداله بعنصر الساماريوم المتوفر بكثرة وكنتيجة لذلك سيكون سعره أرخص. بينما جزيئات المعدن الفيرومغناطيسي توجد بمناطق صغيرة تعرف باسم المجال المغناطيسي.

الفحص المجهري الذي يستخدم طريقة الانتشار الغيرغروي (الذي يمتلك سلوك برادة الحديد) يبين أنه إذا طبقنا حقلاً مغناطيسياً خارجياً فإن الحقول المغناطيسية المصطفة عكس الحقل المطبق ستعكس اتجاهها. بهذه الطريقة تنمو الحقول ذات الاتجاه الصحيح على امتداد الحقول الأخرى بحركة المناطق الحدودية التي تعزل هذه الحقول. المناطق الحدودية تدعى(Blach walls) بذلك الحقول تصبح متشابهة الاتجاهات ويظهر لدينا حقل مغناطيسي.

إذا احتفظت المادة بهذا الاصطفاف عند إزالة الحقل المغناطيسي الخارجي تدعى المادة بالقاسية مغناطيسيا ولكن كثيراً من الحالات لا تحافظ المواد على مغناطيسيتها وتدعى في هذه الحالة الطرية مغناطيسيا. في أي حال تعتمد القساوة أو الطراوة المغناطيسية لمادة على قساوتها الفيزيائية. ومن الممكن أن يكون ذلك بسبب أن الاجهادات المتبقية داخل المادة تمنع العودة العشوائية للحقول عندما تتمغنط هذه المادة. الشوائب والحفر التي تتضمنها المادة تجعل المناطق المغناطيسية ذات طاقة ضعيفة، وهذا يؤدي إلى تثبيط Blach walls. وبما أنه من الصعب تغيير شكل المادة فإنه من الصعب أيضا مغنطتها ولكنها عندما تتمغنط تحافظ على مغنطتها.

المغانط القوية يمكن تقويتها قسريا باستخدام إبرة صغيرة جدا سماكتها أقل من سماكة الحاجز الفاصل بين المناطق المغناطيسية للمادة. وهذه الإبرة تتمغنط بشكل تلقائي واتجاه حقلها

المغناطيسي لا يمكن تغييره لأن جدار المنطقة الممغنطة يكون معدوماً. بعض المواد الدائمة الممغنطة الحديثة تحتوي على إبر صغيرة جدا من الحديد بشكل ملائم في أرضية بلاستيكية.

عندما تتمغنط المواد المغناطيسية إلى حد الإشباع فإن الزيادة في الحرارة تؤدي إلى زيادة الحركة العشوائية للجزيئات، وبذلك تصل إلى درجة الصفر أو تفقد مغناطيسيتها عند درجات حرارة مثلا (779°، 1120°، 385°، الحديد، كوبالت، نيكل بالترتيب) عند هذه الدرجة من الحرارة تتوقف المادة عن كونها فيرومغناطيسية فتصبح أقل نفاذية مغناطيسية، وهذا التحول عكوس عند تبريد المغانط الدائمة صممت لكي تحافظ على كثافة عالية من المغنطة لفترة لا نهائية بشرط أن لا تتعرض لتأثير مغناطيس عال جدا.

القوى المغناطيسية والتدفق المغناطيسي القطبي بالمغانط الدائمة تعتمد على تصميمها ونوع الفولاذ أو الخلائط التي صنعت منها.

3-1-17: سبائك الفولاذ المنخفض نسبة الكربون:

سبائك الفولاذ المنخفض نسبة الكربون هي تلك التي تحتوي على(2-8 %) من مجموع العناصر التي تحتوي على المنغنيز والسيليكون والنحاس ولكن نسبة المنغنيز أكبر من نسبة النحاس والسيليكون حيث (1.65% منغنيز) و(0.6% سيليكون) و(0.6% نحاس).

من الممكن تقسيم الفولاذ على النحو التالي:

- فولاذ منخفض نسبة الكربون مسقي يتحمل قوى فعالة بحدود Ksi (50-150) واجمالي العناصر الداخلة فيه تشكل حوالي 4 %.
- فولاذ متوسط نسبة الكربون يتحمل قوى كبيرة تصل لحوالي Ksi 200 وكمثال نموذجي عليها هي فولاذ ASI 4130 وفولاذ 4340.
- فولاذ محدد نسبة الكربون وكمثال عليه 2100-8620
- الكروم والمولبيديوم المقاوم للحرارة الذي يحتوي على1% مولبيديوم و9% كروم مثال عليه ASI في السلسلة 9xxx.

بالإضافة لذلك سلاسل الفولاذ التي تتأثر بالعوامل الجوية والتي تحتوي على إضافات صغيرة من النحاس والكروم والنيكل لتشكيل أكاسيد ملتصقة على السطح أثناء التعرض للهواء الجوي تنتج أيضا عند كميات كبيرة نسبيا من خليطة العناصر، تضاف للفولاذ الكربوني فتكون ميزة سلوك هذا الفولاذ مجهولة حيث معظم خلائط الفولاذ متوسط أو عالي نسبة الكربون، أضيف إليها

لتعدل خصائصها لحد معين حيث إن الخصائص المميزة تعتمد على نسبة الكربون والنسبة المئوية لعنصر السبيكة المطلوبة لغرض معين هي 1(%) ويمكن أن تصل إلى 5%.
وعندما يكون الفولاذ جاهزا للاستخدام فإنه سيكون بالغالب محتويا على مكونين هما الفريت، والكربيد. إن الطريقة الوحيدة ليستطيع أي عنصر سبائكي تغيير خواص الفولاذ هي تغيير الإنتشار الجزئي للكربيد في الفريت، أو تغيير خواص الكربيد.
التأثير على توزع الكربيد هو العامل الأكثر أهمية، في المقاطع الكبيرة عندما يفشل الفولاذ الكربوني بالتصلب في أنحاء المقطع كله(حتى لو تم التبريد بالماء) فإن قابلية الفولاذ للتصلب سوف تزداد بإضافة أي عنصر سبائكي (بالإمكان استثناء الكوبالت).
العناصر الأكثر تأثيرا على زيادة قابلية الفولاذ للتصلب هي المنغنيز ، السيليكون، والكروم. عناصر كالمولبدينم، التنغستن، فاناديوم هي فعالة في زيادة قابلية الفولاذ للتصلب عندما تذوب في الأوستينيت، لكن عادة ما تتصهر فيه على شكل كربيدات.
إن الفائدة الرئيسية للعناصر التي تشكل الكربيد هي أنها تمنع تكتل الكربيد في المارتنسيت المعالج بالإرجاع حيث إن الإرجاع يحرر الإجهادات الداخلية في الحديد المقسى، ويسبب استقرار أجزاء الكربيد، والخسارة الناتجة عن ذلك هي انخفاض في القساوة والصلابة. وبوجود هذه العناصر المستقرة يمكن أن تتم عمليات الإرجاع لدرجات حرارة أعلى وبالتالي خسارة أقل للقساوة، وهذا يزيد من قابلية الصفائح الفولاذية للتطريق الذي بدوره يزيد من قساوة الفولاذ.
العامل الثالث الذي يساهم في تقسية صفائح الفولاذ هو وجود العناصر السبائكية في الفريت. وجود عنصر ما في محلول أي من المعادن سيزيد من قساوة ذلك المعدن، إن العناصر التي تؤثر بشكل أكبر في قساوة الفريت هي الفوسفور، السيليكون، المنغنيز، النيكل، المولبدينوم، التنغستن، والكروم. التأثير النهائي للعناصر السبائكية هو تأثيرها على نمو حبيبات الأوستينيت. عندما يشكل المارتنسيت من الحبيبات الخشنة للأوستينيت يكون له مقاومة أقل للصدمات منه عندما يشكل من حبيبات أكثر نعومة، الألمنيوم هو أكثر العناصر تأثيراً في نمو الحبيبات الناعمة.
يبين الجدول (3-6) تصنيفات AS'TM المنتقاة للكربون والفولاذ المنخفض نسب الخلط، كما يبين الجدول (3-7) التركيب الكيميائي للفولاذ الكربوني المنخفض نسب الخلط.

جدول (3-6): تصنيفات ASTM المنتقاة للكربون والفولاذ المنخفض نسب الخلط

الوصف	رقم الـ ASTM
بنية الفولاذ المدرفل تكون على شكل صفائح وقضبان وأشكال خاصة وألواح	A 6
ألواح من أجل أوعية الضغط	A 20
قضبان مخلوطة وكربونية تم انهاؤها بالدرفلة على الساخن والبارد	A 29
فولاذ كربوني على شكل قضبان وألواح	A 36
قضبان منهية على البارد ذات نوعية قياسية	A 108
فولاذ كربوني وفولاذ HSLA على شكل قضبان وألواح وأشكال خاصة	A 131
ألواح من الفولاذ الكربونية بمتانة منخفضة أو متوسطة	A 238
أشكال خاصة وقضبان وألواح من فولاذ HSLA	A 242
ألواح من السيليكون الكربوني لأجزاء الآلات والإنشاءات العامة	A 248
قضبان خلائطية تملك متطلبات قابلية التقسية	A 304
قضبان مدرفلة على الساخن	A 322
قضبان منهية على البارد	A 331
قضبان مطبعة ومسقية ومنهية على الساخن أو على البارد	A 434
ألواح وقضبان من فولاذ الكربون العالي المتانة	A 440
ألواح وقضبان من فولاذ Mn-V-HSLA	A 441
قشور وصفائح الفولاذ الخلائطي المدرفل على الساخن أو على البارد	A 505
قشور وصفائح الفولاذ الخلائطي المدرفل على الساخن أو على البارد ذو النوعية النظامية	A 506
قشور وصفائح الفولاذ الخلائطي المدرفل على الساخن أو على البارد ذو النوعية المسحوبة	A 507
الفولاذ المكربن من أجل محامل ضد الاحتكاك	A 534
فولاذ المحامل الكروية والدحروجية ذو النوعية الخاصة	A 535
أذرع من أسلاك الكربون وحلقات حول الأسلاك	A 510
ألواح من الفولاذ الخلائطي المطبع والمسقى ذو المتانة العالية	A 514
أسلاك الكربون المتوسطة النوعية والباردة الراس من أجل لوالب الآلات	A 545
كربون متوسط النوعية وبارد الراس للبراغي السداسية	A 546
سلك ذو نوعية خلائطية بارد الراس من أجل البراغي ذات الراس السداسي	A 547
سلك ذو نوعية خلائطية بارد الراس من أجل براغي التخريم وبراغي الصفائح	A 548
فولاذ كربوني ذو راس بارد من أجل براغي الخشب	A 549
ألواح فولاذ كربوني تتطلب سقاية في درجات الحرارة المحيطة	A 573

A 575	قضبان فولاذ مدرفل على الساخن ذو نوعية تجارية
A 576	قضبان فولاذ مدرفل على الساخن ذو نوعية خاصة
A 588	ألواح فولاذ HSLA مع متانة 50 ksi
A 633	ألواح وقضبان واشكال خاصة من فولاذ HSLA الطبيعي
A 656	ألواح فولاذ HSLA من Ti-Al و V-Al-N
A 659	قشور وصفائح كربونية مدرفلة على الساخن ذات نوعية تجارية

جدول (3-7): التركيب الكيميائي للفولاذ الكربوني المنخفض نسب الخلط

	رقم الخليطة	التركيب %
فولاذ المنغنيز	13XX	Mn 1.75
فولاذ النيكل	23XX	Ni 3.5
	25XX	Ni 5.00
فولاذ الكروم والنيكل	31XX	Ni 1.25, Cr 0.65, 0.08
	32XX	Ni 1.75, Cr 1.07
	33XX	Ni 3.50, Cr 1.50, 1.57
	34XX	Ni 3.00, Cr 0.77
فولاذ الموليبدينيوم	40XX	Mo 0.20, 0.25
	44XX	Mo0.4, 0.52
فولاذ موليبدنيوم وكروم	41XX	Cr 0.50, 0.80, 0.95, Mo 0.12, 0.20,0.25, 0.30
	43XX	Ni 1.82, Cr 0.50,0.80 Mo 0.25
فولاذ موليبدنيوم وكروم ونيكل	43BVXX	Ni Ni 1.82; Cr 0.50, Mo 0.12, 0.25; V0.03min
	47XX	Ni 1.05;Cr0.45;Mo0.20, 0.35
	81XX	Ni 0.30; Cr0.40; Mo0.12
	86XX	Ni 0.55; Cr0.50; Mo0.20
	87XX	Ni 0.55; Cr0.50; Mo0.25
	88XX	Ni 0.55; Cr0.50; Mo0.35
	93XX	Ni 3.25; Cr1.20; Mo0.12
	94XX	Ni 0.45; Cr0.40; Mo0.12
	97XX	Ni 1.00; Cr0.20; Mo0.20
	98XX	Ni 1.00; Cr0.80; Mo0.25
فولاذ الموليبدنيوم والنيكل	46XX	Ni 0.85; Cr1.82; Mo0.20,0.25

	48XX	Ni 3.50 ;Mo 0.25
فولاذ الكروم	50XX	Cr 0.27, 0.40, 0.50, 0.65
	51XX	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00, 1.05
	50XX	Cr 0.50;C 1.00 min
	51XX	Cr 1.02; C 1.00 min
	52XX	Cr 1.45; C 1.00 min
فولاذ الفاناديوم والكروم	61XX	Cr 0.60, 0.80, 0.95; V 0.10, 0.15
فولاذ الكروم والتنغستين	72XX	W 1.75; Cr 0.75
فولاذ المنغنيز والسيليكون	92XX	Si 1.40, 2.00; Mn 0.65, 0.82, 0.85; Cr 0.00, 0.65

تحتوي الخلائط الفولاذية على قابلية التصلب وأيضا على تأثير قابلية اللحام. اذا كانت التقسية عظمى للفولاذ تكون قابلية اللحام ضعيفة. عادة يكون الفولاذ ذا حساسية عالية للتشقق. تم تطوير المعادلة المكافئة للكربون لتعبر عن قابلية اللحام:

$$CE = C+(Mn/6)+(Ni/15)+(Cu/15)+(Cr/5)+(Mo/5)+(V/5)$$

حيث يتم التعبير عن تركيز عنصر الخلط بالنسبة المئوية للوزن. التركيز العالي لعناصر الخلط هو قابلية التقسية العالية وقيم CE العالية. من بين كل العناصر فإن عنصر الكربون له التأثير الأعظم. الفولاذ مع قيم منخفضة من CE عادة يكون له قابلية جيدة للحام.

إن سماكة المقطع تؤثر على معدل التبريد، وبالتأكيد على قابلية اللحام وإن معدل التبريد السريع يساعد على تشكيل المارتنسيت. المكافئ الكربوني المعادل (CCE) بالنسبة إلى الثخانة هي كما يلي:

$$CCE = CE + 0.0025t$$

حيث t هي الثخانة بالميليمتر. الجدول (3-8) يبين عوائل الفولاذ المتعددة، و الـ CE، وقابلية اللحام النسبية. ثخانة الجزء لم تؤخذ في الحسابات وقيم المتانة هي قيم وسطية من الفولاذ المنتقى في كل مجموعة.

جدول (3-8): قابلية اللحام للعديد من عائلات الفولاذ.

نوع الفولاذ	مستوى المتانة (ksi)	المكافئ الكربوني (%)	قابلية اللحام
C-Mn	47-71	0.2-0.4	جيد
C-Mn+Cr+Ni+V	84-87	0.50	مقبول الى جيد
C-Mn+Cr+Ni+Mo+Si	87-109	0.60	مقبول مع تسخين مسبق
C-Mn+Cr+Mo	114-126	0.70	فقير (ضعيف)

3-2: خلائط الحديد الصب (حديد الزهر أو الفونت):

يعتبر حديد الزهر أحد الخلائط المعدنية الحديدية رخيصة الثمن، سهلة التشغيل على الماكينات وذات السيولة العالية التي تجعله يستخدم على نطاق واسع في عمل المسبوكات ذات الأشكال المعقدة كأجسام الآلات وقواعد وفرش الماكينات وصنع أنابيب الغاز وأجسام المضخات وأغلفة التوربينات وبعض الأغراض المنزلية وغيرها....

يستعمل فرن الدست (Cupola) في إنتاج حديد الزهر المستعمل في السباكة حيث يستخدم كمادة أولية خامات الحديد Pig Iron ويبطن فرن الدست من الداخل بالآجر الحراري الحامضي (سيليكا والألومينا). ويستخدم فحم الكوك وتتراوح كميته من 50 إلى 125 كغ لكل طن من الحديد، كما يضاف الحجر الجيري في فرن الدست ليتحد مع المواد الرملية الموجودة بسطح خامات الحديد ومع الرماد الناتج من احتراق فحم الكوك ويكون الخبث الذي يطفو فوق الحديد المنصهر ويتم تفريغه بصورة منعزلة. وكمية الحجر الجيري اللازمة تتراوح بين 3 وحتى 5 كغ لكل طن من الحديد.

أما عمليات صناعة سبائك الحديد الزهر فيمكن أن تتم باستخدام أفران الحث الكهربائي التي تعّد إحدى سمات التطور التكنولوجي في صناعة المسبوكات في العالم وهذه الدراسة تهدف إلى تحسين مستوى الأداء – حيث تم بناء ما تحتويه هذه الدراسة من معلومات على الأسس المكتسبة من الخبرة العملية في مجال صهر الخلائط المعدنية في أفران الحث كما يتضمن أيضا

التوصيات العامة اللازمة لتحسين طرق العمل ورفع جودة المعدن كما لم تغفل هذه الدراسة النظريات والأسس العملية المتعلقة بهذا الخصوص.

3-2-1: العناصر المكونة للحديد الزهر السبائكي وتأثير كل منها على خواصه:

تملك العناصر السبائكية تأثيرات ميكروبنائية على حديد الصب، هي في معظم الحالات مماثلة لتلك التأثيرات التي تملكها هذه العناصر على بناء الفولاذ لذلك يمكن استخدام العناصر السبائكية من أجل تحسين الخواص الميكانيكية.

ومن أجل تنعيم الحبيبات لزيادة القساوة عن طريق زيادة استقرار السمنتيت وتشكيل كربيدات أخرى أقسى وزيادة استقرار البناء المارتنسيتي والأستينيتي عند الحاجة وذلك في درجات حرارة الغرفة. أيضا زيادة المقاومة للتأكل الجوي والتحطم عند درجات الحرارة العالية.

إذا إضافة لعنصر الحديد Fe والذي يعتبر المكون الأساسي للأنواع المختلفة من حديد الزهر فهناك العديد من العناصر السبائكية التي تدخل في تركيب حديد الزهر وتؤثر بشكل فعلي على خصائصه الميكانيكية وعلى استخداماته الصناعية والتي يمكن إيجازها كالتالي:

1. العناصر الصلبة:

- الكربون: **Carbon (C)**: يعتبر الكربون من أهم العناصر السبائكية للحديد الزهر، وتؤثر نسبة الكربون على الخواص الطبيعية له كما تؤثر على اختيار العمليات التكنولوجية المتبعة في السباكة. يظهر الكربون على صورتين مختلفتين في الحديد الزهر . كربون حر (يسمى غرافيت) وكربون متحد (يسمى كربيد). تؤثر نسبة الكربون لكلا الصورتين وكذا نوع التحويل لصور الكربون على خواص الحديد الزهر. الكربون الحر (الغرافيت) لين نوعا ما ويتكون على شكل رقائق في الزهر الرمادي وعلى شكل كريات صغيرة في الزهر المرن. أما الكربون فباتحاده مع الحديد يعطي مركبا عاليا في صلادته يسمى كربيد الحديد ويظهر إما على صورة سمنتيت حر (Cementite) أو على شكل طبقات (Layers) داخل الحديد النقي المعروف باسم فريت ويسمى في هذه الحالة برليت. ويعتبر سمك طبقة السمنتيت والمسافة بين الطبقات في التكوين البيرليتي هما العاملان المؤثران على درجة صلادة الحديد الزهر، ويتأثر هذان العاملان بالعناصر السبائكية الأخرى التي تضاف للحديد الزهر وكذلك بمعدل

التجمد، فمثلا ارتفاع معدل التجمد يعمل على تقليل المسافة بين طبقات السمنتيت والفريت ويؤدي ذلك إلى تكوين بنية صلدة.

- **السيلكون: Silicon (Si)**: يقع السيليكون في المرتبة الثانية من حيث الأهمية بعد الكربون حيث يحل محله (إلى حد ما) كما يساعد على تبلوره على شكل رقائق غرافيتية.
تتوقف كمية السيليكون في الحديد الزهر على سمك المسبك المسبوك والخواص المطلوبة للمعدن حيث تزداد في المسبوكات الرفيعة لمنع تكون الزهر الأبيض الذي يحتوي على السمنتيت.
- **المنغنيز: Maganese (Mn)**: يوجد المنغنيز بصفة دائمة في الحديد الزهر حيث يكون الغرض الرئيسي لوجوده هو الاتحاد مع الكبريت ليعطي كبرتيدات المنغنيز، وعلى ذلك فهو يمنع التأثير الضار لعنصر الكبريت على خواص المسبوك لذلك يجب أن لاتقل نسبة المنجنيز في الزهر عن القيمة الناتجة من القاعدة الآتية:

$$\text{النسبة المطلوبة للمنجنيز} = 1.7 \times (\%\ \text{للكبريت}) + 0.3\ \%$$

وذلك لضمان السيطرة على كمية الكبريت بالكامل. تعمل زيادة نسبة المنجنيز في الزهر على استقرار البرليت مع زيادة قابلية الزهر للتبريد الفجائي (التصقيع) Chilling. يشجع ارتفاع نسبة المنجنيز والكبريت في الزهر بنسبة كبيرة على تكوين الفجوات الغازية (Blow holes) في الحديد الزهر.
- **الفوسفور: Phosphorus (P)**: يعمل الفوسفور على رفع صلادة الحديد الزهر بمقدار 4 برينل لكل 0.1 % فوسفور دون زيادة في مقاومة الشد. يظهر الفوسفور في الحديد الزهر على شكل فوسفيدات الحديد (iron phosphides) أو متحداً مع السمنتيت والأوستنيت ($Fe_3P + Fe_3C + Fe$) مكوناً الأستيدايت (Steadite).
درجة تجمد الستيدات (950 درجة مئوية تقريبا) أي أقل من درجة تجمد الحديد الزهر نفسه وهذا يعني أن الأستيدايت مازال سائلا بعد التجمد الكامل للحديد الزهر، وعليه فعندما يبدأ الاستيدايت في التجمد يقل حجمه وهذا عادة يؤدي إلى حدوث مسامية دقيقة (Micro – porosity) في مقاطع المسبوك وعلى ذلك لا يجتاز المسبوك اختبار الضغط المطلوب.

-الكبريت: (S) **Sulfur**: الكبريت له تأثيرا ضارا على خواص الحديد الزهر الذي يتحد في وجود المنجنيز مع الكبريت ويكون كبرتيدات المنجنيز (MnS). ارتفاع نسبة الكبريت تجعل الحديد الزهر يميل إلى التجمد في صورة الحديد الزهر الأبيض بينما ترتفع لزوجة الحديد الزهر المنصهر وتزداد نسبة الجلخ وعلى ذلك يزداد احتمال حدوث الفجوات الغازية (blow holes).

-الكروم: **Chromium (Cr)**: يعتبر الكروم عنصر سبائكي يضاف للحديد الزهر بنسبة تصل إلى 1%. وعموما يمكن أن يقال أن كل 0.2 % كروم تعمل على رفع مقاومة الشد للحديد الزهر بحوالي 35 نيوتن / مم^2 مع رفع الصلادة بحوالي 15 نقطة برنل. عندما تتعدى نسبة الكروم 0.5 % تزيد الصلادة نتيجة لتكون الكربيدات (Carbides) لكن بدون زيادة في مقاومة الشد.

يجب أن يستخدم الكروم باحتراس حيث أن قابلية الحديد الزهر للتجمد الفجائي (Chilling) تزداد بشدة بارتفاع نسبة الكروم. بجانب التأثير الكبير للكروم على الخواص الميكانيكية فإن الكروم له تأثير مفيد على نمو خلايا الحديد الزهر عند درجات الحرارة المرتفعة كما يعمل على منع تكون الصدأ. للكروم أيضا تأثيرا مفيدا في مقاومة التآكل بفعل المؤثرات الجوية (Atmospheric Corrosion) كما يعمل على تحسين مقاومة الحديد الزهر للتآكل بالاحتكاك (Wear resistance) حيث أن الكربيدات التي تتكون نتيجة لوجود الكروم ذات صلادة عالية مما يقلل من قابلية الزهر للتشغيل.

- النيكل: **Nickel (Ni)**: يضاف النيكل على الحديد الزهر كعنصر سبائكي (عادة حتى 2%) ويكون له تأثيرا معتدلا على تكوين الغرافيت حيث أن 1% نيكل تعادل 0.3 % سيليكون في حيث 2% نيكل تعمل على رفع الصلادة بحوالي 15 نقطة برينل. يكون لزيادة النيكل تأثير إيجابي على تكوين بنية متجانسة في المسبوكات ذات التغير الكبير في السمك، كما يعمل النيكل على زيادة مقاومة الحديد الزهر للتآكل بفعل المؤثرات الجوية. يستخدم النيكل عادة بمصاحبة عناصر سبائكية أخرى مثل الكروم (عادة بنسبة 2.5 : 1) أو الموليدنم والنحاس أو الكروم، والموليبدنم لإعطاء مقاومة شد عالية وتحسين مقاومة الزهر للتآكل بالاحتكاك.

يعمل النيكل على تحسين قابلية الزهر لعمليات التشغيل (Machinability) بالرغم من ارتفاع صلادة المسبوك -- علما بأن النيكل لايعمل على تكوين كربيدات ولكنه يعمل على تجانس البنية الميتالورجية مع تقليل المسافة بين طبقات السمنتيت في البنية البرليتية. تقل

درجة تجمد السبيكة الزهر والنيكل بمقدار 5°م لكل 1% من النيكل. يعمل النيكل مع النحاس على تحسين صلادة المسبوك.

- **الموليبدنم: Molybdenum (Mo)**: الموليبدنم كعنصر سبائكي له أهمية كبيرة حيث يعمل على رفع مقاومة الشد للحديد الزهر بدرجة محسوسة. إضافة 1% موليبدنم إلى الحديد الزهر يعمل على رفع مقاومة الشد بحوالي (3.5 – 4 %). ترتفع الصلادة بحوالي 40 نقطة برنل لكل 1% موليبدنم علماً بأن قابلية الزهر للتشغيل لا تتأثر بارتفاع الصلادة. يمكن إنتاج الحديد الزهر ذي المقاومة العالية للشد والمقاومة الجيدة للتآكل بالاحتكاك بإضافة 1% موليبدنم، 2% نيكل. يضاف الموليبدنم عادة بمصاحبة الكروم والنحاس والنيكل. الفوسفور له تأثير ضار على خواص الحديد الزهر عند إضافته مع الموليبدنم. يعمل الموليبدنم على تحسين الصلادة للحديد الزهر.
- **النحاس: Copper (Cu)**: النحاس له تأثيرٌ مفيدٌ على تكوين بنية متجانسة في المسبوكات ذات الاختلاف الكبير في السمك.

3% كحد أقصى من النحاس يمكن أن تذاب في الحديد الزهر حيث تعطي تأثيرا مشابها لتأثير النيكل لتحسين الخواص الميكانيكية. يعمل النحاس على تحسين مقاومة الحديد الزهر للتآكل بفعل العوامل الجوية مع تحسين قابليتة للتشغيل. يستخدم النحاس كعنصر مثبت للبنية البرليت في الزهر المرن.

- **الفاناديوم: Vanadium (V)**: يعّد الفاناديوم من أقوى العناصر المثبتة للكربيدات ويستخدم لرفع مقاومة الشد والصلادة للحديد الزهر. يعمل الفاناديوم على تحسين مقاومة الزهر الرمادي للتآكل بفعل المؤثرات الجوية وكذا تحسين مقاومة الزهر للحرارة ومقاومة التآكل بالإحتكاك. بإضافة 0.1 فاناديوم ترتفع مقاومة الشد بحوالي 20 نيوتن / مم^2 وترتفع الصلادة بحوالي 8 نقطة برينل. يعمل الفاناديوم على تهذيب رقائق الغرافيت واندماج البرليت.
- **التيتانيوم: Titanium (Ti)**: عنصر مختزل مفيد لكن لابد أن يستخدم بعناية تامة في حالة وجود الألمنيوم في الزهر حيث إنه يمكن أن يتسبب في حدوث الثقوب الإبرية في المسبوكات. يعمل التيتانيوم على زيادة سمك الرقائق الجرافيتية وله تأثير إيجابي على تكوين السمنتيت. يعمل التيتانيوم على تحسين قابلية الزهر للتشغيل.

في حالة احتواء الزهر على نسبة نيتروجين أعلى من 100 جزء / المليون يضاف (0.02– 0.03 %) تيتانيوم لمنع حدوث الفجوات الغازية النتروجينية للمسبوكات.

- **الألمنيوم: Aluminium (Al)**: يضاف الألمنيوم عادة إلى الحديد الزهر المتصهر بكميات صغيرة (0.02 %) كعنصر مختزل إلى جانب أن له تأثير عنصر السيلكون نفسه على الزهر. زيادة نسبة الألمنيوم في التقوب الأبرية للمسبوكات يساعد على تكوين الهيدروجين من الرطوبة الموجودة بمواد تشكيل القوالب.
- **الأنتيمون: Antimony (Sb)**: إذا وجدت كمية قليلة جداً من عنصر الأنتيمون بالحديد الزهر فإنها تسبب مشاكل وأضرارا كبيرة تتغير بشكل رقائق الجرافيت لصورة رديئة ويصبح الحديد الزهر هشاً جداً وتقل مقاومة الشد له.
- **الزرنيخ: Arsenic (As)**: الكميات الصغيرة لعنصر الزرنيخ لها تأثير بسيط على خواص الحديد الزهر الرمادي، ويعد الزرنيخ عنصرا مثبتا للبنية البرليتية في الزهر المرن.
- **الرصاص: Lead (Pb)**: يعد الرصاص من العناصر الغير مرغوب فيها مثل الأنتيمون والبزموث فإن كمية قليلة جداً من الرصاص تعمل على انخفاض مقاومة الشد للحديد الزهر بصورة ضارة.
- **البورون: Boron (b)**: يعمل البورون على حدوث التصلد الفجائي القوي (التصفيح القوي) Strong Chilling أثناء تجمد الحديد الزهر، ويستخدم البورون أحيانا في إنتاج الزهر الطروق لتأثيره على عملية التجمد المعالجة الحرارية.
- **الكوبلت والتنغستين: Cobalt (Co) & Tungsten (W)**: يمكن أن يوجد هذان العنصران في الحديد الزهر علما بأن لهما تأثيرا ضعيفا على خواصه بصفة عامة.
- **المغنسيوم: Magnesium (Mg)**: يعمل المغنسيوم على تبلور الجرافيت على شكل كروي أثناء التجمد، هذا بشرط انخفاض نسبة الكبريت في الزهر، لذا يستخدم المغنسيوم في إنتاج الزهر المرن (Nodular iron). علماً بأن إرتفاع نسبة المغنسيوم في الحديد الزهر قد تؤدي إلى تكون الكربيدات في البنية الميتالورجية.
- **الزركون: Zirconium (Zr)**: يكون لإضافة كمية صغيرة من الزركون تأثير مختزل على المعدن المتصهر، وتعمل على منع تكوين الفجوات الغازية الناتجة عن أول أكسيد الكربون (Co)

- التلليورم: **Tellurium (Te)**: يعد التلليورم مثبتاً قوياً للكربيدات وأن كمية بسيطة منه تعمل على حدوث التجمد في صورة الزهر الأبيض، وهذا النوع من الزهر مرتفع الصلادة جيدا وغير قابل لعمليات التشغيل بعدد القطع العادية.
- القصدير: **Tin (Sn)**: يكون لإضافة كمية صغيرة من القصدير تأثير قوي على تكون البرليت بدون سمنتيت وعلى ذلك تتحسن الخواص الميكانيكية للزهر بإضافة 0.1 % من القصدير على المعدن المنصهر.
- البزموث: **Bismuth (Bi)**: البزموث والأنتيمون والرصاص من العناصر ذات التأثير الضار جدا على الخواص الميكانيكية للزهر لأنها تعمل على تكون نوع الغرافيت المعروف باسم ويدمان ستاتين (Widman statten graphite). يشبه البزموث التيتانيوم والرصاص والأنتيمون، وهي عناصر غير مستحب وجودها في إنتاج الزهر المرن، وتستخدم كمية صغيرة من البزموث عادة في إنتاج الزهر المطروق.

2. العناصر الغازية التي تذوب في المعدن:

- الأكسجين: **Oxygen (O_2)**: يذوب الأكسجين عادة في الحديد المنصهر ويمكن إيضاح تأثير درجة حرارة المعدن على احتواء حديد الزهر للأكسجين طبقا لما يلي:
  - حتى درجة التحول اليوتكتيكي يعمل السيلكون في هذا المدى من درجات الحرارة كعنصر مختزل فإن ذرة السيلكون تتحد مع ذرتين من الأكسجين ($Si + 2O \rightarrow SiO_2$) مكوناً من مادة السيلكا التي تظهر في الملح.
  - بين درجة حرارة التحول اليوتكتيكي ودرجة حرارة السيولة: في هذا المدى من درجات الحرارة يذوب الأكسجين في الحديد الزهر
  - أعلى من درجة حرارة السيولة: في هذا المجال من درجات الحرارة يعمل الكربون الموجود في الحديد الزهر المنصهر كعنصر مختزل أي أن ذرة من الكربون تتحد مع ذرتين من الأكسجين ($C + 2O \rightarrow CO_2$)، ويتصاعد غاز ثاني أكسيد الكربون على شكل فقاعات. يمكن أن تتم عملية الاختزال أيضا للحديد المنصهر بفعل إحدى العناصر (المنجنيز، الألمنيوم، التيتانيوم، الكالسيوم، المغنسيوم... الخ) هذه العناصر توجد بكميات صغيرة في الحديد، كما يمكن أيضا إضافتها مع مواد التطعيم (Incoilant material).

- **الهيدروجين: Hydrogen (H_2)**: يمكن للهيدروجين أن يذوب في الحديد المنصهر بمقدار لا يتعدى 5 جزء / المليون وبمقدار لا يتعدى 0.5 جزء / المليون في الحديد المتجمد والكمية التي تزيد عن هذه الحدود تظهر على شكل غاز الهيدروجين H_2. فإذا زادت نسبة ذوبان الهيدروجين في الحديد المنصهر عن 0.5 جزء / المليون فإنها تنفصل منه أثناء التجمد على شكل ثقوب إبرية هيدروجينية.

مصادر وجود الهيدروجين في الحديد هي:

- o البطانة الحرارية الرطبة لمعالق الصب.
- o مواد التشكيل الرطبة بجانب مجاري ونظام الصب الخاطئي.
- o عدم تجفيف مواد الدهان التجفيف الكامل.
- o تعمل إضافة كمية صغيرة من الألمنيوم (0.005 – 0.02 %) على انخفاض نسبة ذوبان الهيدروجين في الحديد المنصهر وتساعد على ظهور الثقوب الإبرية الهيدروجينية بالمسبوك.
- o يعمل الهيدروجين على تجمد الحديد الزهر في صورة الزهر الأبيض (أي يزيد من قابلية الزهر للتصنيع)

- **النتروجين: Nitrogen (N_2)**: يذوب النتروجين في الحديد الزهر حتى نسبة 0.04 % كما أن نسبة إذابته تقل بدرجة كبيرة أثناء فترة التجمد للمعدن المنصهر. إذا زادت نسبة النتروجين عن 0.01% يمكن أن تحدث المسامية النتروجينية في المسبوكات. يؤثر النتروجين على شكل بلورة عنصر الكربون من ناحية ندماج رقائق الغرافيت وتكون البنية البرليتية، وتعمل إضافة كمية صغيرة من النتروجين من 20 – 50 جزء / المليون على تكون رقائق غرافيتية طويلة وبالتالي تقل مقاومة الحديد الزهر للشد عما هو متوقع من مقدار المكافئ الكربوني له. إذا زادت نسبة النتروجين عن 100 جزء من المليون تحدث الفجوات الغازية في الحديد الزهر ذي المكافئ الكربوني المنخفض. يوجد النتروجين في الحديد الزهر من عدة مصادر منها: الخردة الصلب – مواد الكربنة .. مواد ربط الرمال.

3-2-2: وصف حديد الصب وأنواعه:

إن الدراسة التصنيفية لحديد الزهر لا تختلف من حيث المبدأ عن دراسة الفولاذ فهو يعرف عائلة كبيرة من الخلائط المعدنية البولتكنيكية التجمد والمتعددة العناصر السبائكية، فمعظم خلائط الزهر

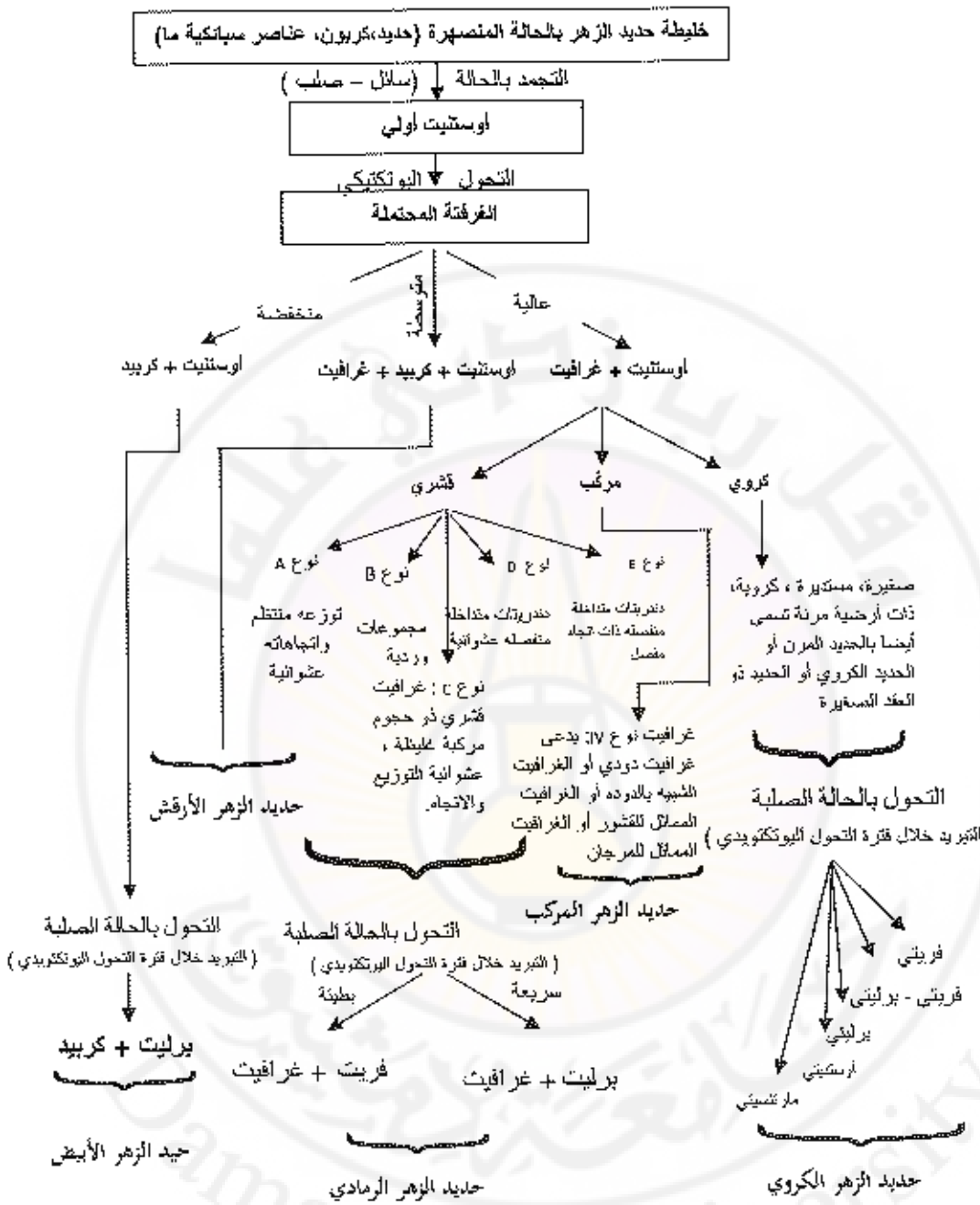
تحتوي على عناصر رئيسية (الحديد، الكربون، السيليكون) وعناصر ثانوية (فوسفور، منغنيز، كبريت) نسبتها أقل من 0.1 % وعلى عناصر أخرى ضئيلة التوفر في الحديد الزهر مثل الألمنيوم والنيكل والتيتانيوم والكروم... نسبتها مجتمعة أكبر من 0.1% والتي لها تأثير بالغ الأهمية على شكل بنية حديد الزهر وعلى خواصه الميكانيكية. إن حديد الزهر يميز عن الفولاذ باحتوائه على نسبة أعلى من الكربون والسيليكون، وبالتالي فإن البنية التركيبية للحديد الزهر تمتاز باحتوائها على طور غني بالكربون، يمكن أن يتبلور بشكل غير مستقر Fe – Fe_3C حيث يتحول عنده الطور الكربوني الغني إلى طور كربيدي أو بشكل مستقر Fe – Gr حيث يتم عنده الانفصال الحر للغرافيت خلال مرحلة التحول البوتكتيكي والذي يتبع بدوره لعوامل عدة هي: المزج الكيميائي ومعدلات التبريد والعمليات التطعيمية التي تتم بالحالة المنصهرة، هذه العوامل الثلاثة الأخيرة تقوم بدور أساسي في نسبة وجود الأنوية المحتملة بالسائل وبالتالي تضفي على الحديد الزهر الشكل النهائي للبنية من حيث شكل الغرافيت وتوزيعه بالبنية، توزيع الكربيد الحر بالبنية والأرضية المطلوبة من حديد الزهر (فريتية – برليتيه...). شكل (3-15) يبين تخطيطيا تأثير زيادة نسبة الغرفته المحتملة على الشكل النهائي للبنية.

إن التجمد بأحد الشكلين السابقين (مستقر أو حرج) سوف يؤدي إلى مجال واسع من الخواص الميكانيكية، مثل قوى الشد، القساوة، المتانة والمطيلية. لذلك فإن عملية تفرس بنية الحديد الزهر يمكن تناولها من خلال النوع أو الكمية أو البنية البوتكتيكية وذلك لاستقراء الخواص الميكانيكية المحتملة.

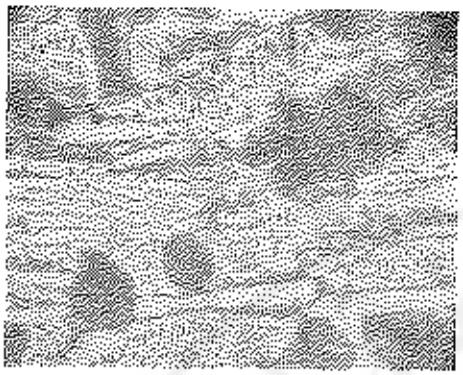
1. **تصنيف حديد الزهر وفقا للتصنيفات الميتالورجية الأساسية:**

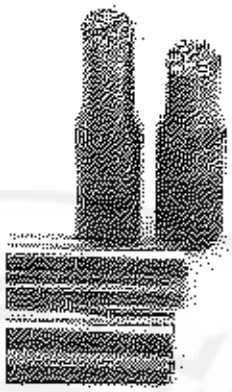
❖ تاريخياً إن أول تصنيف عمل لحديد الزهر كان بناء على مكسره فوجد أن هناك نوعين من الحديد:

- حديد أبيض White Iron: حيث يتميز ببنيته البلورية البيضاء ويلاحظ بأن الكسر يأخذ حركته على طول الصفائح الكربيدية الناتجة عن عملية التجمد غير المستقرة. هذا النوع عالي القساوة ومقاوم للتآكل إلى حد كبير. شكل (3-16).
- حديد رمادي Grey Iron: حيث يتميز ببنيته البلورية الرمادية ويلاحظ من خلال الكسر أن حركة الكسر قد تمت على طول الصفائح الغرافيتية (القشور) الناتجة عن عملية التجمد المستقرة. هذا النوع له خواص متميزة لخمد أو مضاءلة الاهتزازات أكثر من أي فلز آخر وهو غير حساس للشروخ.



الشكل (3-15): تركيب البنية المكروية الأساسية وتسلسل الحصول على حديد الزهر الشائع اقتصاديا





الشكل (3-16): حديد زهر أبيض يتصف بمكسره الأبيض لأنه لا يحتوي على أي غرافيت حر.

- بعدها تم تقسيم أنواع الحديد الزهر تقسيما يتبع أنواع الأفران المنتجة لها مثل حديد فرن الدست وحديد الأفران الكهربائية والحديد المزدوج (Duplex)، وهو حديد ينتج في أحد الأفران ويعاد تنقيته أو خلطه في أفران أخرى.
- ومن ناحية أخرى تم تقسيم أنواع الحديد الزهر حسب تركيبها ودرجة نقاوتها مثل حديد الزهر النقي في الكربون والسيليكون أو حديد الزهر الغني بالكربون والفقير في الكبريت أو حديد الزهر النيكلي (المحتوي على نيكل) وهكذا...
- وحتى لا يحدث تضارب في التسمية اتفق على توحيد تسمية أنواع حديد الزهر حسب تركيبها الفلزي (الميتالورجي) وخواصها المبنية على التركيبة الميكروية المحتملة:

1- **شكل الغرافيت وحجمه:** فالخواص الميكانيكية والفيزيائية لحديد الزهر الرمادي صنفت وفقا لشكل وحجم وتوزع الغرافيت الممكن توافره بالبنية. شكل (3-17) إلى:

- صفائح (قشور) غرافيتية Lamellar (Flakes) Graphite: هذا النمط يوجد في حديد الزهر الرمادي وتأخذ القشور الغرافيتية المنفصلة أشكالا وتوزيعات مختلفة تؤثر على الخواص النهائية للحديد الزهر الرمادي. وقد اتفق على تصنيف هذا الشكل وفقا للنظام الأمريكي للتوزيع إلى خمسة أنواع رئيسية وذلك وفقا لأشكال التوزع الغرافيتي بالبنية فقد أخذت التسمية A إلى E شكل (3-18).

يتميز النوع A من الغرافيت بانتظام توزع قشوره وتباين اتجاهها بالبنية وهذا النوع يغلب الحصول عليه في مسبوكات القوالب الرملية وهو النوع الأكثر تفضيلا في الأنواع الخمسة للغرافيت نظراً لاستخداماته الميكانيكية المتعددة. والقشور الغرافيتية من هذا النوع يوجد أصلا حول وبين البلورات الأوستنيتية الأولية على أرضية بوتكتيكية، وهذه القشور تبدو رقيقة ومنحنية أو ملتوية حسب ظروف وجودها حول بلورات الأوستنيت، وهي في العادة تتناسب كذلك في حجمها وتخانتها مع حجم بلورات الأوستنيت، وتتفسخ بدورها وفقا لمعدلات التبريد إلى عدة أنواع وذلك بحسب طول القشور الغرافيتيه وحجمها وتخانتها كما في الشكل (3-19). فالقشور الغرافيتية الطويلة تميز الحديد المحتوي على نسبة أعلى من الكربون المكافئ ومعدلات تبريد أقل أثناء عملية التجمد وهي غالبا ما تستعمل في الأماكن التي تتطلب ناقلية حرارية وقابلية التخميد عاليين. بينما القشور الغرافيتية القصيرة توصف في الاستخدامات التي تتطلب خواص شد عالية وإنهاء جيداً للسطوح المشغلة ميكانيكيا، وغالبا ما توجد في الحديد الهيبويوتكتيكي الذي يتجمد بشكل فجائي.. ولحسن الحظ فإن القشور الغرافيتية لا تحيط بالبلورات الأوستنيتية إحاطة تامة أو بمعنى آخر فهذه القشور لا توجد في صورة شبكة متصلة حول بلورات الأوستنيت بل تبقى هذه (بلورات الأوستنيت) في تشابك تام مع زميلاتها دون اعتراض من قشور الغرافيت المتقطعة.

أما الغرافيت من النوع B فهو يتشكل في أنواع الحديد القريبة في مزجها من التحول اليوتكتيكي، وتجمد هذا النوع من الغرافيت يتم عند درجات حرارة الانتقال بين حديد الزهر الرمادي وحديد الزهر الأبيض، وهي منطقة الحديد الأرقش، وهو يشبه الأعشاش من حيث شكله الميكروسكوبي ويدعى بال Rosette (شكل الوردة) ويحتوي على قشور غرافيته رفيعة نسبياً. يبدأ ترسب هذا النوع من الغرافيت عند بدء عملية التجمد اليوتكتيكي، ويتصف بوجود مساحة من القشور الغرافيتية في شكل يوتكتيكي بمركز الشكل الوردي بسبب ارتفاع معدل التبريد إلى المعدل الذي لا يكفي للانفصال الجرافيتي التام، ثم يتفرع أو يشع من هذه المساحة في المركز قشور في اتجاهات قطرية منفصلة من الستنيت الموجود في حديد الزهر الأبيض المحيط بها. ويبدو المقطع في النهاية بالعين المجردة عند الكسر في صورة بقع رمادية على أرضية بيضاء (حديد زهر أبيض) ولهذا سمي بحديد الزهر الأرقش.

إن الغرافيت ذا النوع C يوجد على الأغلب في الحديد الهيبريوتكتيكي حيث توجد نسبة عالية من الكربون. إن هذا النوع من الغرافيت يتكون أثناء عملية التجمد الأولي للحديد

وكثيراً ما يطلق عليه تسمية Kish graphite وهو عبارة قشور غرافيتية مستقيمة وكبيرة بمصاحبة عدد كبير من القشور الدقيقة الموزعة دون وجود أنواع متوسطة. وتشابه القشور الدقيقة من النوع A. غالبا ما يعمل هذا النوع من الغرافيت على تخفيف الخواص الميكانيكية للحديد ويؤدي إلى سطوح إنهاء خشنة أثناء تشغيلها ميكانيكيا. إن النوع C من الغرافيت يطلب في الاستخدامات الهندسية التي تحتاج إلى درجة عالية من عمليات الانتقال الحراري.

الغرافيت نوع D و E هي أنواع غير مرغوب فيها ويجب تجنب وجودها في الحديد الزهر. كلا هذين النوعين يأخذان شكل دندريتات متداخلة فهي توجد بين الأفرع في الشجيرات البلورية. حيث إنه من المعروف أن أول بلورات تتجمد من المنصهر هي البلورات الأوستنيتية في صورة شجرية (دندريتية) ويتم الانفصال الغرافيتي بين فروعها إما باتجاهات غير موجهة شكلD أو موحدة E، وكونها تكون موجهة (موحدة في اتجاهها) أو غير موجهة فإن ذلك يرجع لوجود التوجيه (أو الانحدار) الحراري في التبريد بدرجة تسمح بهذا التوجيه.

كما أن الغرافيت من النوع D يحدث نتيجة عمليات التبريد السريعة وبوجود كمية من السيليكون قادرة على منع تكون الكربيدات. المساحات الحرة التي تتشكل في بنيته ناتجة عن تكون الدندريتات الأوستنيتية قبل بدء عملية التحول اليوتكتيكي، وهذا النوع يتكون غالبا بالمجال الهيبويوتكتيكي واليوتكتيكي. وما تحت التبريد التي تحدث أثناء تكون هذا النوع تؤدي إلى انحراف واضح في المخطط التوازني للحديد – كربون ... سيليكون. هذا النوع من الغرافيت يستخدم في القوالب الدائمة (المعدنية) لحديد الزهر الرمادي، ويتصف بخواص شد أعلى من الحديد ذي الغرافيت A الذي له القساوة نفسها. من الصعب الحصول على أرضية كلها برليتية في حديد الزهر ذي الغرافيت D، وذلك بسبب قرب الصفائح الغرافيتية البالغة القصر من بعضها البعض.

أما الغرافيت من النوع E فيحدث في الحديد الهيبويوتكتيكي وهو يتكون ما بين الدندريتات الأوستنيتية، ويتميز عن النوع D بكونه يأخذ اتجاهات موجهة.

- الغرافيت الكروي Spheroidal (Nodular) graphite, SG: عرف فقط منذ عام 1946 من قبل الباحثين Morrogh, Williams ولكنه لم يلق رواجا حتى 1948هذا الغرافيت يأخذ شكلا ليس بالضروري كرويا بالكامل وإنما قريب من الكروي شكل (3-

20). يدعى حديد الزهر ذو الغرافيت الكروي بحديد الزهر المرن Ductile (Nodular, Spheroidal, S.G) Cast Iron وهو يختلف عن القشري حيث إنه يحتوي الغرافيت بشكل جزيئات صغيرة – مستديرة – كروية، لذلك فهو يمتلك مقاومة شد أعلى مقارنة بالقشري إضافة إلى درجة كبيرة من المطيلية. كلا هذين العاملين يمكن أيضا تحسينهم بالمعالجة الحرارية. إذا تكمن الأهمية الصناعية لهذا النوع من الحديد بوصفه مادة هندسية تجمع بين خواص حديد الزهر الرمادي (نقطة الانصهار المنخفضة، إمكانية السباكة الجيدة، إمكانية التشغيل الجيدة، المقدرة على كبت الاهتزازات، المقاومة الجيدة للتآكل) وبعض خصائص الصلب (المقاومة العالية للإجهادات، المتانة العالية، المطيلية، إمكانية التشكيل على الساخن وإمكانية التقسية). الغرفنة بهذا الشكل غالبا تتم بالعمليات التطعيمية بإضافة المغنزيوم لوحده بنسبة 0.03 – 0.05 % أو بإضافة Ti+Mg أو Ce+Ca أو بإضافة عناصر نادرة أخرى (سيريوم، لانثانيوم، ...). زيادة معدلات التبريد يحتاج إلى تخفيف نسبة المغنزيوم عن النسبة المحددة. كما أن نسبة الكبريت بالزهر يقوم بدور أساسي في هذه النسبة. بصورة عامة الإضافات المثالية التي تعمل على الغرفنة بالشكل الكروي يمكن تمثيلها بالجدول (3–9) التالي:

جدول (3-9): الإضافات المثالية للعناصر والتي تعمل على الغرفنة بالشكل الكروي.

العنصر	المزج الكيميائي %
المنيوم	0.1
زرنيخ	0.02
بزموث	0.002
كادميوم	0.01
رصاص	0.002
انتيمون	0.002
السلنيوم	0.03
تيلوريوم	0.02
تيتانيوم	0.1
زركونيوم	0.1

– الغرافيت المعالج Temper graphite: إن الحديد المحتوي على هذا النوع من الغرافيت يدعى Malleable Irons (حديد زهر قابل للطرق). شكل (3–21) يحتوي

بصورة أولية على تركيبة حديد الزهر الأبيض (بنيته تتألف من أرضية برليتية وفيها الكربيدات) هذه البنية البيضاء تعالج حراريا بالتلدين (Annealing) وذلك برفع درجة حرارتها بين 800 – 970 درجة مئوية، وهذا يؤدي إلى تفكك الكربيد إلى أوستنايت وغرافيت. والبنية النهائية ستتكون من غرافيت + برليت أو برليت وفريت أو فريت فقط، وهذا كله تابع إلى معدلات التبريد بعد عملية التلدين. ففي أمريكا يتم إتمام عملية التلدين في أجواء يمكن التحكم بها حيث يتم وضع المسبوكات في صندوق مغلق من الحديد، أو يتم دفنها بالرمال مما يطيل زمن التلدين تحت درجة الحرارة المرتفعة بسبب هذا العزل الحراري فيترتب على ذلك اختزال كل الكربون الموجود على السطح، ولذلك يبدو المقطع بقلب قاتم نوعاً ما والحافة (السطح) بيضاء لامعة من الفريت الخالي من الغرافيت المنفصل، ولذلك يطلق على هذا النوع من حديد الزهر الذي يتم إنتاجه بهذه التقنية حديد الزهر الطروق (الطري) ذو القلب الأسود Black heart Malleable Iron. أما في أوروبا فإن حديد الزهر الطروق ذا القلب الأبيض White heart Malleable Irons ينتج بواسطة دفن المسبوكات الصغيرة في مسحوق أكسيد الحديد (كعامل مختزل للكربون الطري المنفصل عند درجة حرارة التلين) وبذلك تصبح بنية المسبوكات كلها فريتية بمقطع أبيض لامع أي لا يحتوي على كربون طري أو سمنتايت وبذلك لا تعود المسبوكات صفة حديد الزهر . وتقتصر هذه العملية على المسبوكات الرقيقة حتى لا تطول عملية التلين عند درجة حرارة التلدين. وهذه العملية تعتبر في حد ذاتها باهظة التكاليف لذلك تقتصر على المسبوكات التي يتطلب فيها جودة خاصة وتنتج عادة من أنواع الزهر النقية.

لتصنيع هذا النوع من الحديد الزهر يجب أن نختار الزهر الأبيض بحيث يعطي سرعة أثناء عملية التلدين. وانتشجيع عملية الانفصال الغرافيتي في جميع أنواع الحديد الطري يضاف إلى حديد الزهر نسبة من السيليكون تتراوح بين 0.6 - 1.3 % سيليكون (الزيادة فوق هذا الحد يعمل على إنقاص الخواص الميكانيكية للمعدن (مقاومة الشد والاستطالة النسبية)). وتستخدم إضافات النحاس والنيكل للسبب نفسه، ولو أن مفعولهما يعتبر أقل نسبيا من السيليكون، وتساعد هذه العناصر بالتالي على خفض زمن التلين (زمن المعالجة الحرارية) تحت درجة حرارة التلدين.

- الغرافيت المندمج Compacted graphite عرف فقط منذ عام 1965. يدعى الحديد الذي يحتوي على هذا النوع بحديد الزهر المندمج أو المركب أو الدودي Compacted (Vermicular) Cast Iron، شكل (3-22). لم يلق الكثير من الرواج كما في حديد الزهر المطيلي. شكله أكثر تعقيداً، تحت المجهر يشاهد بأنه يحوي حوالي 20% زهراً كروياً و 80 % دودياً ولا يحتوي على زهر قشري إطلاقا، يظهر كأنه ذو بعدين نسبة الطول إلى السماكة كنسبة 2 : 10 يوجد في الحديد الهيبو والهيبر يوتكتيكي عند نسبة كربون مكافئة تتراوح بين 3.7 – 4,7 %. كما أن نسبة الكربون المكافئ لهذا النوع تختار كتابعة إلى حجم المقطع فمن أجل السماكات التي تتراوح بين 10 – 40 مم يختار حديد ذو كربون مكافئ مساو 4.3 وذلك بغية الحصول على ميزات صب مثلى، نسبة المنغنيز تتراوح بين 0.1 – 0,6 % أما الفوسفور فنسبته يجب أن تكون أقل من 0.06% وذلك بقصد الحصول على خصائص مطيلية لهذا النوع من الحديد. إذا تطلب الحصول على أرضية محيطة بالغرافيت فريتية عندها تستخدم بعمليات إنتاج مثل هذا الحديد تماسيح حديدية فيها كمية كل من المغنيزيوم والكبريت والفوسفور منخفضة؛ بينما إذا تطلب وجود بعض البرليت بالأرضية عندها ينصح باستخدام خردة الفولاذ.

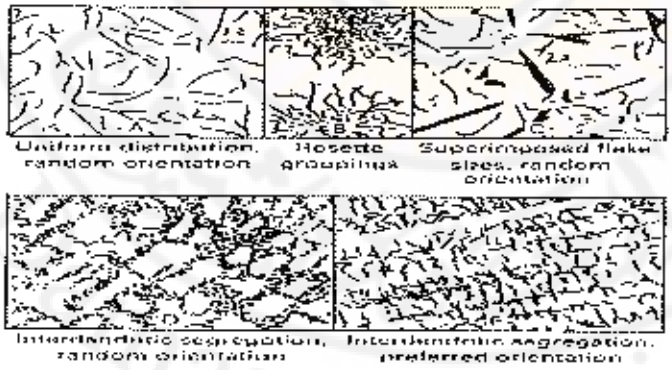
عمليات الصهر لإنتاج الأنواع المختلفة من الغرافيت تتم بالأفران التحريضيه أو الكوبلا أو أفران القوس الكهربائي أو بأفران أخرى موافقة لعمليات الصهر.

إن المزج الكيميائي لإنتاج الأنواع المختلفة من الحديد الزهر يمكن إيضاحها بالجدول(3-10) التالي:

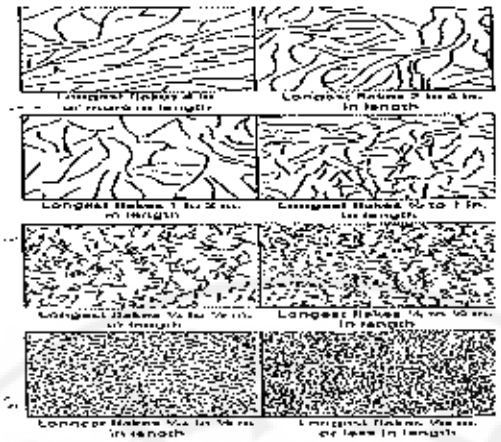
2- المادة الرابطة: Matrix: وهي تمثل البنية أو التركيبة الميكروية لحديد الزهر المحيطة بالغرافيت باختلاف أشكاله. هذه البنية الميكروية تتغير باختلاف معدلات التبريد وباختلاف نسبة المزج الكيميائي للمعدن. فيمكن أن تكون فريتية أو برليتية أو أوستنيتية أو مارتنزيتيه أو بينيتيه.



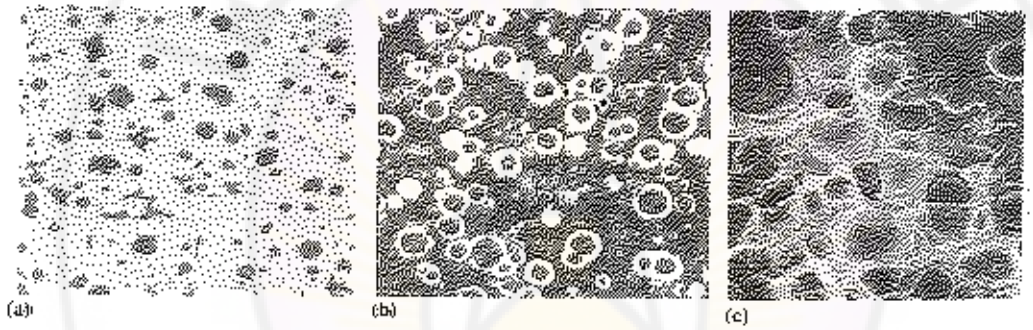
الشكل(3-17): شكل وحجم وتوزع الغرافيت الممكن توافره ببنية حديد الزهر الرمادي وفقاً للمواصفة الأمريكية ASTM A 247، (I)- غرافيت كروي spheroidal (graphite)، (II)– غرافيت كروي معاب (imperfect spheroidal graphite)، (III)– غرافيت معالج (temper graphite)، (IV)– غرافيت مندمج (compacted graphite)، (V) غرافيت شبيه بالسرطان البحري (crab graphite)، (VI)– الغرافيت المنفجر (exploded graphite)، (VII)– الغرافيت القشري (flake graphite).



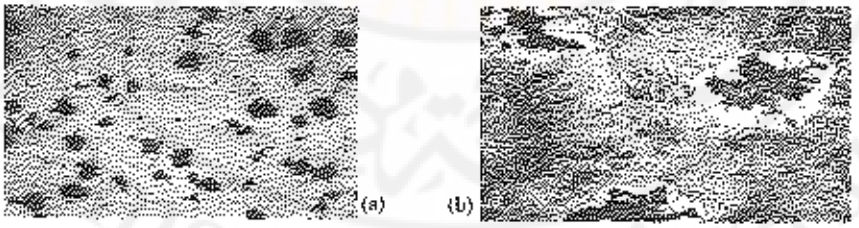
الشكل(3-18): التوزع الغرافيتي لحديد الزهر القشري والمحدد بالمواصفة الأمريكية A247, ASTM.



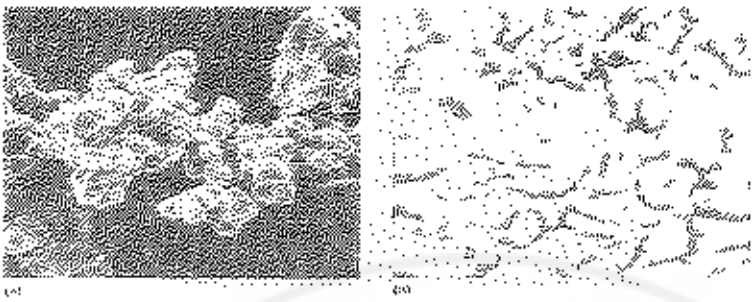
الشكل(3-19): الأنواع الرئيسية المختلفة للصنف A غرافيت والمحددة بالمواصفة الأمريكية A ASTM 247.



الشكل(3-20): شكل التوزع الغرافيتي في حديد الزهر المرن ذي الغرافيت الكروي.(a)- أرضية فريتية، (b)- أرضية برليتية. (c)- الكسر الهش في حديد الزهر الكروي يظهر على شكل دموع متحركة.



الشكل(3-21): شكل التوزع الغرافيتي في حديد الزهر المعالج.(a)- أرضية فريتية، (b)- أرضية برليتية ناعمه معالجة بالتبريد بالهواء.



الشكل(3-22): شكل التوزع الغرافيتي في حديد الزهر ذي الغرافيت النودي.

جدول (3- 10): الإضافات المثالية للعناصر والتي تعمل على الغرفنة بالشكل الكروي.

نوع الحديد	كربون %	سيليكون %	منغنيز %	كبريت %	الفوسفور %
أبيض	1.8–3,6	0.5–1,9	0.25–0,8	0.06–0,2	0.06–0,2
رمادي	4 - 2.5	1–3	1 - 0.2	0.02–0,25	1 - 0.02
كروي	4 – 3	1.8–2,8	1 - 0.1	0.01–0.03	0.01–0,1
طروق	2.2–2,9	0.9–1,9	0.15–1,2	0.02–1,2	0.02–0,2
مندمج	4 - 2.5	1–3	1 - 0.2	0.01–0,03	0.01–0,1

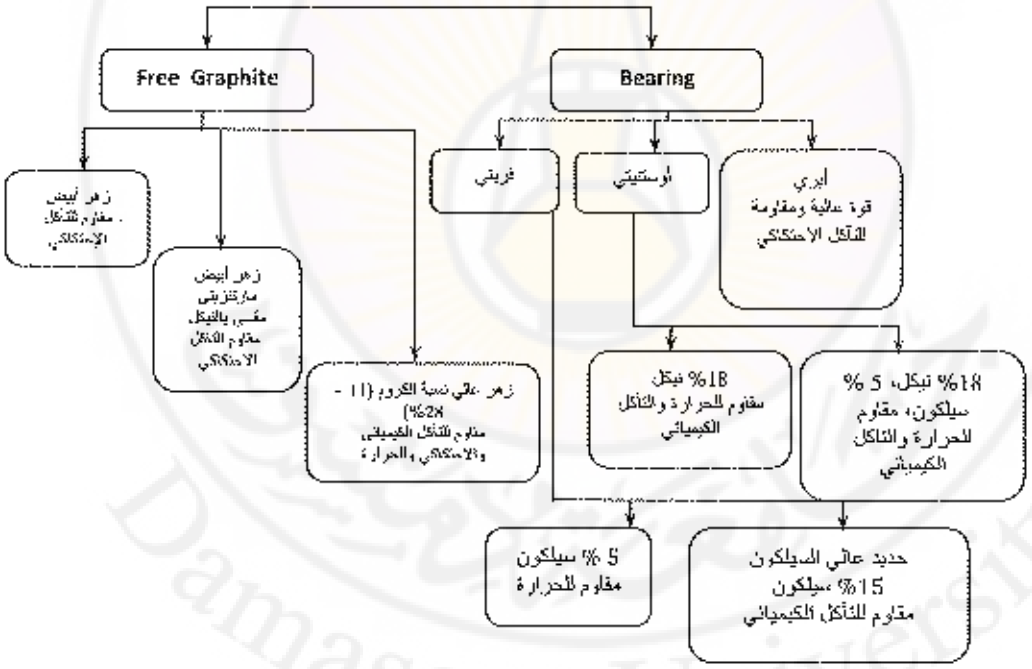
إن جميع التصنيفات التي ذكرت سابقاً هي نادرة الاستخدام بين جمهور رجال السباكة. إنما الاصطلاح اللغوي الأكثر استخداما بالنسبة لهم هو المصطلح التجاري الذي تم من خلاله تقسيم حديد الزهر إلى رتبتين:

- حديد الزهر العمومي Common Cast Irons: من أجل الاستخدامات الصناعية العامة وهو منخفض نسبة العناصر الخلائطية أو لا خلائطي.
- حديد الزهر الخاص Special Cast Irons: من أجل الاستخدامات الصناعية الخاصة وهو مرتفع نسبة العناصر الخلائطية حيث نسبتها أكثر من 3%. وهذا ما يكسبه خصائص تمكنه من العمل في درجات الحرارة العالية ومقاومة التآكل الكيميائي والتآكل الاحتكاكي. إن تصنيف الأنواع المختلفة من هذا الزهر يمكن إيضاحه تخطيطيا كما بالشكل (3-23).

إن التشكيل ما بين التصنيفات التجارية وبين التركيبة الميكروية وبين مرحلة الإنتاج النهائي يمكن إيضاحها بالجدول (3-11) التالي:

جدول (3- 11): يبين العلاقة بين التصنيفات التجارية وبين التركيبة الميكروية وبين مرحلة الإنتاج النهائي.

الاسم التجاري	الطور الغني بالكربون	الأرضية	الكسر	البنية النهائية يتم الحصول عليها بـ
حديد زهر رمادي	غرافيت صفائحي	برليتية	رمادي	التجمد
حديد زهر كروي	غرافيت كروي	برليتية، فريتية، أوستنيتية	فضي_رمادي	التجمد أو المعالجة
حديد زهر متدمج	غرافيت متدمج	فريتية، برليتية	رمادي	التجمد
حديد زهر أبيض	كربيد	برليتية، مارتنزيتية	أبيض	التجمد أو المعالجة (غالبا لا تستخدم)
حديد زهر أرقش	غرافيت صفائحي + كربيد	برليت	أرقش	التجمد
حديد زهر طروق	غرافيت معالج	فرليتية، برليتية	فضي_رمادي	المعالجة الحرارية
حديد زهر كروي بينيتي	غرافيت كروي	بينيتية	فضي_رمادي	المعالجة الحرارية



الشكل(3-23): يوضح تصنيف حديد الزهر الخاص المرتفع نسبة العناصر الخلائطية.

2. تأثير نسب المزج الكيميائي:

إن التحليل الكيميائي لحديد الزهر يمكن اختياره لتحقيق ثلاثة أشكال أساسية من البنية:

- شكل الغرافيت وتوزيعه بالبنية.
- توزيع الكربيد الحر بالبنية.
- الأرضية المطلوبة من حديد الزهر (فريتية – برليتيه – فريتيه & برليتيه – أوستنيتيه...).

إن نسبة العناصر الأساسية والعناصر الثانوية والعناصر الأخرى ضئيلة التوفر في الحديد الزهر لها تأثير بالغ الأهمية على شكل بنية حديد الزهر وعلى خواصه الميكانيكية. كل هذه العناصر تؤثر على العوامل الأخرى سابقة الذكر. على سبيل المثال فإن زيادة نسبة الكربون والسيليكون يحسن عملية الغرفتة المحتملة أما الكروم فله تأثير معاكس على البنية. كما تؤثر هذه العناصر على درجات حرارة التحولات الطورية فتؤثر على درجة حرارة السيولة وبدرجة الصلابة وتؤثر أيضا على نسبة النقاط E, C في المخطط التوازني للحديد والكربون.

إن التأثير المشترك لكل من السيليكون والكربون على البنية يمكن وصفه بما يدعى بمفهوم الكربون المكافئ والذي يوصف بالشكل التالي:

$$CE = \%C+0.31(\%Si)+0.33(\%P)-0.027(\%Mn)+0.4(\%S)$$

3. تأثير سلوك التبريد أثناء التجمد والمقطع الحساس بالبنية:

إن المعدل الذي تبرد به المسبوكات أثناء تجمدها تتأثر بالكثير من العوامل أهمها: درجة حرارة السكب، معدل السكب، حجم المسبوكة الواجب تبريدها، المساحة السطحية للمسبوكة، الناقلية الحرارية لمادة القالب، كمية وحجم مادة القالب المحيطة بالمسبوكة، عدد المسبوكات في القالب الواحد، مواضع الثقوب بالمسبوكة وشكل بوابات الصب والمصاعد المختارة. في القالب الواحد يمكن أن يكون عدد هذه المتغيرات ثابتاً.

على كل حال، إن اختلاف نسبة حجم المسبوكة إلى سطحها من مقطع لآخر يؤدي إلى اختلاف معدل التبريد الذي يؤدي بدوره لاختلاف شكل التجمد في كل مقطع وبالتالي تغير في الخواص الميكانيكية ضمن المصبوبة الواحدة. لهذا فإن تجمد الحديد الزهر يقال عنه بالمقطع الحساس. لذلك فعلى مصمم المسبوكة أن يأخذ في الاعتبار طبيعة وماهية الخواص الميكانيكية

المطلوبة في المقطع وأي من المقاطع هو المقطع الحساس. لذلك فإن رجال السباكة يختاروا المزج الكيميائي المطلوب للحديد ليعطي خواصا ميكانيكية موصوفة أثناء تجمده.

إن بنية المعادن العمومية الشائعة تتأثر بمعدل التبريد الذي تتجمد فيه هذه البنية. ففي حالة الحديد الزهر فالتأثير العام لمعدل التجمد السريع هو بنية غرافيتية ذات حجوم رقيقة ناعمة وأرضية ناعمة. ومصبوبات حديد الزهر الأرق تتجمد بسرعة أكبر معطية تركيبة أبرية مختلفة عن حالتها في المقاطع الأثخن. على كل حال يمكننا القول إن زيادة معدلات التبريد الفجائية يغير بالكامل شكل البنية الناتجة، والذي يؤدي بدوره لبدء التجمد عند درجة تحول يوتكتيكية أخفض من حالتها التوازنية. وهذا يغير نوع الغرافيت الناتج وبسبب لتشكل الكربيد الأولي في البنية. زيادة ما تحت التبريد يمكن أن يؤدي بدوره إلى منع تشكل الغرافيت بالكامل. وبالتالي يروج حديد الزهر الأبيض.

4. المعالجة السائلة (التطعيم):

هناك بعض الإضافات التي تقدم لحديد الزهر المنصهر قبل سكبه وذلك بغية تغيير شروط تشكل الأنوية ونموها أثناء التجمد وذلك من خلال زيادة عدد الأنوية في مصهور الحديد. والذي يؤدي بدوره إلى تغيير في توزع الغرافيت وبالتالي إلى التحسين في الخواص الميكانيكية.

الغرافيت أوالفيروسيليكون يمكن أن يستخدموا لتطعيم الحديد الزهر. إن أحد أهم التأثيرات للتطعيم هو زيادة الغرفتة المحتملة بسبب انخفاض ما تحت التبريد أثناء التجمد. نتيجة ذلك يقل احتمال حدوث التبريد الموجّه، ويتغير شكل الغرافيت من النوع D أو E إلى النوع A. أيضا إن عملية التطعيم تقود إلى بنية أنعم وإلى عدد أكبر من الخلايا اليوتكتيكية وبالتالي زيادة في المقاومة.

5. المعالجات الحرارية:

إن المعالجة الحرارية لمصبوبات الحديد يمكن أن تؤدي إلى مجال واسع من الخصائص الميكانيكية. فمن خلال المعالجة الحرارية تظهر تأثيرات عديدة لدينا مثل: إزالة الاجهادات الداخلية، تحسين التشغيل الميكانيكي، تحسين المتانة واللدونة، وتحسين المتانة ومقاومة التآكل. إن عملية المعالجة الحرارية من أجل بعض المعادن مثل حديد الزهر المطاوع ومن أجل قوالب الصب المعدنية تعد خطوة هامة في عمليات الإنتاج.

إن المعالجة الحرارية لحديد الزهر الرمادي التي تجري على مسبوكاته تشتمل على ثلاثة عمليات رئيسية وهي: التلدين وإزالة الإجهادات والتسوق وبعض العمليات الثانوية الأخرى كالتقسية والتطرية التسيقية والتي تجرى بشكل ضيق. كما يمكن أن تتم المعالجه باللهب أو بالتقسية التحريضية.

3-2-3: تصنيف حديد الصب والفولاذ السبائكي:

يوجد في الوقت الحاضر ثلاثة أنظمة تصميمية شائعة تستخدم لسباكة المعادن وهي:

- النظام الرقمي الموحد (UNS).
- معهد السباكة والصب (ACI).
- الجمعية الأمريكية للاختبار والمعادن (ASTM).

يعدّ النظام الرقمي الموحد (UNS) من أوسع الأنظمة حيث تصنف المعادن والسبائك إلى 17 سلسلة، حيث يبدأ هذا النظام بحرف مفرد يتبع بخمس درجات رقمية إذ إنه من الممكن أن يدل الرقم على اسم المعدن الأساس، فعلى سبيل المثال يستخدم A للدلالة على سبائك الألمنيوم، و C للدلالة على سبائك النحاس، و N للدلالة على سبائك النيكل .....الخ. وعادة يشار بالجداول إلى لائحة الأحرف حسب سلاسل المعادن حيث يتم عرض الحرف مع الدرجات الخمس. فعلى سبيل المثال:

سبيكة الألمنيوم A 92024 وهي سبيكة ألمنيوم 2024.

C 36000 وهي سبيكة نحاس 360.

S 31600 وهي سبيكة فولاذ ستانلس ستيل نوع 316.

N 10276 وهي سبيكة نيكل C 276.

تشير اللائحة الكاملة لأرقام UNS إلى التاريخ الذي يمكن إيجاده من نشرة المعادن والسبائك في النظام الرقمي الموحد.

تبدأ التصاميم في نظام ACI بحرفين يتبعان بمرتبتين أو ثلاث مراتب من الأرقام، والبعض أيضا ينتهي بأحرف إضافية أو حتى رقم وعادة ما يبدأ بحرف C للدلالة على مقاومة المادة للتآكل أو بحرف H للدلالة على مقاومة المادة للحرارة، والحرف الثاني يكون أحد الأحرف (من A إلى Z) حيث الأحرف الأولى تعتمد على محتوى النيكل وأقل درجة من حيث الأحرف

الأولى تعتمد على محتوى النيكل وأقل بدرجة من محتوى الكروم. الجدول (3--12): يبين الأحرف البادئة المستخدمة في UNS.

جدول (3- 12): يبين الأحرف البادئة المستخدمة في UNS.

الرمز	اسم السبيكة	الرمز	اسم السبيكة	الرمز	اسم السبيكة
A	الألمنيوم وسبائكه	H	فولاذ قابل للتحكم بقساوته	P	المعادن النفيسة وسبائكها
C	النحاس و سبائكه	J	الفولاذ المصبوب ما عدا الفولاذ العددي	R	العناصر التفاعلية و الصعبة الانصهار مع سبائكها
D	فولاذ بخصائص ميكانيكية مميزة	K	الفولاذ ذي الخصائص المختلفة والسبائك السعدنية	S	الفولاذ المقاوم للحرارة و التآكل
E	العناصر النادرة في الأرض	L	المعادن ذات درجة انصهار منخفضة وسبائكها	T	الفولاذ العددي
F	حديد الصب	M	المعادن اللاحديدية المختلفة الخصائص وسبائكها	W	أنابيب اللحام المعدنية
G	الفولاذ الكربوني وسبائكه	N	النيكل وسبائكه	Z	الزنك وسبائكة

على سبيل المثال محتوى سبيكة 12% كروم ولا تحتوي على النيكل يرمز لها بـ CA، بينما المادة التي تحتوي 100% نيكل ترمز بـ CZ.

والسبائك المتوسطة تأخذ الأحرف التي بين هذين الرقمين حيث يشار إلى المحتوى الأعظمي برقم (وهو عبارة عن النسبة مضروبة بمئة) وكما يشار إلى حضور مركبات سبائكية أخرى بأحرف أخرى.

لا تتبع سبائك النيكل نحاس النظام المعروض في الجدول (5.2) حيث تستخدم كحرف أول على سبيل المثال (M25.5,M35-1) وتستخدم سبائك نيكل مولبيديوم الحرف N كحرف أول مثل N_7Mn و $N_{12}MV$. وحيث إن ACI لم يعد لها ذلك الحضور فإن ASTM قد أخذت النظام وأشارت فيه إلى التصاميم الجديدة كما السبائك الأخرى المطورة.

تمتلك ASTM أيضا نظاماً خاصاً للتصاميم للعديد من السبائك الفولاذ الكربوني الخاصة ومنتجات حديد الصب، وتشير بعض التصاميم إلى نوع المادة مثل WCA,WCB و WCC

من أجل الفولاذ الكربوني الملحوم بدرجات A,B,C وترقم بعض الدرجات بالترتيب لتشير إلى توصيف معين والأخرى تشير إلى الخصائص الميكانيكية مثل المتانة.

3-2-4: خصائص وميزات الأنواع المختلفة من حديد الصب:

1. الحديد الرمادي:

وهو الحديد الأكثر شيوعا وانتشارا، وعندما يتحطم يظهر بمظهر رمادي ومن هنا جاء الاسم الحديد الرمادي، يحتوي الحديد الرمادي على 1.7-4.5 % كربون و 1-3 % سيليكون، يعدّ هذا الحديد الأرخص بين المعادن المصبوبة، وبسبب خصائصه فقد أصبح أكثر المعادن المصبوبة استخداما على الإطلاق على أساس الوزن.

مقاييس ASTM متعددة تتعامل مع الحديد الرمادي ولكن المقياس الذي يشار إليه في أغلب الأحيان هو المقياس A48. هذه المقاييس تصنف الخليط على أساس إجهاد الشد مع مجال يتراوح بين 20000 -60000 psi. المقاييس A247 تستخدم بالاشتراك مع المقياس A48 لوصف البنية الفرلبتية للحديد. المقاييس A319, A278, A126 تتعامل أيضا مع الحديد الرمادي.

للحديد الرمادي سيولة جيدة عند درجة حرارة الصب الأمر الذي جعله مثاليا من أجل صب الأشكال المعقدة وعند جميع الأحجام، تحت الظروف الطبيعية لا تحدث تقلصات كبيرة أو تحدث تقلصات محدودة للغاية خلال عملية التصلب الأمر الذي يسهل من عملية تصميم القالب بالمقارنة مع الخلائط الأخرى.

في الحديد الرمادي يكون الكربون بشكل غرافيت قشري، إضافة السيليكون يساعد في جعل Fe_3C غير مستقر ومع تبريد المعدن البطيء يتفكك Fe_3C إلى الغرافيت، للحديد الرمادي صلابة ضعيفة نسبيا بسبب تأثير تركز الإجهادات على حواف الغرافيت القشري، الخصائص الميكانيكية هنا تتغير بتغير معدل التبريد ويتم قياسها من أربعة قضبان تم صبها من ذات المعدن الخاص بالمصبوبة، هذه القضبان تصنف إلى A,B,C,S. القضبان A,B,C تدون بأقطار متزايدة وتختار وفقا للحجم النسبي للمصبوبة ومعدل تبريدها. القسم S هو قضيب خاص موافق عليه من قبل المصنع والمستهلك، هذه القضبان تستخدم لاختبار الالتواء ثلاثي النقاط (ASTM A 438) من أجل تحديد حمل التحطيم العكسي والتشوهات.

في الغالب مصبوبات الحديد الرمادي غير منصوح بها للتطبيقات التي تتطلب مقاومة اصطدام، مصبوبات الحديد الرمادي تستخدم عادة في التطبيقات العادية وتطبيقات الانضغاط لأن البنية الغرافيتية القشرية تعمل كمزيل إجهادات داخلي، يزود الشكل الغرافيتي القشري ميزة في تطبيقات التشغيل أو تكوين المعدن وإخماد الصوت وانتقال الحرارة.

تفاصيل إجهاد الشد للحديد الرمادي كتبت كصنف من الحديد. الصنف 30 حديد رمادي سيكون له إجهاد شد أدنى قدره 30 kpsi في قضيب مصبوب بشكل منفصل من الصنف A، تم إجراء تحديد نموذجي للصنف 20 إلى 60، للتطبيقات المؤتمتة (SAL Specification J431) استخدمت نسبة إجهاد الشد إلى صلابة برينل لتصنيف الحديد الرمادي، التعبير صنف CLASS تعريف عام أما التعبير درجة GRADE كما هو مستخدم في مواصفات SAE يشير إلى نسبة إجهاد الشد / الصلابة، أنظر الجدول (3-13) من أجل درجات الحديد الرمادي.

الحديد الرمادي يمتلك قوة أكبر بكثير في حالة الانضغاط منها في حالة الشد، انظر الجدول (3-14) من أجل مقارنة بين قوة الضغط أو إجهاد الضغط وإجهاد الشد لدرجات مختلفة من الحديد الرمادي.

جدول (3-13): درجات الفولاذ الرمادي من SAE J431. حيث "t/h": اجهاد الشد/القساوة.

نوع الحديد	قساوة برينل	جائز الاختبار (t/h)	البنية
G1800	120-187	135	فريت ــ برليت
G2500	170-229	135	برليت – فريت
G3000	187-241	150	برليت
G3500	255-207	165	برليت
G4000	217-269	175	برليت

جدول (3- 14): مقارنة بين قوة او اجهاد الضغط واجهاد الشد لدرجات مختلفة من الحديد الرمادي.

نوع الحديد	متانة الشد (ksi)	متانة الضغط (ksi)	متانة الضغط + الشد (ksi)	معاملات الشد $E \times 10^6$ (psi)
20	120-187	33	3.7	10
30	170-229	109	3.5	14
30	187-241	140	2.45	18
60	217-269	187.5	3.0	21

كما ذكر سابقا فإن الحديد الرمادي يملك إمكانية تخميد ممتازة، الجدول (3-15) يبين مقارنة نموذجية من حيث قدرة الإخماد بين الحديد الرمادي ومواد أخرى.

الغرافيت نسبيا خامد ويعتبر المهبط بالنسبة إلى الحديد وباستمرار سيتعرض الحديد إلى هجمات مستمرة وسريعة من التآكل حتى في الأجواء ضعيفة التحفيز للتآكل، يتعرض الحديد الرمادي إلى نوع من الفرقته يعرف باسم Graphitization (من لفظ الغرافيت) والذي يتضمن انطلاقاً انتقائياً من الهياكل الشبكية للحديد، على الرغم من هذا لاتحدث تغيرات ظاهرة في الأبعاد وكان هناك قدر كاف من الخسارة في المقطع العرضي والقساوة تقود إلى الانهيار. في أغلب الأحيان فإن الحديد الرمادي يستخدم في البيئة ذاتها التي يستخدم بها الفولاذ المكربن والفولاذ قليل الخلائط، على الرغم من أن مقاومة التآكل في الحديد الرمادي أفضل نوعا ما من المقاومة في الفولاذ المكربن فإن نسب التآكل في البيئات الريفية والصناعية وقرب الشواطئ مقبولة جداً. ميزة الحديد الرمادي على الفولاذ المكربن في بيئات معينة هي نتيجة أن تآكل حديد – الغرافيت ذي المسام يشكل طبقة تتوضع وتشكل السطح. هذه الطبقة تشكل ميزة خاصة تحت ظروف السرعة كما في خطوط الأنابيب، وهذا هو السبب الكامن خلف الاستخدام الواسع للحديد الرمادي في أنابيب المياه تحت الأرضية.

جدول (3- 15): قدرة التخميد (امتصاص الطاقة) للحديد الرمادي.

نوع المعدن		التخفيض في الارتفاع الشاقولي نتيجة الاهتزاز بكل دورة
فولاذ كربوني		1.0-2.0
حديد زهر مطوع		3.3-6.3
حديد زهر كروي		3.0-9.4
حديد زهر رمادي هيبويوتكتيكي	3.2%C, 2.0% Si	40
	3.7%C, 1.8% Si	126

الحديد الرمادي غير مقاوم للتآكل في الأسيد باستثناء الأسيد المركز حيث تتشكل طبقة حامية للسطح، إنها غير ملائمة للاستخدام مع (Oleum) (زيت الثيري) لأنه من المعروف أنها تتمزق مع هذا الاستخدام مع إمكانية انفجار عنيف يبدي الحديد الرمادي مقاومة جيدة للمحاليل القلوية مثل هيدروكسيد الصوديوم ومصهور الصودا الكاوية، وبالمثل فإنها تبدي مقاومة جيدة للمحاليل القلوية مثل السيانيد والسيليكات والكربونيات والكبريتيد، أملاح الأسيد والأملاح المؤكسدة تهاجم

الحديد الرمادي بسرعة كبيرة، الحديد الرمادي سيستوعب الكبريت عند درجة حرارة (149-205) درجة مئوية، الكبريت المصهور يجب أن يكون خالياً من الهواء والكبريت الصلب يجب أن يكون خالياً من الماء.

يجد الحديد الرمادي تطبيقا في معاملة تدفق الغاز كما في الأفران العاملة على الفحم وفي المبادلات الحرارية، كميات كبيرة تستخدم في إنتاج الأنابيب التي ستدفن، بشكل طبيعي فإن الحديد الرمادي سيدوم أكثر من أنابيب الفولاذ المكربن اعتمادا على نوعية التربة وفترة التصريف وعوامل أخرى.

2. الحديد اللدن (غير العقدي):

الحديد اللدن ذات التركيب الكيميائي الخاص بالحديد الرمادي مع تعديل كيميائي بسيط. قبل صب الحديد المصهور بقليل يتم إضافة مادة تطعيم ملائمة مثل المغنيزيوم، وهذا يبدل بنية الحديد لينتج بنية ميكروية فيها شكل الغرافيت المنتج خلال التصلب ذو شكل كروي بدلا من شكل القشرة السابق، للشكل القشري ميكانيكية جيدة ولكن للشكل الكروي صلابة ولدونة أكبر، البنية يمكن أن تكون فرايتية أو برليتية أو martinsitic اعتمادا على عملية المعالجة الحرارية، جزيئات الغرافيت محاطة بالفريت الأبيض وجميعها في شبكة البرليت هي النمط الأكثر شيوعا. عناصر أخرى يمكن أن تستخدم لإنتاج شكل جزيئات الغرافيت تتضمن بتريوم والكالسيوم والسيريوم.

ASTM A536 (SAE J434) تغطي تفاصيل الخصائص 60-40-18 هي مثال لمثل هذه التفاصيل، هذه الخصائص تعني من أجل إجهاد شد حده الأدنى 60 ksi وقساوة ناتجة حدها الأدنى 40 ksi واستطالة حدها الأدنى 2 انش في 18%. هذه الخصائص يتم الحصول عليها عادة من كتلة بشكل حرف Y أو متصالبة، والتي تصب بشكل منفصل من أجل اختبار الصب، الجدول (3-16) يبين خصائص الحديد اللدن.

مقاومة التآكل في الحديد اللدن مماثلة لتلك في الحديد الرمادي باستثناء واحد هو تحت ظروف السرعة فإن مقاومة الحديد اللدن يمكن أن تكون أقل بقليل من الحديد الرمادي على اعتبار أنه لا يشكل النمط ذاته المطبقة المشكلة في حالة الحديد الرمادي.

3. الحديد الرمادي ذو البنية الأوستينيتية :Austenitic

ويشار له أيضا باسم خليط النيكل المقاومة، هذه المجموعة تتكون من الحديد الأوستنيتي عالي النيكل ويستخدم بشكل أساسي بسبب مقاومته العالية للتآكل، الجدول (3- 17) يبين التركيب الكيميائي لخلائط النيكل المقاومة، هذه الخلائط لها قساوة أفضل من الحديد الرمادي عديم الخلط ولكن مع قساوة شد أقل نسبيا تتراوح بين 20,000 و 30,000 psi. ASTM A571 تغطي خلائط النيكل المقاومه وتمتلك درجة حرارة لقساوة الاصطدام أفضل من غيرها، الجدول (3-18) يبين الخصائص الميكانيكية لخلائط النيكل المقاومه.

جدول (3- 16): خصائص الحديد اللدن من ASTM A536

التسمية والمعالجة الحرارية	متانة شد (Ksi)	قيمة حد الخضوع (Ksi)	الاستطالة (%)	قساوة برينل	التركيبة الميكروية
60-40-18[1]	60,000	40,000	18	149-187	فريت
16-45-12	65,000	45,000	12	----	----
80-55-06[2]	80,000	55,000	8	187-256	برليت & فريت
100-70-03	100,000	70,000	3	----	----
120-90-02[3]	120,000	90,000	2	240-300	مارتنسيت معالج

(1): ملدن بعد الصب، (2): مصبوبة ذات محتوى منغنيز كبير، (3): مسقى بالزيت ثم مجرى عليه عملية تطبيع للحصول على القساوة المطلوبة.

مقاومة التآكل تتوضع بين الحديد الرمادي وسلسلة الفولاذ عديم الصدأ 300، إنها تجد مجال تطبيق واسع في تطبيقات حقل البترول وكبريتيد الهيدروجين واستيعابه، الهجوم الشديد للتآكل يمنع من خلال تشكل الطبقة الواقية وهي أفضل من الحديد الرمادي عند التعرض للأجواء الطبيعية الاعتيادية ومياه الحار والصودا الكاوية او هيدروكسيد الصوديوم وأسيد الكبريت المخفف والمركز. النحاس في النمط الأول حيث يقدم أفضل مقاومة لأسيد الكبريت.

4. حديد الزهر الكروي:

إن منتجي ومستثمري مسبوكات الحديد الكروي DI غير ملمين بمدى اتساع دائرة المزايا التي تتمتع بها خلائطه. فمنذ ظهوره بالأسواق عام 1948 أثبت أنه البديل الفعال للفولاذ من حيث

الكلفة وقابلية الطرق وعمليات التشكيل والتصنيع. وكان ذلك لأسباب عديدة يمكن عرضها في هذا الفصل. فلا يخلو مجال من مجالات الهندسة من الـ DI كما أنه يوجد في معظم دول العالم ويعرف بعدة أسماء S.G.Iron أو الحديد العقدي Nodular Iron أو كما عرف بأمريكا الشمالية بـ Ductile Iron (DI) وفيه يوجد الغرافيت بشكل كرات متناهية في الصغر.

حديد الزهر الكروي يصعب تحديد مكانه في قائمة المواد الهندسية فهو كغيره من المواد كالخشب والبلاستيك، فمن الصعب وضع مادة في مكان مميز دون غيرها في الأفضلية فنقول مثلا هي أفضل من غيرها بشكل مطلق.

ينصح المصمم أن يكون على اطلاع كامل على أصناف خلائط المسبوكات وخواص المسابك، فمثلا لا يمكن الحصول على جميع درجات الـ DI في كل المسابك ولكن عمليا يمكن إنتاج درجة مناسبة منه في أي مسبك بحيث تؤدي الغرض الصناعي.

جدول (3- 17): التركيب الكيميائي لخلائط النيكل المقاومه.

المواصفة ASTM	دلالة خليطة الزهر	C %	Mn %	Si %	S %	Cr %	Ni %	Fe %	عناصر سبائكية أخرى %
A436	Type 1	3.00	0.5-1.5	1.00-2.80	0.12	1.5-2.5	13.5-17.5	موازنة	5.5-7.5 Cu
A436	Type 1b	3.00	0.5-1.5	1.00-2.80	0.12	2.5-3.5	13.5-17.5	موازنة	5.5-7.5 Cu
A436	Type 2	3.00	0.5-1.5	1.00-2.80	0.12	1.5-2.5	16.0-22.0	موازنة	0.05 Cu
A436	Type 2b	3.00	0.15-1.5	1.00-2.80	0.12	3.0-6.0	18.0-22.0	موازنة	0.05 Cu
A436	Type 3	2.60	0.15-1.5	1.00-2.00	0.12	2.5-3.5	28.0-32.0	موازنة	0.5 Cu
A436	Type 4	2.60	0.5-1.5	5.00-6.00	0.12	4.5-5.5	29.0-32.0	موازنة	0.5 Cu
A436	Type 5	2.40	0.5-1.5	1.00-2.00	0.12	0.10 وسطيا	34.0-36.0	موازنة	0.5 Cu
A436	Type 6	3.00	0.5-1.5	1.50-2.50	0.12	1.0-2.0	18.0-22.0	موازنة	3.5-5.5 Cu, 1.00 Mo
A571		2.2-2.7	3.75-4.5	1.50-2.50	----	0.20 وسطيا	21.0-24.0	موازنة	0.08 P

جدول (3- 18): يبين الخصائص الميكانيكية لخلائط النيكل المقاومه.

المواصفة ASTM	درجة الخليط الزهر	متانة الشد Ksi	قيمة حد الخضوع (Ksi)	الاستطالة (%)	قساوة بريل	اختبار شاربي للصدم	
						Ft.lb	°F/ °C
A436	Type 1	25	----	----	131-183	100	درجة حرارة الغرفة
		30	----	----	149-212	80	درجة حرارة الغرفة
A436	Type 2	25	----	----	118-174	100	درجة حرارة الغرفة
A436	Type 2b	30	----	----	171-248	60	درجة حرارة الغرفة
A436	Type 3	25	----	----	118-159	150	درجة حرارة الغرفة
A436	Type 4	25	----	----	149-212	80	درجة حرارة الغرفة
A436	Type 5	20	----	----	94-124	150	درجة حرارة الغرفة
A436	Type 6	25	----	----	124-174	----	----
A571		65	30	30	121-171	15	-195/-320

إن أول إنتاج لحديد الزهر الكروي كان في عام 1964 من قبل H. Morrogh وقد استخدم السيريوم كمادة تطعيمية من أجل المعرفته بالشكل الكروي. بعدها تم الحصول على النتيجة نفسها باستخدام المغنزيوم بدلا من السيريوم، ومنذ ذلك الحين وإنتاج الزهر الكروي يتزايد وينمو.

إن حديد الزهر الكروي يميز باحتوائه الغرافيت بشكل كروي ميكرويا في أرضيه برليتيه، فريتيه أو برليتيه فريتيه. وهذا الغرافيت يشكل حوالي 10% من حديد الزهر الكروي، إن تزايد قرب الكرات الغرافيتيه من بعضها يقلل تأثير الخصائص الميكانيكية، وكما نعلم فإن الخصائص الغرافيتيه لحديد الزهر الغرافيتي تتأثر بشكل كبير بشكل وحجم وتوزع الغرافيت، كما أن شكل

الغرافيت يتمدد عند تجمد المعدن ولا يمكن أن يتغير في أي اتجاه ماعدا حالة إعادة صهر المعدن من جديد.

يتميز حديد الزهر الكروي باحتوائه على الميزات الأساسية لحديد الزهر الرمادي (القشري) (نقطة انصهاره المنخفضة، سيولته الجيدة، الفوليه، سهولة التشغيل الميكانيكي، امتصاص الاهتزازات، ومقاومته الجيده للتآكل) مع الخصائص الهندسية للفولاذ (قوة شد عالية، جساءة، مطيليه، إمكانية العمل على الساخن وإمكانية التقسية)

إن حديد الزهر الكروي قد اختير لأسباب عده على أنه الأقل تكلفة أثناء عمليات التشغيل وهو مماثل تقريبا لحديد الزهر الرمادي الذي يملك القساوة نفسها.

إن حديد الزهر ذا الغرافيت الكروي يملك إجهادات شد أعلى من الرمادي الذي تعمل قشورة على تكون الشقوق، وبالتالي تعطي قوة شد دون استطاله أما الشكل الكروي فيقلل احتمال حدوث الشقوق ويملك معدلات متانه تقع بين الرمادي والفولاذ، كما أنه يملك مقاومة للصدم الحراري تقريبا مساوية الفولاذ الطروق. ويتحمل الضغوط المرتفعة ويمكن لحامه.

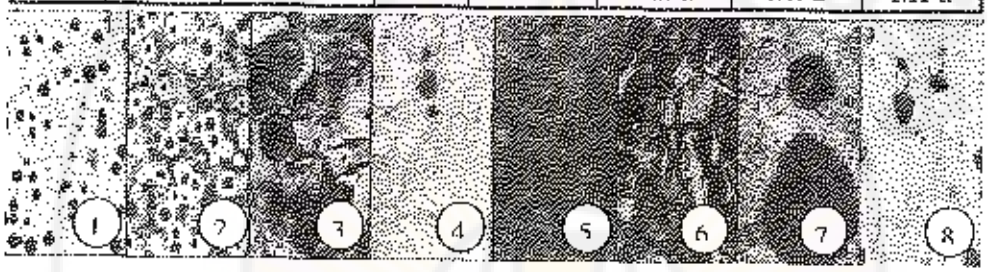
إن حديد الزهر الكروي لا يمثل مادة واحدة وإنما يمثل عائلة من المواد ذات الخواص الميكانيكية الواسعة مجال الاستخدامات التي تجعله قادراً على خدمة التغيرات الكبيرة من المتطلبات الهندسية، فمنه: جدول (3-19).

- الطري ذو نسب الفريت المختلفة والذي يملك مطيلية وقساوه كبيرتين وهو عبارة عن حديد ذقي مقاوم للصدم بشكل كبير، وله ناقلية حرارية جيده ومتمتع بخواص نفاذيه مغناطيسية ومقاوم للتآكل وسهل التشغيل.
- والأنواع البرليتيه ذات مقاومة الشد العالية وتتكون من أرضية برليتية (خليط ناعم من الفريت والسمنتيت) قاسية نسبياً ومطيلية عالية المتانة ومقاومة للاحتكاك والصدم وموصلة حراريا وبنفاذية مغناطيسية قليلة.
- والأنواع البرليتيه – الفريتيه وهذه الأنواع مشهورة جدا وخواصها وسط بين نموذجي الفريت التام والبرليت التام. كما تعترض المصممين أحيانا ظروف خاصة فيتصب اهتمامهم على الخلائط الخاصة:
- كأنواع Di المحتوية على درجات من الموليبديوم من أجل مقاومة درجات الحرارة العالية.
- والأنواع المحتوية على درجات سيليكون مختلفة تستخدم لمقاومة الأكسدة.

- والـ DI المارتنسيتي الذي يتصف بخليطة قاسية وهشة في حالة السكب، وهي نادرة الاستخدام، بينما المارتنسيت المرجع يتمتع بمتانة عالية ومقاومة احتكاك كبيرة وعند إرجاعه بدرجة 500 درجة مئوية فإن له قساوة 300 برينل وعند إرجاعه بالدرجة 600 له قساوة 250 برينل.

جدول (3-19): متانة الشد وشكل البنية للأنواع المختلفة من الـ ADI .

فريتي بدرجات -40-60 18	فريتي- برليتي بدرجات -55-80 06	برليتي بدرجات -70-100 03	مارتنسيتي (+ أوستنيت متبقي)	مارتنسيت مرجع	أوستنيتي بدرجات 7-100-150	أوستنيتي بدرجات -230 185	أوستنيتي
414 MPa	552 MPa	690 MPa	600 MPa	793 MPa	1050 MPa	1600 MPa	310 MPa



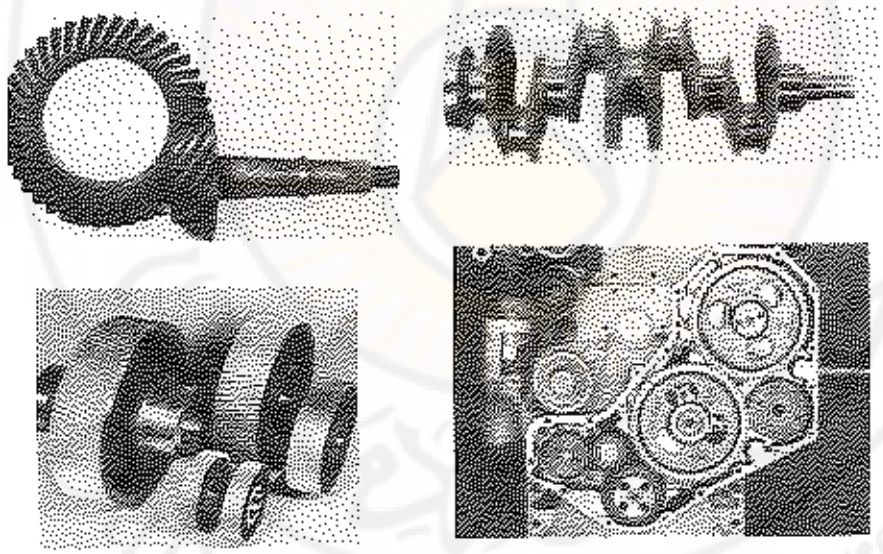
- والـ DI الأوستنيتي (ADI) الذي يتصف ليس فقط بالمتانه بل بمقاومة الأكسده والتآكل وبخواص مغناطيسية جيدة ومتانة واستقرارية أبعاد عند درجات الحرارة المرتفعة، وهو أحدث وأفضل مجموعة من الـ DI التي توضع بين يدي المصمم والتي تملك المتانة والصلابة ومقاومة التآكل مما يعطي القدرة لدى المصممين على تقليل وزن الأجزاء وكلفتها مع احتفاظها بالأداء نفسه أو أفضل. إن متانة ADI تماثل تقريبا ضعف متانة DI الموصوف في المجتمع الأمريكي للسباكة ASTM مع احتفاظه بميزات الصلابة والاستطالة العاليين ومقاومة التآكل والتعب الممتازين. كما تم تطوير هذه البنية من خلال المعالجة الحرارية (الإرجاع) بجو مغلق والتي أعطت بنية فريدة تتألف من 60% فريت بينيتي والباقي أوستنيت عالي الكربون، وهذه النسبة المتبقية الأخيرة (40%) مستقرة حراريا وثابتة في درجات الحرارة العادية لكن عملها تحت ظروف إجهادات شديدة سوف يؤدي إلى تحولها إلى بنية مارتنسيتيه. مثل هذه الميزة تلزم في عمود الكامات والمحامل التي تتعرض لأحمال متناوبه والمسننات وأسطوانات الدرفلة، شكل (3-24)

وذلك لإعطاء تحسينات مع الاستعمال وعادة ما يعمل إجهادات سطحية قبل وضع العنصر في الآلة وذلك لتحسين مقاومة التآكل وإطالة أمد العمر.

- لا يوجد حالياً مواصفات قياسية للـ ADI ولكن يوجد خمس درجات مقترحة منه وذلك لتلبية حاجة المصمم ورجال السباكة. جدول (3-20).

إن المعالجة الحرارية الضرورية لإنتاج ADI هي عبارة عن عمليتين جوهريتين:

- عملية الأستنة في المجال (815 - 920) درجة مئوية واختيار الدرجة اللازمة لإرجاع الأوستنيت يتبع لدرجة الـ ADI المطلوبة. ويجب التحكم بدقة بهذه الدرجة في مجال ±10 درجات مئوية.
- نقل سريع للمصبوبات لفرن الإرجاع (عادة في وسط ملحي) حيث توضع القطعة عند زمن ودرجة حرارة إرجاع إيزومترية دقيقة مختارة في المجال (230 - 400) وذلك وفقاً للميزات المطلوبة في المادة (درجة ADI).



شكل(3-24): يوضح تصنيف حديد الزهر الخاص المرتفع نسبة العناصر الخلائطية.

إذاً إن الاختلاف بين الأنواع المختلفة من حديد الزهر الكروي يكمن في التركيبة الميكروية للمعدن حول الغرافيت والتي تدعى بالأرضية Matrix. وهذه البنية تختلف مع اختلاف شروط عمليات الإنتاج واختلاف المزج الكيميائي ومعدلات التبريد للمسبوكة، إن بنية الأرضية والقساوة يمكن أيضا تغييرهما باختلاف المعالجة الحرارية، فالأنواع عالية المطيلية غالباً ما يعمل لها تلدين للحصول على غرافيت بصورة منضمة مع الغريت الحر الذي يتوضع بشكل خاتم أو حلقة حول الغرافيت الكروي ولهذا فهو يدعى Bull's -- eye ferrite أما الأنواع العالية إجهادات الشد فغالبا ما تنتج بعملية معالجة حرارية بالتقسيق لجعل البنية كلها بر لبتيه أو بعملية السقاية ثم الإرجاع وذلك للحصول على أرضية مارتنسيتيه مرجعه. كما يمكن إنتاج الـ DI دون اللجوء للمعالجات الحرارية.

جدول (3-20): المواصفات الخمسة لـ ADI المتداولة ASTM A897.

متانة الشد MPa	حد الخضوع MPa	الإستطالة %	نموذج شاربي (غير المحزوز) J	مجال قساوة برينل BHN
850	550	10	100	269-321
1050	700	7	80	302-363
1200	850	4	60	341-444
1400	1100	1	35	388-477
1600	1300	--	------	444-555

أما من حيث استعمالات الزهر الكروي: فإن أهمية الزهر الكروي يمكن تقييمه من خلال الإحصاءات الإنتاجية التي تدل على أنه في عام 1983 بلغت معدلات إنتاجه في الولايات المتحدة الأمريكية نسبة 24% (وزن) من المسبوكات الحديدية، و 21% في باقي دول العالم، وقد تجاوز كل التوقعات في تنامي استعماله عند طرحه في الأسواق.

وصل إنتاج الحديد الزهر الكروي عام 1959 إلى 300,000 طن كمنتجات أجزاء سيارات وأنابيب التمديدات، وفي عام 1963 وصل الإنتاج إلى مليون طن، وفي عام 1966 إلى مليوني طن، أما الآن فقد تضخم الإنتاج وزاد كثيراً عن سابقته، فقد وصل عام 1999 إلى 20 مليون طن ويتوقع أن يصل على نهاية عام 2012 إلى أكثر من 45 مليون طن وبعد استعمال الـ DI من الميزات الهندسية لعصرنا. فقد دخل في صناعة المحركات (المجمع المنفلي، أنابيب المياه، صندوق الحماية ضد سرقة السيارات...) وغزا كل تطور صناعي في العالم ومن دون شك كان سبب رواجه هو متانته مع كلفة تصنيعه القليلة "MORE STRENGTH FOR LESS

"EXPENSE" مقارنة مع كل خليطة أخرى لها ميزاته نفسها. إن قلة التكلفة تكمن ليس فقط من توافر مادته الخام وفعاليات أعمال سباكته بل أيضا من قلة تكاليف عمليات التشغيل الميكانيكي والتظيف له. سنورد فيما يلي بعض الأمثلة عن استعمال DI حول العالم:

- هياكل المضخات باستطاعة 1000 HP حيث كانت تصنع سابقاً من الفولاذ، صناعتها من الـ DI أدى إلى توزع أكثر انتظام للإجهادات وتقليل التكلفة وتحسين نسبة المتانة إلى الوزن، كما تم تخفيض الوزن بنسبة 46% وهذا يشكل عاملاً هاماً في بعض الإنشاءات وخاصة التي تعمل بالهواء.
- صفيحة ضغط عمود الكامات تصنع في USA تتعرض لتآكل حتى كبير. إن سبب تصنيعها من حديد الزهر الكروي هو جمعه بين خاصتي المقاومة للتآكل وسهولة التشغيل الميكانيكي وتطلى بالفوسفات لتكون مرنة في الاستعمال.
- كراسي المحاور (مضاجع) تصنع في السويد من الـ DI وهي مناسبة للاستخدام مثل الفولاذ غير أن لها مزايا إضافية هي سهولة التشغيل الميكانيكي وقدرتها على تخميد الاهتزازات.
- وهناك الكثير الكثير من الأجزاء التي تم استبدالها بالزهر الكروي عوضاً عن الفولاذ أدت إلى توفير المال وتأمين القوة والمتانة والعديد من المميزات الفريدة نذكر منها: نوابض العجلات الأمامية، العمود المرفقي، عمود الكامات، مسننات القيادة، أجهزة القيادة، أجهزة الفصل والوصل، المكابح، أذرع توصيل المحرك، محاور العجلات، صمامات الأمان، الأسطوانات والمكابس الهيدروليكية المصنعة في ألمانيا من درجات DIN 1693; GGG 60 والتي تملك مقاومة داخلية لغاية 500 ضغط جوي ، أنابيب المياه، أجزاء الآلات والمحاريث الزراعيه...

إن كل خطوة في عمليات التصنيع لـ DI تؤثر في سعر المنتج النهائي وتعكس تأثيرها على المصمم، هناك عدة عوامل رئيسية تؤثر على الاقتصادية وهي:

- المتانة المطلوبة: إن الدرجة المطلوبة من الـ DI لها تأثير كبير على الاقتصادية فبالعودة لمراجع التصنيفات نجد أن الدرجة 65-45-12 من حديد الزهر الكروي هي الأقل تكلفة وخاصة إذا أخذنا بالحسبان تكلفة التشغيل الميكانيكي بينما نجد أن الدرجة 80-55-06 تكلفة إنتاجها مماثلة لسابقتها ولكن الاختلاف في أنها أقل سهولة في التشغيل الميكانيكي، الدرجة 100-70-03 ما تزال رخيصة وتختار لأنها ذات متانة كبيرة وذات مقاومة

عالية للتآكل. الدرجة 60-40-18 و 120-90-02 كلفة صبهم عالية لكن كلاهما يختار اقتصاديا بكثرة وخاصة إذا كانت لميزات المادة المستخدمة قيمة خدمية معينة. إن تقدير درجات الأوستنيت ذات التكلفة العالية جدا يتم اعتبارها شخصيا بناء على أساسيات عدة مثل: مقاومتها الممتازة للتآكل الكيميائي والتآكل الحتي وللأكسدة، بالإضافة إلى إمكانية تفضيلها في الاستخدامات التي تتطلب درجات حرارة عالية وميزات مغنطة وتمددات حرارية منخفضة وملامح أخرى مميزة.

- **كلفة التشغيل الميكانيكي:** تعتبر ذات أهمية كبيرة في معرفة اقتصادية التصنيع لمنتج ما. فالمتانة، الوزن، عمر القطعة إضافة لاهتمامات أخرى كلها تدخل في تقليل التكلفة. إن أسهل درجات التشغيل تأخذ الرقم 3 ثم 4 ويعدها 5 فرقم 2، وبعد الدرجة 1 هي الأقل قابلية للتشغيل الميكانيكي حيث يفوق الفولاذ ذو نفس القساوة من حيث التكلفة. كما أن كلفة تشغيل حديد الزهر الأوستنيتي تفوق كلفة تشغيل الفولاذ غير القابل للصدأ (ستانلس ستيل).
- **معدلات التبريد:** إن لمعدلات التبريد (سماكات المقاطع المختلفة) تأثيراً كبيراً على خصائص الحديد الزهر الكروي. فالتبريد السريع والفجائي يروج أرضية قاسية وبنية هشة صعبة التشغيل على الماكينات. في حدود سماكات 6 مم أو أثخن تكون عملية الإنتاج سهلة نسبيا أما بالثخانات الأقل فإنه يتطلب عمل معالجة حرارية للقطعة بعد السكب وذلك بغية إزالة الهشاشية والقساوة أو التقليل منها وهذا بدوره يتطلب الكثير من المال إضافة إلى أن المعالجة تؤدي إلى زيادة كلفة إنتاج القطعة بنسبة (10 – 30) %.
- **سهولة التصميم:** كما نعلم بأنه يفضل التصميم البسيط للنموذج الذي يؤدي بدوره لتقليل عدد القلوب (الأذوية) بالنموذج، سهولة التصميم، التقليل من الإجهادات المحتملة أثناء السكب، الخدمة لفترة أطول (عدم تلف النموذج بسرعة)، التقليل من التكلفة. عدم وجود تفاوتات سماكة كبيرة حيث يلزمنا عندها دراسة خاصة للمصاعد المطلوبة وللمبردات وبالتالي كلفة إضافية. تأثير الإنتاجية في المسبك ونوع المادة المراد سباكتها والمعالجة الحرارية اللاحقة، كيفية التجمد للمعدن المصبوب ونظام الصب والتغذية للمسبوكة كل هذه العوامل تقوم بدور كبير بالتأثير على هندسة شكل المسبوكة وإن التصميم الأمثل للنموذج هو الذي يؤدي إلى تجمد منتظم للمعدن ضمن القالب
- **التصميم من أجل مصبوبة سليمة:** نتيجة التمددات الحجمية التي تحصل في كل جزء بالمسبوكة أثناء سير عملية التحول يحصل هناك شد سطحي بالمصبوبة، إن اختيار الحديد

الكروي يعد اختيارا أمثل من أي معدن آخر أو خليطة معدنية أخرى ماعدا حديد الزهر الرمادي العادي. لاتزال متغيرات متطلبات التغذية من حيث الشكل والحجم هي التي تحكم المصممين، بصورة مغايرة للفولاذ والنحاس وخلائط معدنية أخرى كثيرة فإن المصمم والسباك لحديد الزهر الكروي سوف يقوم بمحاكاة عملية التجمد في كل أنحاء المسبوكة. وهذا معاكس للموصوف في التجمد الموجه الذي يطبق على الفولاذ. إن التصميم يهدف دائما إلى تقليل زمن المحاكاة أثناء عملية التجمد والى تقليل الحاجة إلى مصاعد، وهذا يمثل تحسيناً في طواعية الصب أما في حديد الزهر الكروي فإن العملية معكوسة فحديد الزهر الكروي يتطلب عملية تبريد منخفضة وصب بطيء للمعدن.

مقارنة بين الفولاذ والزهر الكروي:

- إن حديد الزهر الكروي يحتوي على كمية أعلى من السيليكون (بالإضافة للكربون) لذلك فهو فعليا عبارة عن خلائط حديد- كربون - سيليكون، زيادة نسبة الكربون والسيلكون في الـ DI يجعله خليطة ممتازه. درجة انصهاره أخفض منها في الفولاذ.
- إن مصهور حديد الزهر الكروي أكثر سيولة من الفولاذ وأقل تفاعلاً مع مادة القالب. إن تشكل الغرافيت ذي الكثافة القليلة (كثافة الغرافيت 2.25% gram/Cm^3) في الحديد أثناء عملية التجمد يقلل التغيرات في الحجم (الانكماش) من حالة التحول من السائل إلى الصلب ويجعل المنتجات الأكثر تعقيدا سهلة السباكة، كما أن انخفاض الكثافة يجعل الـ DI أقل وزنا من الفولاذ للمنتج نفسه.
- حديد الزهر الكروي عموما يملك قابلية للتقسية أكثر من الفولاذ اليوتكتويدي، وذلك لاحتوائه على عناصر سبائكية كميتها كبيرة نسبيا. عند القساوة المنخفضة (حديد الزهر الكروي بإجهاد شد لغاية حوالي 550 ميغا باسكال) إمكانية التشغيل الميكانيكي للزهر أفضل منه للفولاذ الطروق. عند القساوة العالية يكون الاختلاف في التشغيل الميكانيكي بين الزهر الكروي والفولاذ غير واضح.
- كما أن تأثير الغرافيت أثناء إنقاص مساحة المقطع العرضي يؤدي إلى تخفيض معامل المرونة إلى (165 – 179 غيغا نيوتن / م^2) مقارنة بـ (207 غيغا نيوتن / م^2) من أجل الفولاذ. إضافة لذلك فإن حديد الزهر الكروي لا يملك نقطة طواعية. إن التحول من إنتاج الدواليب الفولاذية إلى دواليب الحديد الكروي أدى إلى تخفيض التكلفة، زيادة الجودة، كريبيدات أوليه حره، عدم الحاجة لعمليات الإصلاح باللحام كما يتم بالفولاذ حيث كان يكابد

الكثير في عمليات تصنيعه كما أن عمليات التشغيل الميكانيكي لدواليب الزهر على الأقل أحسن 100% منها لدواليب الفولاذ.

5. الحديد الأبيض:

هذه الخليطة يشار لها أيضا بالنيكل الصلب، يكون الكربون في هذه الخلائط في حالة اتحلال تام ومكسر عينة من هذا الحديد يظهر بلون أبيض، هذه الخلائط تحتوي على النيكل بنسبة 4-5 % والكروم في المجال 1.5-3.5%.

يتصلب الحديد الأبيض في وسط بارد دون اعطاء الوقت الكافي لتشكيل الغرافيت الحر فإن الغرافيت في هذه الحالة يشكل كربيدا قاسيا مقاوما للحت Fe_3C. هذه الخلائط تستخدم بشكل أساسي في التطبيقات المقاومة الحت كدرافيل الطحن، وعناصر الآلات المقاومة للإحتكاك وغيرها. وعادة بعد التصنيع تعالج المادة حراريا لإنتاج أرضية مارتنسيتية بهدف الحصول على الصلابة القصوى وأعلى مقاومة الحت. الشرط الوحيد المطلوب من قبل ASTM هو صلابة برينل، الذي يعتبر بأن القيمة 600 HB نموذجية رغم أنه في بعض الخلائط يمكن أن تصل صلابة برينل إلى 700 HB.

6. حديد الزهر عالي السيليكون:

حديد الزهر عالي السيليكون يتصلب تحت العملية المعروفة باسم DURION و DURICHLOR 51 وهو الاسم التجاري لشركة DURION، هذه الخلائط تحتوي على 12-18% من السليكون مع اعتبار 14.5 كنسبة اسمية (14.2 كحد أدنى مطلوبة من أجل مقاومة التأكل) و 1% كربون والبقية من الحديد.

هذه الخلائط حساسة خصيصا للصدمات الحرارية والميكانيكية، لا يمكنها التعرض لتغيرات مفاجئة في درجة الحرارة ولا يمكنها الصمود في وجه الإجهادات أو الصدمات القوية. الحديد عالي السيليكون هش للغاية وصعب التشغيل أو التكوين، عند تعرض الحديد عالي السيليكون لبيئة تأكل لأول مرة فان حديد السطح يتعرض للإزالة تاركا خلفه طبقة من أوكسيد السيليكون شديدة الالتصاق وذات مقاومة عالية للتأكل. هذه الخلائط شديدة المقاومة للتآكل وأحد استخداماتها الأساسية هي في التعامل مع أسيد الكبريت، إنها مقاومة لجميع تراكيز أسيد الكبريت وصولاً إلى درجة الغليان، أسيد النتريت وبتركيز 30% يمكن التعامل معه وصولاً إلى درجة الغليان، لتراكيز أقل من 30% فإن درجة الحرارة محدودة عند الدرجة 82 °C.

عند إضافة 4.5% من الكروم إلى الخليطة فإنها تصبح مقاومة للأملاح الحاوية على الكلوريد شديدة الخطورة والبيئات شديدة التأكسد الأخرى.

درجة الخلط بالكروميوم (DURICHLOR) ستتحمل أسيد الهيدروكلوريد وصولاً إلى درجة الحرارة 80 °F.

7. الحديد القابل للطرق (المطواع):

الحديد اللدن والحديد المطواع متشابهان جداً ولكن الحديد المطواع نادر الاستخدام لأسباب اقتصادية، الحديد المطواع يحتوي على شكل لغرافيت الحديد يشار إليه بغرافيت الكربون المسقى، هذا الشكل للكربون يشكل من خلال المعالجة الحرارية لمنتج حديد الزهر بعد التصلب، الصب يتم من خلال التسخين والحفاظ على درجة الحرارة في المجال (800--970) درجة مئوية لمدة تصل إلى 20 ساعة، خلال التصلب بعد الصب ينتج شكل غير مستقر لكربيد الحديد، المعالجة الحرارية تحطم الكربيد ليشكل عقد غرافيتية تدعى الكربون المسقى والأوستينيت، عند التبريد فإن الأوستينيت يتحول إلى الأشكال المختلفة البرليت والفرليت و Martensite اعتماداً على معدل وسرعة التبريد، المعالجة الحرارية هنا هي السبب في ندرة استخدام هذا النوع من الحديد، ASTM A47 &220 هي الخصائص الأكثر استخداماً بالحديد المطواع، وفي الغالب هناك اختلاف بسيط في مقاومة التآكل بين الحديد الرمادي والحديد المطواع. الحديد المطواع أقل كفاءة من الحديد الرمادي في ظروف الجريان على اعتبار عدم وجود غرافيت قشري للحفاظ على نواتج التآكل في مكانها ولهذا السبب يستمر الهجوم والتآكل بمعدل ثابت بدلاً من الانخفاض مع الزمن.

إذاً حديد الصب القابل للطرق هو الحديد الذي قد تمت سباكته بطريقة مشابهة للطريقة العادية، والذي قد حسّنت مطيليته وقابليته للطرق من الصفر إلى قيمة معتبرة بالمعالجة الحرارية المتلاحقة. إن التسمية العامة لعملية جعل الحديد قابل للطرق هي، الحديد ذي القلب الأسود و الحديد ذي القلب الأبيض، والتي تشير إلى لون مقطع مكسره بعد المعالجة الحرارية.

7-1: مسبوكات الحديد المطيع ذات القلب الأسود (Black heart):

تصنع من حديد أبيض وتتكون من: 2.5% كربون، 1% سليكون، 0.4% منغنيز، 0.08% كبريت، 0.1% فوسفور.

في العمليات الأولية يتم قص الحواف الخشنة للمعدن ثم توضع في حاويات من الحديد الأبيض مع بعض المواد الخاملة كيميائيا مثل الفرابيل أو الفحم المحروق. ثم تركب الأغطية لمنع دخول الهواء ثم توضع الحاويات في فرن التلدين الذي يسخن بواسطة الفحم، الغاز، أو الفيول المرذذ، درجة حرارة المعالجة تتراوح بين (°C 950 - 250) وهي تعتمد على الكفاءة المطلوبة للمنتج وتركيب السبيكة الأصلية. أما فترة المعالجة الحرارية فهي بين (170-50) ساعة أيضا تعتمد على نوع المسبوكة وتركيب الحديد.

إن تطوير أفران التلدين الحديثة أدت إلى إنقاص فترات التسخين والتبريد لذلك فإن عملية التلدين يمكن أن تتم في48 ساعة أو أقل، مثل هذه الأفران من النوع المستمر حيث الأرضية المتحركة تحمل المسبوكة ببطء عبر فرن طويل مكون من أقسام صغيرة متقاطعة حيث يكون فيها الجو غير مؤكسد (يتم التحكم به).

إن تأثير عملية التلدين الطويلة هي السبب في تحطيم السمنتيت لكن بدلاً من أن يتشكل صفائح غرافيتية خشنة يترسب الكربون على شكل Rosetles صغيرة من الكربون المسقى، المقطع العرضي سيكون أسود، من هنا جاء الاسم (Black heart) البناء النهائي الذي يتكون من الغرافيت والكربون المسقى الناعم يكون طرياً سهل التشغيل ومطيلي.

مثل هذا النوع من المسبوكات الطيعة (Black heart) تجد استخدامات خاصة لصناعة السيارات بسبب خواصها في قابلية السكب ومقاومة الصدم وسهولة التشغيل التي تتحلى بها.

الاستخدامات المثالية تتضمن محامل المحور الخلفي، مركز الدولاب، أحذية المكابح، الدواسات، مفاصل الأبواب.

7-2: مسبوكات الحديد الطيع ذات القلب الأبيض (White heart):

تصنع من الحديد الأبيض الذي يحتوي على: 3.3% كربون، 0.6% سليكون، 0.5% منغنيز، 0.25% كبريت، 0.1% فوسفور. في هذا النظام تسخن المسبوكة في التلامس مع بعض المواد المؤكسدة مثل فلز الهيماتيت ويتحول إلى ثاني أكسيد الكربون، وهذا يؤدي إلى انتشار الكربون من المركز إلى الخارج حيث يتم خسارته بالأكسدة وهكذا بعد المعالجة نحصل على مقطع رقيق فريتي بشكل عام ويكون ذا مظهر فولاذي أبيض من هنا أتى الاسم (White heart).

وهكذا بينما تكون الطبقة الخارجية فريتية فإن الطبقة الداخلية برليتية ويحوي المركز على خلايا من الكربون المسقى، وقد تتعرض الطبقة السطحية لاختراق الأكسدة.

القطع ذات المقاطع الرقيقة التي تتطلب لدونة عالية غالبا ما تصنع على شكل مسبوكات طيعة (White heart). أمثلة: وصلات أنابيب الغاز ،الماء ، الهواء، البخار. هياكل الدراجات الهوائية أجزاء الآلات الزراعية، القاطعات الكهربائية، والآلات النسيجية.

7-3: مسبوكات الحديد المطيع البرليتي:

ينتج من المواد الخام المماثلة في تركيبها للحديد الطيع، على الرغم من ذلك يمكن استخدام بعض العناصر السبائكية من أجل زيادة استقرار المزيج البرليتي المطلوب في البناء النهائي.

عند استخدام الحديد السبائكي يتم تلدينه بشكل كامل أو جزئي بدرجة حرارة 950 °C بحيث يسبب تحطيماً مناسباً للسمنتيت الأولي ثم يعاد تسخينه إلى 900 °C لذلك ينحل الكربون في الأستنيت في تلك الدرجة. المعالجة اللاحقة تكون إما من التبريد الهوائي (لينتج المزيج البرليتي) أو بعض الأشكال الأخرى من المعالجة الحرارية المصممة لإعطاء مارتنسيت بينيتي أو مسقي.

عند استخدام حديد سبائكي عادة نحصل على معالجة تلدينية عادية. إن وجود العناصر الاستقرارية الكربيدية تسبب احتباس البرليت الحاضن خلال هذه العملية.

البنية الأخرى ستتكون من قشور غرافيتية وردية في مادة حاضنة من البرليت، البينيت أو المارتنسيت المسقي طبقا للمعالجة الحرارية النهائية المعطاة.

يمكن الحصول على متانة شد لحدود $775\ N/mm^2$ وفي كثير من الحالات يمكن للمنتج أن يتنافس مع الفولاذ المصبوب على الرغم من الكلفة الإضافية لمعالجة الحرارية. الجدول (3-21) يبين الخواص الميكانيكية (القيم الصغرى) لحديد الصب الطيع (Black heart).

8. الحديد الغرافيتي المدمج:

بنية الحديد الغرافيتي المدمج تقع بين الحديد الرمادي و الحديد اللدن، الشكل الغرافيتي يقع بين الشكل العقدي الحقيقي والشكل القشري للحديد الرمادي، الشكل الغرافيتي هنا يشار اليه بالمدمج Vermicular وبالشكل القشري قصير التلثم، إنتاجه مشابه لإنتاج الحديد اللدن مع بعض العناصر الإضافية في الخليطة مثل التيتانيوم.

يتضمن الحديد الغرافيتي المدمج العديد من الخصائص المطلوبة في الحديد الرمادي ولكنه يمتلك قوة ولدانة أفضل. لقد لوحظ أن سيولته الشديدة وانكماشه الكبير عند التصلب تتوضع بين الحديد الرمادي وبين أعلى نسبة انكماش في الحديد العقدي، الميزة الحقيقة هي في ثنائية السيولة التي تسمح بإذابة قطع أكثر تعقيدا وأقل ثخانة ومع خصائصه الميكانيكية، القيم النموذجية لإجهاد

الشد في الحديد المدمج مع شبكة فرليتية تقع في المجال 35–55 ksi مع قساوة ناتجة تتراوح بين 25–40 ksi واستطالة 6%.

جدول (3-21): الخواص الميكانيكية (القيم الصغرى) لحديد الصب الطيع.

النوع	المرتبة	قطر قطعة الاختبار	اجهاد الصمود 5% (N/mm^2)	متانة الشد (N/mm^2)	الاستطالة %	القساوة (غير الزامي)
BS 309 طيع بقلب ابيض	W-410/4	9	190	350	10	أعظميا 229
		12	230	390	6	
		15	250	410	4	
	W-340/3	9	—	270	7	اعظميا 229
		12	—	310	3	
		15	—	340	4	
BS 310 طيع بقلب اسود	B-340/12	15	200	340	12	اعظميا 149
	B-310/10	15	190	310	10	
	B-290/6	15	170	290	6	
BS 3333 طيع برليتي	P-690/2	15	540	690	2	241-285
	P-570/3	15	420	570	3	197-241
	P-540/5	15	340	540	5	179-229
	P-510/4	15	310	510	4	170-229
	P-440/7	15	270	440	7	149-197

التطبيقات العملية محدودة للغاية بسبب الحرص الشديد في التحكم بالبارامترات الكيميائية للمصهور المذاب وبارامترات التصلب، هناك اختلاف بسيط في مقاومة التآكل بين الحديد المدمج والحديد الرمادي.

تم استخدام حديد الزهر المدمج من قبل Morrogh في Beira منذ عدة سنوات، البنية غرافيتية والخصائص الفيزيائية تكون وسطاً بين الحديد الغرافيتي الصفائحي الرمادي وبين الحديد SG. ومع معالجة كيميائية مناسبة تصبح الصفائح الغرافيتية قصيرة وثخينة وذات حواف مدببة. وهذا يؤدي إلى Vermicular Iron الذي يتم استخدامه في الولايات المتحدة مع ذلك فإن الصفائح الغرافيتية ليست Worm like بشكل كامل، يدل عليه العنوان.

حديد (CG) ينتج عندما ينزع الكبريت من الحديد المصهور بالقرب من التركيب اليوتكتيكي. ثم تتم المعالجة بدرجة حرارة 1400 °C مع إضافة كمية مناسبة من المغنيزيوم والتيتانيوم

والسيريوم، لذلك النتيجة هي حديد يحوي (0.015-0.03%) مغنيزيوم، (0.06-0.13%) تيتانيوم وآثار من السيريوم.

إن وجود المغنيزيوم يؤدي إلى تشكل غرافيت كروي كما في حديد (SG) وهذا يتم التحكم به عن طريق التحكم بتجمد التيتانيوم الذي يجعل كمية المغنيزيوم أقل حرجاً.

تتوسط الخواص الميكانيكية بين الحديد الرمادي وحديد (SG) (ذو الغرافيت الكروي) بينما مقاومة النمو والتقييس لدرجات الحرارة العالية جيدة جدا.

بما أن حديد الصب الغرافيتي يكون ناقلاً أفضل للحرارة ويأتي بعده الحديد (CG) الذي يملك ناقليه حرارية أقل بقليل من الحديد الرمادي. كل هذه العوامل تؤدي إلى أن حديد (CG) جذاب في المواد المقاومة للحرارة وقد تم تطويره أساسا لصناعة قوالب التماسيح المعدنية وعناصر الكبح في الآليات.

في الهندسة الحديثة يوجد العديد من التطبيقات الأخرى مثل المضخات والمسننات اللامركزية واسطوانات الهواء والسوائل وأنابيب النفث ....الخ.

الاختيار بين الحديد الرمادي العادي وحديد (SG) والحديد المطيع من أجل تطبيق محدد. معظم مشكلات المواد تفرض متطلبات تقنية وأخرى اقتصادية مثلاً الحديد الرمادي أقل سعراً والأسهل من أجل إنتاج المسبوكات المصممتة. أما بالنسبة للحديد (SG) والحديد المطيع فاختيار القرار سيكون أصعب.

9. أنواع واستخدامات حديد الصب العادي:

لقد طورت خلائط حديد الصب لمقاومة النمو في درجات الحرارة العالية. يعدّ حديد (Silal) رخيصاً نسبياً ويحوي 5% تقريباً سيلكون مع نسبة قليلة من الكربون. وهذا المحتوى العالي جداً للسيلكون يساعد على تشكل الغرافيت أكثر من السمنتيت خلال عملية التصلب وبذلك سوف تحتوي البنية كلياً على الفريت والغرافيت ولا وجود للسمنتيت الذي وجوده قد يسبب النمو. ولكن لسوء الحظ إن حديد (Silal) هش نوعا ما لذلك عندما يكون السعر الأعلى مبرراً من الممكن استخدام خليطة (Nicrosilal) بفوائدها. وهي خليطة حديد صب مع النيكل والكروم بالحالة الأوستنيتية.

يمكن أن يصنف الحديد السباكي إلى المجاميع التالية و ذلك وفقا للخواص والاستخدامات:

9-1: الحديد المانع: يستخدم عندما تكون المتانة الميكانيكية ذات أهمية ثانوية، ونحصل على الميوعة العالية بواسطة محتوى السيلكون العالي (2.5-3.5%) والمحتوى العالي للفسفور

(حتى 1.5%). كلّ من السيلكون والفسفور يحسنان من الميوعة، وإن المحتوى العالي من السيلكون سيضمن حصول الأجزاء الرقيقة على بنية رمادية صلدة بنحو معقول حيث أن السيلكون يمنع التبريد العميق. مثل هذا الحديد يستعمل إلى حد كبير في إنتاج أعمدة الإنارة والمواقد ولكن استعيض عنها في الوقت الراهن بالمواد السيراميكية لمثل هذه الاستخدامات.

9-2: الحديد الهندسي: يجب أن يكون ذا متانة ميكانيكية وأفضل الأنواع بالبنية المجهرية حيث يحتوي على حبيبات يوتكتيك صغيرة الحجم (قشور غرافيتية في البرليت). يمتلك هذا النوع من الحديد أفضل الخواص الميكانيكية بالمجمل، ويكون أيضا ذا قابلية تشغيل جيدة. يعتمد محتوى السيلكون على سماكة الجزء المراد سباكته ولكن بالحالة العامة سوف لا يتجاوز 2.5% للمسبوكات ذات الأجزاء الرقيقة، وقد يكون أقل من 1.2% للمسبوكات ذات السماكة الكبيرة.

يجب أن يحافظ على محتوى الفسفور قليلا عندما تكون مقاومة الصدمات ضرورية في المسبوكات، لذا قد يوجد الفسفور حتى 0.8% في بعض الحالات المهتمة بالميوعة. ويجب الحفاظ أيضاً على مستوى الفسفور قليلا (أقل من 0.1%)، لأنه يسبب السكرجة والبقع القاسية وهشاشة عامة.

قد يكون الحديد من هذا النوع قاسيا ومقاوماً للاهتراء و ذا سطوح مبردة في أجزاء مختلفة من المسبوكة لو كانت مرغوبة. ويتم ذلك بإدخال قطع التبريد في النقاط الملائمة في القالب الرملي. تسبب هذه القطع تبريداً سريعاً وبالتالي تكون طبقة من الحديد الأبيض على سطح المسبوكة في هذه النقاط. وفي الوقت نفسه تبقى نواة المسبوكة رمادية وصلدة.

الجدول (3-22) يبين تراكيب واستعمالات بعض أنواع حديد الصب التقليدية. كما يبين الجدول (3-23) مجموعة من الخواص الميكانيكية التقليدية للحديد الرمادي الهندسي.

9-3: المسبوكات الثقيلة: لا تتطلب محتوى عالياً من السليكون، حيث إن هناك خطورة من التبريد. وعادة لا يكون السيلكون أعلى من 1.5%، مع محتوى فسفور حتى 0.5% لبعض المسبوكات مثل الأعمدة وهياكل الآلات الضخمة. في السباكة كما في قوالب المسبوكات التي تتعرض لدرجات حرارة عالية يجب استخدام حديد معتق وخال من الفسفور.

جدول (3-22): تراكيب واستعمالات بعض انواع حديد الصب التقليدية.

الاستعمالات	التركيب (%)				
	P	S	Mn	Si	C
قوالب السباكة و السباكة المقاومة للحرارة	0.10	0.07	0.80	1.15	3.50
المكابح الاسطوانية للمحركات	0.15	0.08	0.65	1.90	3.30
مكابس و اسطوانات المحركات	0.15	0.10	0.65	2.25	3.25
سباكة المحركات الخفيفة	0.35	0.10	0.50	2.25	3.25
سباكة المحركات المتوسطة	0.35	0.10	0.50	1.75	3.25
سباكة المحركات الثقيلة	0.35	0.10	0.50	1.25	3.25
انابيب الماء الخفيفة و المتوسطة	0.80	0.10	0.50	1.75	3.60
انابيب الماء الثقيلة	0.80	0.10	0.50	1.40	3.40
سباكة الزخارف التي تتطلب متانة قليلة (مهملة)	0.90	0.10	0.50	2.75	3.50

جدول (3-23): مجموعة من الخواص الميكانيكية التقليدية للحديد الرمادي الهندسي (BS 1452)*.

BS 1452	%0.1 مقاومة الاجهاد ($N\backslash mm^2$)	متانة الشد ($N\backslash mm^2$)	الانفعال الكلي لحظة التحطم (%)	متانة الضغط ($N\backslash mm^2$)	حد التعب ($N\backslash mm^2$)
150	98	150	0.68	600	68
180	117	180	0.60	672	81
220	143	220	0.52	768	99
260	169	260	0.57	864	117
300	195	300	0.50	960	135
350	228	350	0.50	1080	149
400	260	400	0.50	1200	152

*القيم من القائمة فقط – لا يمكن اقتراح التراكيب الكيميائية حيث انها سوف تعتمد بشكل كبير على سماكة الجزء المسبوك

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الرابع

خلائط المعادن اللاحديدية

Non Ferrous Metals Alloys

4-1: مقدمة:

إن العالم الصناعي المتقدم قد انتقل خلال عقدين، من مرحلة التصنيع إلى مرحلة ترشيد الاستخدام الذي يقوم على أساس مراعاة العامل الاقتصادي لاستخدام المواد. ومما لا شك فيه أن وقاية المعادن من التآكل لإطالة عمر استخدامها يمثل حجر الزاوية في مراعاة العامل الاقتصادي.

إن بلادنا وهي تعيش اليوم عصر التطور التقني المتسارع لا بد لها لمسايرة العصر أن تعتمد على الأسس العلمية لإرساء قاعدتها الصناعية الواسعة، فلكي يحيا المرء في حضارة تعتمد كليا على العلوم، ينبغي فهم حقيقة العلم على أنه طرق متنوعة لإيجاد المعلومات وبناء المفاهيم والمبادئ التي تفسر بشكل كاف ما يجري حولنا.

المتطلبات العملية لمعرفة كيف يمكن للمعادن أن تقاوم التآكل والاحتكاك يجب أن تدرس ويبنى عليها تطور الآلات التي تعاني من هذه المشكلة، حيث إن تآكل أجزاء الآلات هو أحد الأسباب الرئيسة لانهيار الماكينات.

فمن الضروري عند تصميم هذه الآلات أن تكون مصنعة من مواد مقاومة للتآكل ولها معامل احتكاك منخفض، والحل التقليدي المتبع هو استخدام وسائل التبريد والتشحيم، ولكن بدأ اللجوء إلى استبدال هذه المواد بخلائطها وإلى استخدام المواد المركبة والمواد السيراميكية والتي تحوي إضافات لتحسين خواصها الميكانيكية. يشتمل هذا الفصل على دراسة أهم المعادن الملونة وسبائكها التي نوجزها بالآتي:

- الألمنيوم وسبائكه - الرصاص وسبائكه - الخارصين (الزنك) وسبائكه. - القصدير وسبائكه.
- النحاس وسبائكه - الكوبالت ذو الأساس المعدني وسبائكها - الفلزات الثمينة وسبائكها.

4-2: الألمنيوم وسبائكه:

4-2-1: تمهيد:

نشاهد استعمالات مختلفة ومتعددة للألمنيوم، من علب المشروبات الخفيفة وإطارات الأبواب والنوافذ إلى استعماله كوقود لدفع صواريخ المكوك الفضائي.

يعد الألمنيوم أكثر العناصر انتشارا في القشرة الأرضية ويوجد في الطبيعة بأشكال صخرية مختلفة. لكن أهمها البوكسيت (Bauxite) وتعتمد طريقة الاستخلاص على التحليل الكهربائي للمركب، التي تستهلك كمية كبيرة من الطاقة – من الطريف أن نعرف أنه حتى عام 1886 م كان الألمنيوم أغلى ثمنا من الفضة والذهب، فلقد استعمله إمبراطور فرنسا نابليون الثالث (1808 – 1873 م) كصفائح لعمل تماثيل ومجسمات كهدايا ثمينة لضيوفه. لكن الآن يستعمل الألمنيوم كرقائق من أجل التسخين في مطبخ المنزل.

لم يتم اكتشاف الألمنيوم حتى عام 1808 م من قبل هامفري دايفي وقد أنتجت كميات صغيرة من الألمنيوم في مناسبات متفرقة باستخدام مزيج مخفف من البوتاسيوم وكلورايد الألمنيوم، وبعد عملية التقطير تم الحصول على رواسب الألمنيوم ذات النقاوة العالية، وتوجد خامات الألمنيوم في الطبيعة على عدة أشكال أهمها البوكسيت $Al_2O_3.XH_2O$ (المادة الخام الأساسية للألمنيوم) وسيليكات الألمنيوم $Al_2(SiO_3)_3$ و الكريوليت Na_3AlF_6 .

لم يبدأ استخدام الألمنيوم على نطاق واسع إلا بعد مطلع القرن العشرين بعد أن تبين أن خلائطه السبائكيه لها قوة الفولاذ نفسه مع الخفة بالوزن بثلثي القيمة تقريباً فالوزن النوعي للألمنيوم 2.75، ويحتل الألمنيوم حاليا المركز الثاني في استخداماته المتعددة بين الفلزات بعد الحديد. وقد احتل الألمنيوم قديماً مركزاً مرموقاً من حيث السعر حيث كان في البداية أغلى من الذهب والفضة والبلاتين.

4-2-2: خواص الألمنيوم:

الألومنيوم عنصر في الجدول الدوري له الرمز Al والعدد الذري 13. وهو فلز مطيلي قابل للسحب. وهو من أكثر الفلزات وفرة في القشرة الأرضية، وترتيبه الثالث من بين أكثر العناصر وفرة في الكرة الأرضية بعد الأكسجين والسيليكون. يشكل الألمنيوم 8% من وزن سطح الأرض الصلب. ويعتبر الألمنيوم أكثر المعادن فعالية كيميائية كمعدن حر، ولذلك نجده مرتبطاً بأكثر من 270 معدن مختلف.

يمتاز الألمنيوم بمقاومته للتآكل وبخفة وزنه حيث يدخل في صناعة الطائرات. وللألمنيوم قدرة مميزة على مقاومة التآكل. يستخدم الألمنيوم وسبائكه في الصناعات الفضائية وفي مجالات أخرى مثل النقل والبناء. وطبيعته التفاعلية جعلته مفيدا كحفاز أو كمادة مضافة في الخلائط الكيميائية، بالإضافة إلى استخدامه في متفجرات نترات الأمونيوم لتعزيز قوة الانفجار.

أما خواص الألمنيوم فهو فلز خفيف الوزن، ومتين وذو مظهر يتراوح بين الفضي والرمادي الداكن بحسب خشونة السطح. والألمنيوم غير ممغنط، وهو غير ذواب في الكحول، مع أنه يذوب في الماء في أشكال محددة. جيد التوصيل للحرارة والكهرباء. مقاومة الخضوع للألمنيوم النقي هي 7–11 ميغا باسكال، في حين أن سبائك الألمنيوم ذات مقاومة خضوع تتراوح من 200 إلى 600 ميغا باسكال. وللألمنيوم نحو ثلث كثافة وجساءة الفولاذ. فهو مطيلي، وسهل التشغيل، والسباكة، والبثق. وهو قابل للسحب والطرق حيث يمكن قولبته بشكل سهل نسبياً.

تعود قدرة الألمنيوم الممتازة على مقاومة التآكل إلى الطبقة السطحية الرقيقة من أكسيد الألمنيوم التي تتشكل عندما يتعرض الفلز للهواء، مما يمنع استمرار عملية الأكسدة. أقوى سبائك الألمنيوم تكون أقل مقاومة للتآكل بسبب التفاعلات الجلفانية مع سبائك النحاس. وهذه المقاومة للتآكل عادة ما تنخفض انخفاضا كبيرا عندما يوجد عدة محاليل ملحية، لا سيما بوجود معادن مختلفة.

تترتب ذرات الألمنيوم في بنية مكعب متمركز الوجوه (Fcc).

الألمنيوم هو موصل جيد للحرارة والكهرباء، ووزنه أقل من النحاس. يمكن للألمنيوم أن يكون موصلا فائقا، مع درجة حرارة حرجة للتوصيل الفائق 1.2 كلفن، ومجال مغناطيسي حرج حوالي 100 غاوس. ويعد فلز الألمنيوم من أكثر العناصر الفلزية توافراً في القشرة الأرضية بعد الأكسجين والسيليكون بنسبة مقدارها 8.3%.

لا يوجد فلز الألمنيوم في الطبيعة بشكله النقي الحر، إنما يوجد في الطبيعة على عدة أشكال أهمها سيليكات الألمنيوم $Al_2(SiO_3)_3$ و البوكسيت $Al_2O_3.XH_2O$ والكريوليت Na_3AlF_6. إذا معدن الألمنيوم يكون في الغالب مرتبطاً مع الأكسجين على شكل أكاسيد أو سيليكات. وعادة تكون مادة الألمنيوم شديدة الارتباط مع الأكسجين، وبالمقارنة مع الفلزات الأخرى، من الصعب أن يتم فصلها من خاماتها، مثل البوكسيت، وذلك نظراً إلى الطاقة اللازمة لإرجاع أكسيد الألمنيوم Al_2O_3. على سبيل المثال، فإن الإرجاع المباشر بالكربون كما يتم مع الحديد غير ممكن كيميائياً، لأن الألمنيوم يحد ذاته عامل مرجع أكثر قوة من الكربون. وبما أن لأكسيد الألمنيوم نقطة انصهار عالية نسبياً حوالي 2000 °C، لذلك فإن الألمنيوم يستحصل عليه عن

طريق التحليل الكهربائي حيث يحل أكسيد الألمنيوم في هذه العملية في الكريوليت Na_3AlF_6 المذاب، من ثم يرجع إلى الفلز النقي. تكون درجة حرارة التشغيل لخلايا الإرجاع من 950 إلى 980 درجة مئوية. يوجد الكريوليت كمعدن في غرينلاند، أما أكسيد الألمنيوم فيستحصل من معالجة البوكسيت بطريقة باير. إن الانتاج العالمي في إنتاج الألمنيوم يتم بالتحليل الكهربائي والتي حلت محل طريقة فولر process Wöhler، التي كانت تتضمن إرجاع كلوريد الألومنيوم اللا مائي بالبوتاسيوم. كل من المسريين المستعملين في عملية التحليل الكهربائي مصنوعان من الكربون. عندما تصبح الخامة في الحالة المنصهرة تتحرر الشوارد (الأيونات) وتصبح حرة الحركة، وتحدث العمليات التالية على المساري:

على المهبط (الكاثود)، المسرى السالب؛ نحصل على الألمنيوم:

$$Al \longrightarrow {}^{-3}e^{-} + {}^{+3}Al$$

يلاحظ هنا أن الألمنيوم حدثت عليه عملية إرجاع (ربح إلكترونات)، ويتشكل الألمنيوم الحر بشكله الفلزي، ويهبط إلى القاع.

على المصعد (الأنود)، المسرى الموجب؛ يتحرر الأكسجين:

$$O^{4-} + {}_2O \rightarrow {}^{-2}O^{2-}$$

باستمرار تعرض مسرى الكربون للأكسجين تحدث عملية أكسدة له، حيث يتشكل ثنائي أكسيد الكربون

$$2CO \longrightarrow 2C + O$$

لذلك يجب استبدال قضبان الكربون على المسرى الموجب باستمرار كونها تستهلك أثناء سير العملية.

نشاهد استعمالات مختلفة ومتعددة للألمنيوم، من علب المشروبات الخفيفة وإطارات الأبواب والنوافذ إلى استعماله كوقود لدفع صواريخ المكوك الفضائي. كما يستخدم الألمنيوم على نطاق واسع في منتجات عديدة في حياتنا اليومية في أدوات المطبخ، الأثاث، لعب الأطفال، مزيلات العرق، أدوية عسر الهضم، أجزاء من الطائرات والصواريخ، رقائق الألمنيوم التي تستخدم في المطبخ للف الأطعمة.

الألمنيوم النقي معدن نقي، لين ذو خواص ميكانيكية منخفضة حيث مقاومة الشد ($\sigma_r = 80$ N/mm^2)، الاستطالة (% 30)، أما الصلادة (23 HB)، درجة انصهاره (658°C). ومن الطريف أن نعرف أنه حتى عام 1886 م كان الألمنيوم أغلى ثمنا من الفضة والذهب، فلقد

استعمله إمبراطور فرنسا نابليون الثالث (1808 – 1873 م) كصفائح لعمل تماثيل ومجسمات كهدايا ثمينة لضيوفه. لكن الآن يستعمل الألمنيوم كرقائق من أجل التسخين في مطبخ المنزل !!

وكما ذكرنا من حيث استخلاص الألمنيوم: فيستخلص الألمنيوم النقي من خام البوكسيت (Bauxite) وهو عبارة عن أكسيد الألمنيوم المختلط مع شوائب أخرى. تم الاستخلاص بطريقة صناعة تسمى طريقة باير (Bayer) وتبدأ بخلط البوكسيت مع الصودا الكاوية بتأثير ضغط وحرارة كبيرين، وينتج هذا الخلط مادة شبيهه ببلورات السكر وهي عبارة عن أكسيد الألمنيوم النقي، ثم تضاف الكريولايت (Cryolit) وتتركب من فلوريد الصوديوم وفلوريد الألمنيوم التي تقوم بخفض درجة الانصهار. أخيرا يستخدم التحليل الكهربائي لفصل الألمنيوم عن الأكسجين للحصول على الألمنيوم النقي.

4-2-3: استخلاص الألمنيوم:

لا يوجد الألمنيوم بشكل نقي في الطبيعية وإنما يكون على شكل سيليكات وأكاسيد، ويعتمد مبدأ استخلاص الألمنيوم على تحليل أكسيد الألمنيوم (الألومينا) داخل حوض يحتوي على الكريولايت المنصهر ثم يتم تمرير تيار كهربائي قوي يؤدي إلى ترسيب الألمنيوم المنصهر في قاع الحوض.

وأهم الخامات الأولية التي تستخدم لصناعة الألمنيوم هو صخر البوكسيت $Al_2O_3.XH_2O$. وصخر البوكسيت هو عبارة عن خامة أكسيد الألمنيوم المائية تحتوي على الأوكسجين، ولذلك يلزم التخلص من الأوكسجين حتى نحصل على الألمنيوم بصورة نقية، وإن أفضل الطرق لفصل الأكسجين عن الألمنيوم هو ما يسمى بعملية التحليل الكهربائي والتي تعتمد على طريقة إمرار تيار كهربائي خلال مصهور فلز البوكسيت ويتم أولاً إزالة الرمل والصخور من خامة الألمنيوم ونحصل عندها على مسحوق أبيض يسمى أكسيد الألمنيوم الذي يتكون من ذرات الألمنيوم متحدة مع ذرات الأكسجين ويذاب المسحوق في حوض يحتوي على مواد كيميائية ويسخن لدرجة حرارة 950 °C عندئذ ينصهر أكسيد الألمنيوم ويتحول إلى مصهور. الشكل (4-1).

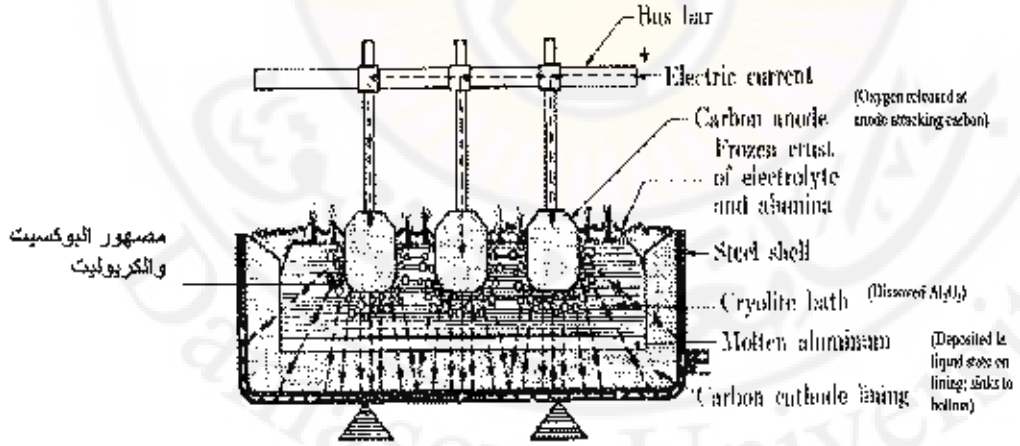
يتم الحصول على الألمنيوم من الألومينا بطريقة تحليل أكسيد الألمنيوم كهربائيا في حوض الصهر من مصهور الكريوليت والبوكسيت. ومن خواص الكريوليت قدرته على إذابة الألومينا وهو بالإضافة إلى ذلك يخفض درجة انصهارها والتي تقدر بنحو 2000 °C، ويتكون حوض الصهر من غلاف حديدي مبطن ببطانة عازلة للحرارة وقاع حوض الصهر وجدرانه تغطى

بطبقة من الكربون. توصل المهابط الإطارية المدفونة في القاع بالقطب السالب لمصدر التيار، أما إطار المصعد فتوصل به الأقطاب الكربونية المدلاة في حوض الصهر. وقبل البدء بالتحليل الكهربائي تنثر على قاع الحوض طبقة رقيقة من الكوك المفتت ثم تنزل الأقطاب حتى تتلامس معها وبوصل التيار، وعندما تسخن الطبقة الكربونية إلى درجة الاحمرار يدخل الكريوليت الذي يحافظ على درجة حرارة المحلول من 950 °C – 1000. ومع تحلل الألومينا يتجمع الألمونيوم المختزل على قاع حوض الصهر وتضاف الألومينا لتعويض التحلل. إذاً يمر التيار الكهربائي خلال السائل المنصهر حيث يدخل من أحد القضيبين ويخرج عن طريق الكربون المبطن للصهريج. عندما يحدث ذلك فإن التيار يفكك أكسيد الألمنيوم المنصهر إلى عنصر الألمنيوم وعنصر الأكسجين ويهبط فلز الألمنيوم المنصهر إلى قاع الخزان بينما تتصاعد فقاقيع غاز الأكسجين حول قضبان الكربون الموجبة. بعد ذلك يسحب الألمنيوم المنصهر النقي إلى بوتقة ثم يصب في قوالب ويترك ليبرد. يتصلب الألمنيوم البارد إلى كتل تعرف باسم تماسيح الألمنيوم.

يستخلص الألمنيوم النقي أيضاً من خام البوكسيت (Bauxite) بطريقة اختزال أكسيد الألمنيوم بواسطة الصوديوم كما هو موضح:

$$6Na + Al_2O_3 \rightarrow 2Al + 3Na_2O$$

ولكن هذه الطريقة غير مرغوب بها نظراً لارتفاع تكاليف الصوديوم وخطورة استخدامه.



الشكل (4-1): رسم تخطيطي لعملية استخلاص الألمنيوم بطريقة التحليل الكهربائي.

أو باستخدام الطريقة القلوية وفيها يعامل الخام الذي يحتوي على كمية صغيرة من السيلكا بالمواد القلوية لتحويل هيدروكسيد الألمنيوم إلى ألومينات الصوديوم حيث يتم استخلاص الألمنيوم النقي من خام البوكسيت (Bauxite) الذي هو عبارة عن أكسيد الألمنيوم المختلط مع شوائب أخرى. حيث يتم الاستخلاص بطريقة صناعة تسمى طريقة باير (Bayer) تعتمد على مبدأ خلط البوكسيت مع الصودا الكاوية بتأثير ضغط وحرارة كبيرين، وينتج هذا الخلط مادة شبيهه ببلورات السكر وهي عبارة عن أكسيد الألمنيوم النقي. ثم تضاف الكريولايت (Cryolit) وتتركب من فلوريد الصوديوم وفلوريد الألمنيوم لخفض درجة الانصهار. أخيرا يستخدم التحليل الكهربائي لفصل الألمنيوم عن الأكسجين للحصول على الألمنيوم النقي، كما هو موضح:

$$2AL(OH)3+ 2NaOH \rightarrow AL_2O_3Na_2O + 4H_2O$$

حيث يتحلل المحلول بواسطة التحليل الكهربائي فينفصل منه راسب صلب من هيدروكسيد الألمنيوم:

$$AL_2O_3Na_2O + 4H_2O \rightarrow 2AL(OH)3+ 2NaOH$$

ويرسل الراسب المرشح المغسول إلى الفرن حيث يتحول عند درجة 1300 °C إلى أكسيد الألمنيوم غير المائي.

الألمنيوم النقي معدن نقي، لين ذو خواص ميكانيكية منخفضة حيث مقاومة الشد ($\sigma t = 80$ N/mm^2)، الاستطالة (30 %)، أما الصلادة (23 HB)، درجة انصهاره (658°C).

4-2-4: سبائك الألمنيوم:

يستعمل الألمنيوم في الصناعة بشكلين، إما بشكل ألمنيوم نقي أو بشكل خلائط ألمنيوم، ويمكن القول إن أكثر من نصف إنتاج العالم من الألمنيوم يستعمل في صناعة الخلائط التي تصنف تجارياً إلى خلائط طرية ونصف قاسية وقاسية. ويتصف الألمنيوم ببعض الخواص الجيدة مثل ناقليته للحرارة والكهرباء ومقاومته للتأكسد وقابليته للحام، إلا أن خواصه الميكانيكية الرديئة تجعل استخداماته محدودة وتوجب استخدام بعض خلائطه عوضاً عنه، ويمكن التحكم بخواص الألمنيوم بإضافة عناصر خلائطية عليه ضمن حدود واسعة مما يجعل خلائط الألمنيوم المستعملة في الوقت الحاضر يزيد عن عشرة آلاف خليطة غير أنه ليس من الصعب أخذ فكرة

عن كل هذه الخلائط إذا علمنا أن العناصر الأساسية التي تدخل في خلائط الألمنيوم لا تزيد عن أربعة عناصر وما ذلك العدد الهائل من الخلائط إلا خلائط ثنائية أو أكثر للألمنيوم مع هذه العناصر بنسب متفاوتة مع إضافة بعض العناصر الإضافية الأخرى.

سبائك الألمنيوم هي سبائك من الألمنيوم، في أغلب الأحيان مع النحاس، خارصين، منغنيز، سيليكون، أو مغنيسيوم. جدول (4-1) يبين بعض التراكيب الكيميائية لهذه السبائك. هذه السبائك أخف بكثير ولها مقاومة تآكل أعلى من الفولاذ منخفض الكربون. لكنها ليست كمقاومة تآكل الألمنيوم الصافي. إن سطح سبائك الألمنيوم النقية براقة في البيئة الجافة بسب حماية طبقة من الأكسيد للسطح. إن التآكل الكهربائي يمكن أن يكون سريعا عندما تكون سبيكة الألمنيوم متصلة كهربائيا بالحديد مقاوم الصدأ أو معادن أخرى مع إمكانية تآكل أكثر في البيئة الرطبة. تراكيب سبائك الألمنيوم مسجلة بجمعية الألمنيوم. والعديد من المنظمات تنشر معايير أكثر تحديداً لصناعة سبائك الألمنيوم. سبائك الألمنيوم هذه تمتلك مدى واسعاً من الخواص والصفات وهذا ما جعلها مستخدمة في التراكيب الهندسية. إن السبائك مصنفة بواسطة نظام من الأرقام يدعى هذا النظام (ANSI) أو بواسطة الأسماء المحتوية على العناصر الأساسية لمكونات السبيكة وهذا يعرف بـ (DIN, ISO). لاختيار السبيكة الصحيحة لتطبيق معين يجب الأخذ بنظر الاعتبار المطلبية، قابلية التشكيل، قابلية اللحام، مقاومة التآكل. كما أن اعتبارات المرونة تعتبر أمراً في غاية الأهمية فالاستعمال غير الصحيح للألمنيوم قد يؤدي إلى حدوث المشاكل، خصوصا بالمقارنة مع الحديد أو الفولاذ، اللذين يظهران "تصرفاً أحسن" بالنسبة للمصمم الحدسي، ميكانيكي أو تقني. إن تخفيض ثلثي الوزن للألمنيوم مقارنة بالحجم نفسه من الحديد أو الفولاذ يعتبر هذا حافزاً قوياً لجذب المصممين لاستخدام الألمنيوم، لكن يجب الملاحظة بأن استخدام الألمنيوم سوف يؤدي إلى التخلي عن ثلثي الصلابة بالجزء. لذا يعتبر البديل المباشر للحديد أو الفولاذ بسب أنه يعطي مقاومة مقبولة للأحمال البالغة الذروة.

إن الزيادة في المرونة سوف تودي إلى زيادة نسبة الانحراف في الجزء ثلاث مرات أكثر. حيث إن الانهيار ليس القضية ولكن الثني المفرط غير مرغوب بسب متطلبات دقة الموقع والتوصيلية الكهربائية للجزء. مثال على ذلك عند استبدال الأنابيب الفولاذية بأنابيب من الألمنيوم بالحجم نفسه سوف تبدي أنابيب الألمنيوم مرونة غير مرغوب بها. على سبيل المثال، زيادة المرونة في التشغيل تحت الأحمال الناجمة عن استبدال أنابيب الفولاذ لإطار دراجة بأنابيب ألمنيوم مطابقة للأبعاد سيتسبب باختلاف في التسليط للوزن بالإضافة إلى امتصاص قوة التشغيل. لزيادة

الصلابة عن طريق زيادة سمك الجدران للأنابيب سيؤدي إلى زيادة الوزن بشكل متناسب، وهذا سوف يؤدي إلى انعدام مزية الوزن الخفيف مع الحصول على الصلابة المطلوبة. في مثل هذه الحالات، الألمنيوم قد يكون أفضل إذا ما تم إعادة التصميم للجزء (من حيث الأبعاد) ليناسب الخصائص المطلوبة. على سبيل المثال نعيد تصميم إطار الدراجة ونجعله ذا قطر أكبر وليس باستخدام أنابيب أسمك. بهذه الطريقة سوف نحصل على صلابة معقولة بدون زيادة في الوزن كبيرة. إن الحد لهذا الإجراء هو الزيادة في حدوث الإنهيار . ضمن أمور أخرى تعتبر أحدث نماذج مثل سيارات السباق التي تعتبر مثالاً جيداً على إعادة تصميم الأجزاء لتحقيق أفضل استفادة من مزايا الألمنيوم.

أما من حيث قابليته للسكب: فالفارق بين سبائك الألمنيوم المطاوعة وسبائك الصب هو قابلية السبك، وتعني بشكل عام القدرة على ملء القالب والتفاصيل الدقيقة فيه بالفلز المنصهر ، وهذا بدوره يعتمد على سيولة السبيكة المنصهرة فكلما زادت السيولة زادت قابلية السكب ومن معايير قابلية السكب أيضا قلة العيوب الداخلية والسطحية وانخفاض نسبة الانكماش عند التجمد.

يرمز لسبائك مسبوكات الألمنيوم وفقا لجمعية الألمنيوم بأربعة أرقام، يفصل بين الثالث منها والرابع فاصلة، وتدل هذه الأرقام على: الرقم الأول يشير إلى العنصر السبائكي الرئيسي، الرقمان الثاني والثالث هما رقم السبيكة وليس لهما أي دلالة عددية، الرقم الرابع يمكن أن يكون صفراً في حالة المسبوكات و 1 أو 2 في حالة الصبات.

جدول (4-1): يبين بعض التراكيب الكيميائية لسبائك الألمنيوم.

السبيكة	طريقة السباكة	نحاس	مغنسيوم	متجنيز	سيليكون	أخرى
206.0	رملية و دائمة	4.6	0.25	0.35	0.1	تيتانيوم و 0.15 حديد 0.22
319.0	رملية و دائمة	3.5	----	----	6	
A356.0	رملية و دائمة	0.2	0.35	0.1	7	خارصين و 0.2 حديد 0.1
A380.0	إسطمبات	3.5	8.5	----	----	حديد1.3
390.0	إسطمبات	4.5	0.6	----	17	خارصين1.3
A413.0	إسطمبات	----	----	----	12	حديد1.3
535.0	رملية	----	6.8	0.18	----	تيتانيوم0.18

أما التغييرات الطفيفة في التركيب الكيميائي التي لا تستدعي تغيير رقم السبيكة فيعبر عنها باستخدام حروف مثل A و B و D و C وغيرها تسبق رمز السبيكة. وتنقسم سبائك الصب تبعا للعنصر السبائكي الرئيسي إلى:

- XX.X1 ألمنيوم نقي (99,00% أو أكثر)
- XX.X2 سبائك ألمنيوم- نحاس
- XX.X3 سبائك ألمنيوم- سيليكون بالإضافة للنحاس و / أو المغنسيوم
- XX.X4 سبائك ألمنيوم- سيليكون
- XX.X5 سبائك ألمنيوم- مغنسيوم
- XX.X7 سبائك ألمنيوم- خارصين
- XX.X8 سبائك ألمنيوم- قصدير
- XX.X9 سبائك ألمنيوم مع إضافات أخرى غير السابقة
- XX.X6 هذه الرموز غير مستخدمة
- Duralumin (النحاس والألمنيوم)
- Magnox (الماغنسيوم والألمنيوم)
- Silumin (الألمنيوم، والسيليكون)
- سبائك الفضائية الجوية المشتركة: هذه هي سبائك الألمنيوم التي لها تاريخ طويل من استخدام الطائرات في الفضاء الجوي وغيرها من الهياكل تأخذ التسميات: الألمنيوم 7075، الألمنيوم 6061، الألمنيوم 6063، الألمنيوم 2024، الألمنيوم 5052.

يعدّ الألمنيوم وسبائكه معادن سريعة الأكسدة وامتصاص الغازات، لذا يجب صهرها بسرعة وبدون زيادة كبيرة في درجة الحرارة فوق درجة حرارة الانصهار. يجب أن يتم صهر السبيكة في جو حيادي أو مؤكسد ضعيف. تتشكل على سطح المصهور قشرة رقيقة من الأكاسيد تحمي حوض المصهور من أكسدة أخرى، وعادة تستخدم بعض الأملاح كخليطه لحماية المعدن من الأكسدة من الهواء أو بخار الماء في الجو.

وبشكل عام تصنف العناصر التي تدخل في سباكة الألمنيوم إلى ثلاث فئات:

1-عناصر رئيسية: تؤثر بشكل كبير في تحسين خواص الألمنيوم الميكانيكية وتستعمل على نطاق واسع في سبائكه وهي: النحاس، التوتياء، السيليكون، المغنزيوم.

2- عناصر ثانوية: استعمالها أقل من سابقتها مثل: النيكل والكروم والمنغنيز والكوبالت وهذه العناصر تأثيرها أقل من سابقتها على الخواص الميكانيكية. أما الحديد فيعد عنصراً ضاراً وغير مرغوب فيه في سبائك الألمنيوم.

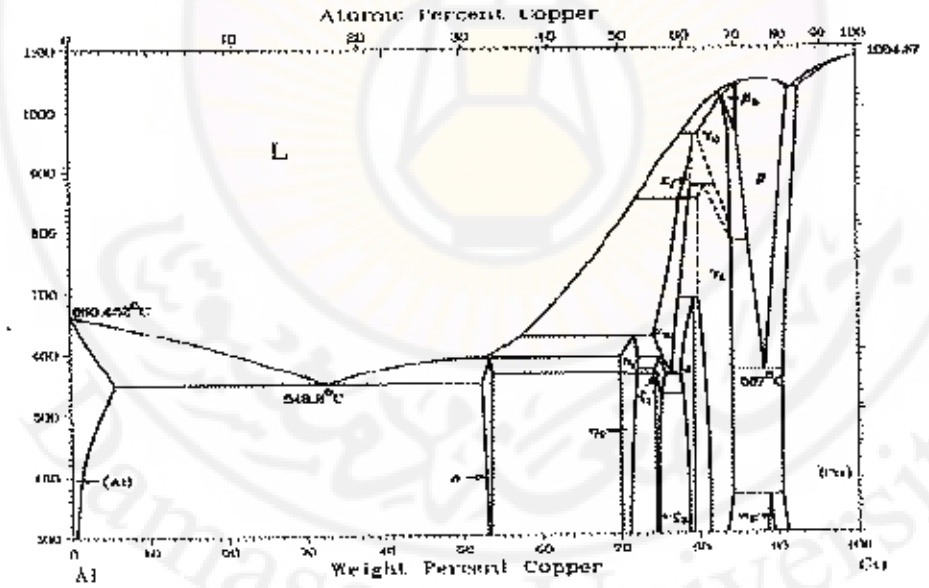
3- عناصر تحسين النوعية: تضاف بكميات ضئيلة لتحسين خواص الألمنيوم وهي: التيتانيوم، الصوديوم وغيرها.

إن أهم خلائط الألمنيوم الثنائية والمستعملة على نطاق واسع بالمجال الصناعي هي:

1- سبائك الألمنيوم - نحاس:

يؤثر إضافة النحاس على الخواص الميكانيكية لهذه الخلائط، وأفضل سبائك الألمنيوم – نحاس صناعيا من حيث خواصها الميكانيكية الجيدة هي السبيكة المحتوية على نسبة 8% نحاس. إن إضافة النحاس حتى نسبة 14% يؤدي إلى تزايد مقاومته للشد، مع تناقص بالمطيلية أما إذا زادت نسبة النحاس عن هذه النسبة فإن السبيكة تصبح هشة غير مرغوب فيها صناعياً.

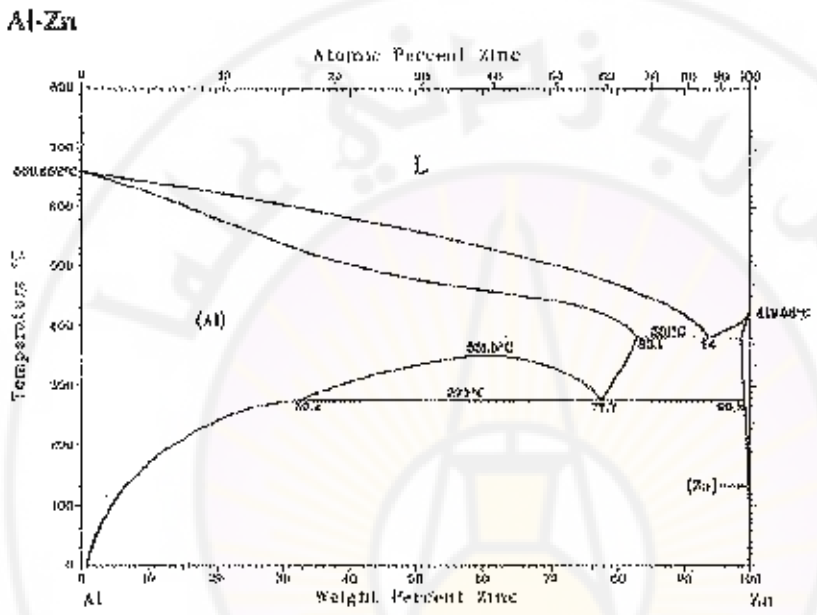
الخليطة المحتوية 4% نحاس عادة يضاف إليها 2.5%Si بهدف تحسين قابليتها للسباكة. أما إضافة 0.5% Mg للخليطة يزيد قساوتها ومقاومتها للشد ويحسن من مقاومتها للحرارة والتآكل الكيميائي. الشكل (2-4) يبين منحني الاتزان الحراري لخليطة Al -- Cu.



الشكل (2-4): منحني الاتزان الحراري لخليطة Al – Cu.

2- سبائك الألمنيوم - توتياء:

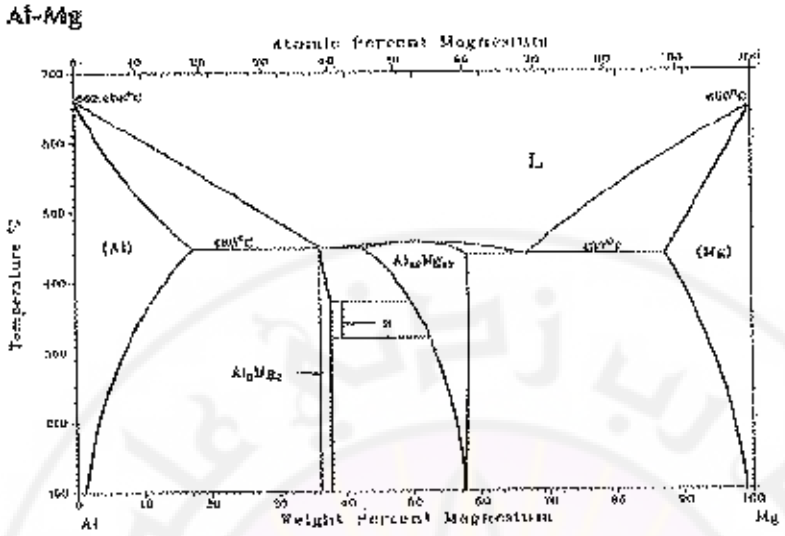
تمتاز بخواصها الميكانيكية الجيدة، وأحسن سبائك هذه المجموعة وأقدمها استعمالاً هي الخليطة المحتوية على 12% توتياء و3% نحاس والتي تمتاز بمقاومتها الجيدة للتأكسد وقابليتها الجيدة للسباكة. الشكل (4-3) منحني الاتزان الحراري لخليطة Zn – Cu.



الشكل (4-3): منحني الاتزان الحراري لخليطة Zn – Cu.

3- سبائك الألمنيوم - مغنزيوم:

يذوب المغنزيوم في الألمنيوم مكونا محلولاً صلباً وتبلغ قابلية الذوبان قمتها في الدرجة 450 °C حيث تبلغ 17.5 %. إن خليطة الألمنيوم – مغنزيوم قابلة للتأكسد ورديئة القابلية للسكب عند هذه النسبة ولكن يمكن تحسين مقاومتها للتأكسد بحقم زيادة نسبة المغنزيوم عن 5% بالخليطة مع إضافة بعض العناصر التطعيمية الأخرى عدا المنغنيز ولكن بنسب أقل. الشكل (4-4) منحني الاتزان الحراري لخليطة Mg – Cu.



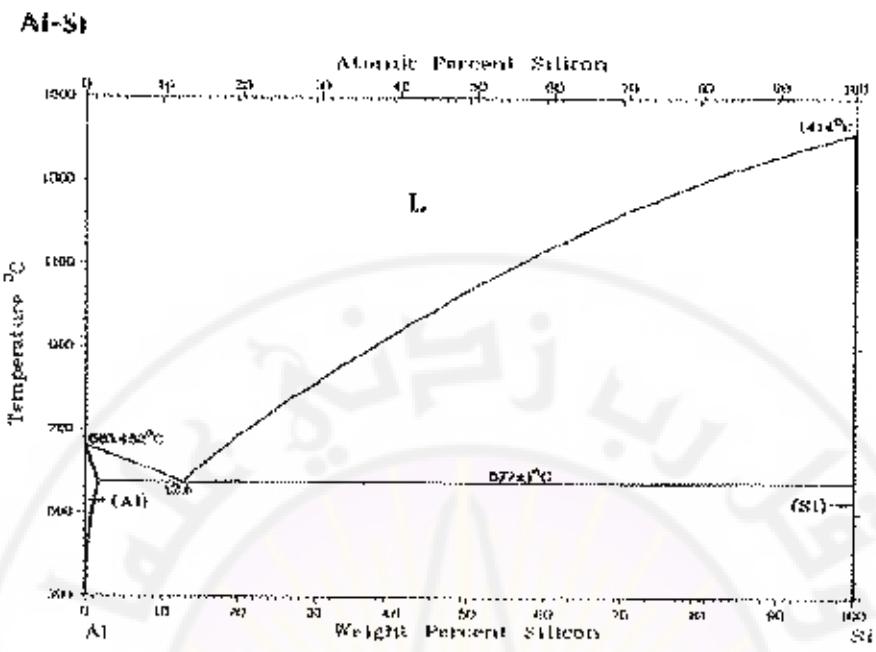
الشكل (4-4): منحني الاتزان الحراري لخليطة Mg – Cu.

4- سبائك الألمنيوم – سيليكون:

إن إضافة السيليكون إلى الألمنيوم يزيد من قابلية الألمنيوم للسكب حيث يحسن من سيولة الخليطة المراد سكبها، وعادة يستعمل السيليكون بنسبة مزج 9-14% حيث تكون درجة الانصهار أخفض ما أمكن عند النقطة اليوتكتيكية (حوالي Si 12%) ولكن البنية عادة تكون خشنة لذا يتم تحسين هذه البنية ببعض الإضافات السبائكية أثناء السكب.

تسمى سبيكة الألمنيوم – سيلكون بالسيلومين وتعد السبيكة ذات التركيب الكيميائي Si 10% مع نسبة 0.5% من المغنزيوم من السبائك الجيدة من حيث الخواص الميكانيكية، والسبائك ذات التركيب فوق اليوتكتيكي تحتوي على نسبة من السيلكون حتى 30% وتستخدم بصورة خاصة لصنع مكابس المحركات الانفجارية حيث تتمتع بعوامل مقاومة حرارية جيدة. الشكل (4-5) منحني الاتزان الحراري لخليطة Si – Cu.

إن استعمالات الخلائط السابقة كثيرة ومتنوعة في قطع الأجهزة الفنية وقطع الآلات والسفن والصناعات الخاصة كالأسلحة والطائرات وسفن الفضاء وغيرها.



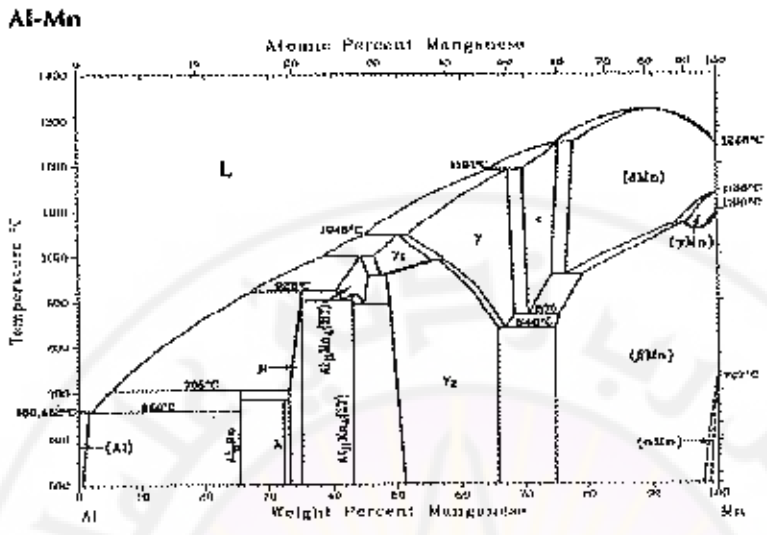
الشكل (4-5): منحني الاتزان الحراري لخليطة Si – Cu.

5- سبائك الألمنيوم - منغنيز:

تمتاز بمقاومتها الجيدة للأكسدة وقابليتها للحام والتشكيل. وأكثر خلائط هذه المجموعة استعمالا هي الخليطة المحتوية Mn%(1-1.5) وأهم العناصر غير المرغوب بوجودها في هذه الخليطة النحاس والحديد والسيليكون وذلك لأنها تسيء إلى خواصها الميكانيكية وتنقص من قابليتها للتشكيل. الشكل (4–6) منحني الاتزان الحراري لخليطة Mn – Cu.

6- خلائط الديورالومين Duralumin:

تستعمل هذه السبائك في صناعة هياكل ومحركات الطائرات، وفي صناعة هياكل الصواريخ والسيارات حيث تتميز هذه الخلائط بمتانتها وخفة وزنها وبتحملها لدرجات الحرارة المرتفعة. والديورالومين هي عبارة عن خلائط ثلاثية مكونة من الألمنيوم والنحاس %(3.5 - 5) والمغنزيوم %(0.3-1.5)، مع نسب ضئيلة من عناصر أخرى. تمتاز هذه السبائك بخواص ميكانيكية جيدة ومقاومة للتأكسد.



الشكل (4-6): منحني الاتزان الحراري لخليطة Mn – Cu.

تصنف هذه الخلائط بحسب نسبة العناصر السبائكية فيها إلى ثلاث مجموعات: منخفضة نسبة العناصر السبائكية، متوسطة ومرتفعة. ولكل نوع من هذه الخلائط استخداماتها وذلك حسب ظروف العمل المطلوبة منها. مع العلم أن درجات الحرارة التي تتحملها الخليطة تزداد كلما زادت العناصر السبائكية. والعناصر غير المرغوبة، في هذه الخلائط هي الحديد والسليكون حيث ينقصان الخواص الميكانيكية ومقاومة التأكسد بشكل ملحوظ لذا لا يجب أن تزيد نسبة كل منها عن 0.5%.

4-3: الرصاص وسبائكه:

4-3-1: تمهيد:

هناك اعتقاد قوي لدى مؤرخي علم الفلزات أن الرصاص كان من بين أوائل الفلزات التي اختزلت من أكاسيدها منذ آلاف السنين. ويؤكد هذا الاعتقاد السهولة الكبيرة في اختزال الرصاص من أكاسيده باستخدام الكربون أو أول أكسيد الكربون، ويرجح هؤلاء المؤرخون أن اختزالاً قد تم في بعض المعسكرات والتجمعات السكنية، حينما أشعل الإنسان في ذلك الحين النار للتدفئة أو

الطبخ، وتصادف وجود بعض أكاسيد الرصاص التي اختزلت عندئذ بالصدفة، وفرح الناس بذلك الجسم الصلب اللامع عالي الصلادة سهل التشكيل، وقد تم بالتجربة تحسين عمليات الاختزال للحصول على هذا العنصر بصورة أفضل وبكميات أكبر. وبهذا يمكن القول إن الرصاص كان من الفلزات التي عرفها الإنسان الأول واستخدمها، فلقد استعمله الرومان في صناعة أنابيب المياه. وأطلقت على هذا العنصر كلمة (Plumbing) وتعني هذه الكلمة الرصاص، وما زالت الكلمة نفسها مستخدمة في الوقت الراهن ومعناه (عمل الرصاص أو السمكري) أو (أنابيب المياه في المباني)، أي أن الرصاص عرف منذ القدم واستخدم حينذاك وما زال يستخدم حتى اليوم، ولقد استخدمه الصينيون في تغليف صناديق الشاي، وكذلك في صنع أدوات عمل الشاي، كما أن أول طاقة نارية (المقذوف الناري) قد صنعت من الرصاص وما زالت تعرف حتى اليوم باسم (الرصاصة). واستخدم المصريون القدماء الرصاص في طلاء وصقل وتزجيج الخزف والفخار، وقد وجد كثير من التماثيل – في الحضارات القديمة سواء المصرية أو الإغريقية أو غيرهما ويعود تاريخها إلى (3800) سنة قبل الميلاد – مصنوعة من الرصاص، وهذا بلا أدنى شك يدل دلالة قوية على استخلاص الرصاص وتشكيله واستخدامه في العصور القديمة. وساعد على استخلاص الرصاص وتشكيله قديماً كثير من العوامل نذكر منها:

1. انخفاض درجة حرارة انصهار واختزال خامات الرصاص، فيكفي لذلك درجة الحرارة المتولدة من حرق فروع وجذور الأشجار، وذلك لعدم توافر ومعرفة الأفران في ذلك الوقت.
2. سهولة اختزال خامات الرصاص، حيث يكفي لإتمام الاختزال غاز أول أكسيد الكربون الناتج من الاحتراق غير الكامل لفروع الأشجار الخضراء، ثم في عمليات الاستخلاص لاحقا التطوير الذي حدث في عمل الجمرات المغطاة ومدها بالهواء الكافي عن طريق النفخ مع استخدام الفحم النباتي بدلا من فروع الأشجار.
3. انخفاض درجة حرارة انصهار الرصاص ساعد على صهر الفلز المستخلص وصبه في الأشكال المطلوبة.
4. خواص الرصاص الميكانيكية: هو فلز طري سهل التشكيل والتشغيل دون الحاجة إلى إجهادات عالية، وقد ساعدت تلك الخواص في تشكيل الفلز في الصورة المطلوبة واستخدامه في أغراض عدة.

5. مقاومة الرصاص للتآكل جيدة، وخاصة التآكل الجوي، قد شجع ذلك الإنسان في العصور القديمة على استخدامه في صناعة التماثيل التي ما زالت موجودة حتى الوقت الراهن في بعض المتاحف العالمية.

4-3-2: استخلاص الرصاص

تعد الجالينا (galena) وهي كبريتيد الرصاص (PbS) أهم خامات الرصاص على الإطلاق من حيث النسبة المئوية الرصاص فيها، وكذلك الكمية المتوافرة منها في القشرة الأرضية، ويتطلب خام الرصاص كثيرا من المعالجة قبل إجراء عمليات الاستخلاص نظراً لانخفاض درجة حرارة انصهار الخام مع ارتفاع ضغط بخار الرصاص، والذي يعني تبخر كميات كبيرة منه عند درجات الحرارة المنخفضة، مما يزيد من فقدان هذا الفلز أثناء التسخين في عمليات الاستخلاص. ويتم تجهيز الخام للاستخلاص طبقا للخطوات الآتية:

أولا: الفصل بالتعويم (أو الطفو) Flotation: يتم في هذه العملية فصل الجالينا من الزنك بلند (كبريتيد الزنك) نظرا لاختلاط خامات الزنك والرصاص معا، ولهذا يختلط الجالينا والزنك بلند معا في معظم المناجم. وعملية الفصل التفضيلي بالتعويم ذات كفاءة عالية وناجحة إلى حد بعيد في فصل المعدنين عن بعضهما، وبالتالي زيادة تركيز الجالينا.

ثانيا: التحميص Roasting والتلبيد Sintering: يجري تسخين خام الرصاص المركز عند درجات عالية، حيث يتم الحصول على أكسيد وكبريتات الرصاص في صورة تكتلات طبقا لمعادلات التفاعل التالية:

$$2PbS + 3O_2 \rightarrow 2PbO + 2So_2$$
$$2So_2 + O_2 \rightarrow 2So_3$$
$$PbO + So_3 \rightarrow PbSo_4$$

ونواتج هذه التفاعلات هي أكسيد أو كبريتات الرصاص، وتساعد عمليتا التلبيد والتحميص كثيرا في عمليات الاختزال التالية نظرا لأنه يمكن من خلالهما:

1. التحكم وتحديد كمية الكبريت في الناتج قبل الشحن إلى أفران الصهر والاختزال.

2. نواتج التفاعل قوية وصلدة ويمنع ذلك تفتت المواد عند شحنها في الفرن، إضافة إلى مساميتها التي تزيد من المساحة السطحية، مما يساعد كثيرا في عمليات الاختزال التالية.
3. التخلص من كمية من الكبريت في المادة الخام، والكبريت الناتج من تلك العملية يتم تصنيعه بعد تجميعه لإنتاج حمض الكبريتيك أو الكبريت.

ثالثا: الصهر والاختزال: في هذه العملية تشحن نواتج التحميص والتلبيد في الفرن العالي لاختزال الرصاص. والفرن العالي لصهر الرصاص واختزاله أصغر بكثير من الفرن العالي لصهر واختزال الحديد، إضافة إلى أن تصميمه وطريقة عمله تختلف كذلك عن أفران الحديد، وتشمل الشحنة إضافة إلى خام الرصاص فحم الكوك وكمية صغيرة من خردة الحديد (يعمل الحديد كمصهر)، والكوك هو المصدر الأساسي للطاقة (الحرارة) المطلوبة لعمليات الصهر . ويتم دفع الهواء المطلوب من فتحات سفلية في الفرن، ولا يسخن الهواء المدفوع حيث إن الطاقة المتولدة في الفرن من التفاعلات الكيميائية كافية لعمليات التسخين والصهر . وتتم في البداية التفاعلات التالية:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
$$Co_2 + C \rightarrow 2Co$$
$$PbO + Co \rightarrow Pb + Co_2$$

يهبط الرصاص المختزل إلى قاع الفرن نظرا لوزنه النوعي المرتفع. وإضافة إلى التفاعلات الموضحة آنفا لاختزال الرصاص تختزل كذلك بعض الشوائب الفلزية من معادنها مثل الحديد والأنتيموان والنحاس والزرنيخ لتذوب في الرصاص الناتج.
تختزل الأكاسيد والكبريتات والكبريتيد الموجودة في الشحنة طبقاً للتفاعلات:

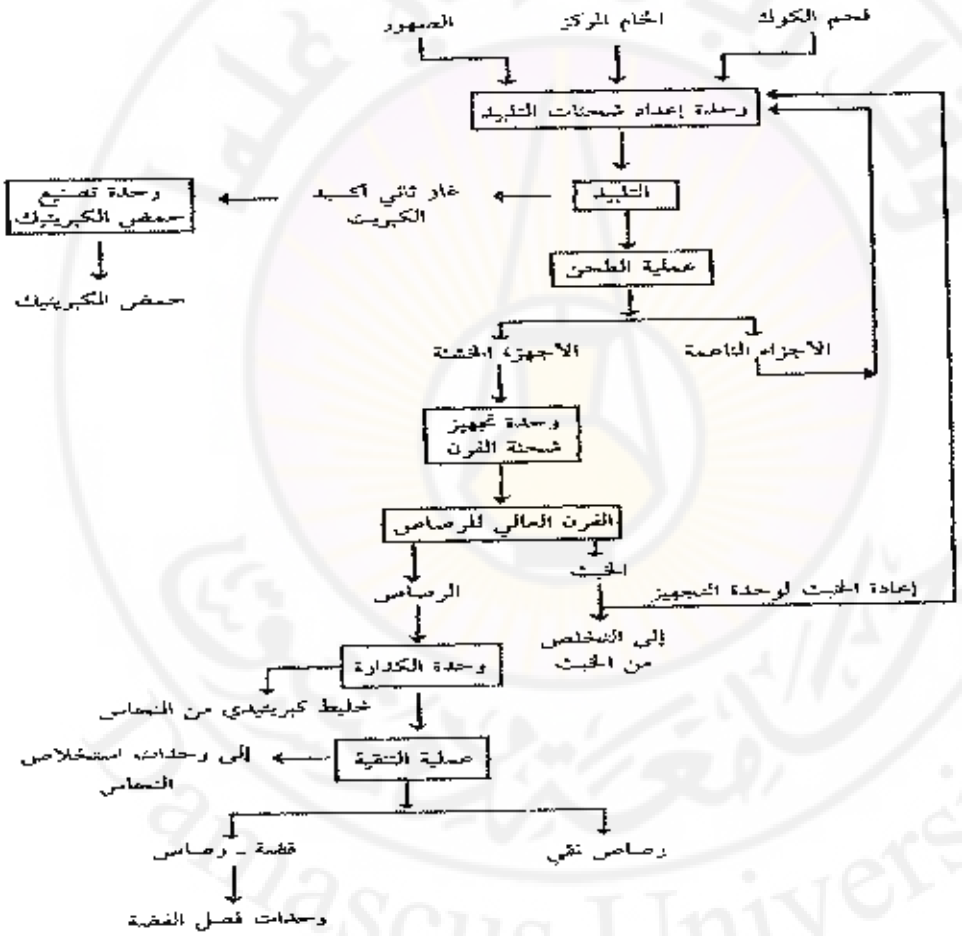
$$2PbO + PbS \rightarrow 2Pb + 2So_2$$
$$PbSo_4 + PbS \rightarrow 2Pb + 2So_2$$

ويجمع الرصاص – الذي تبلغ درجة نقاوته (98.9%) – من فتحة سيفون بالقرب من قاعدة الفرن، حيث ينقل إلى عمليات التنقية الحرارية لإزالة الشوائب. يوضح الشكل (4–7) رسماً تخطيطياً لمراحل استخلاص الرصاص من خاماته، كما يوضح الشكل (4–8) المراحل المختلفة لتنقية الرصاص والحصول على الفضة كمنتج جانبي.

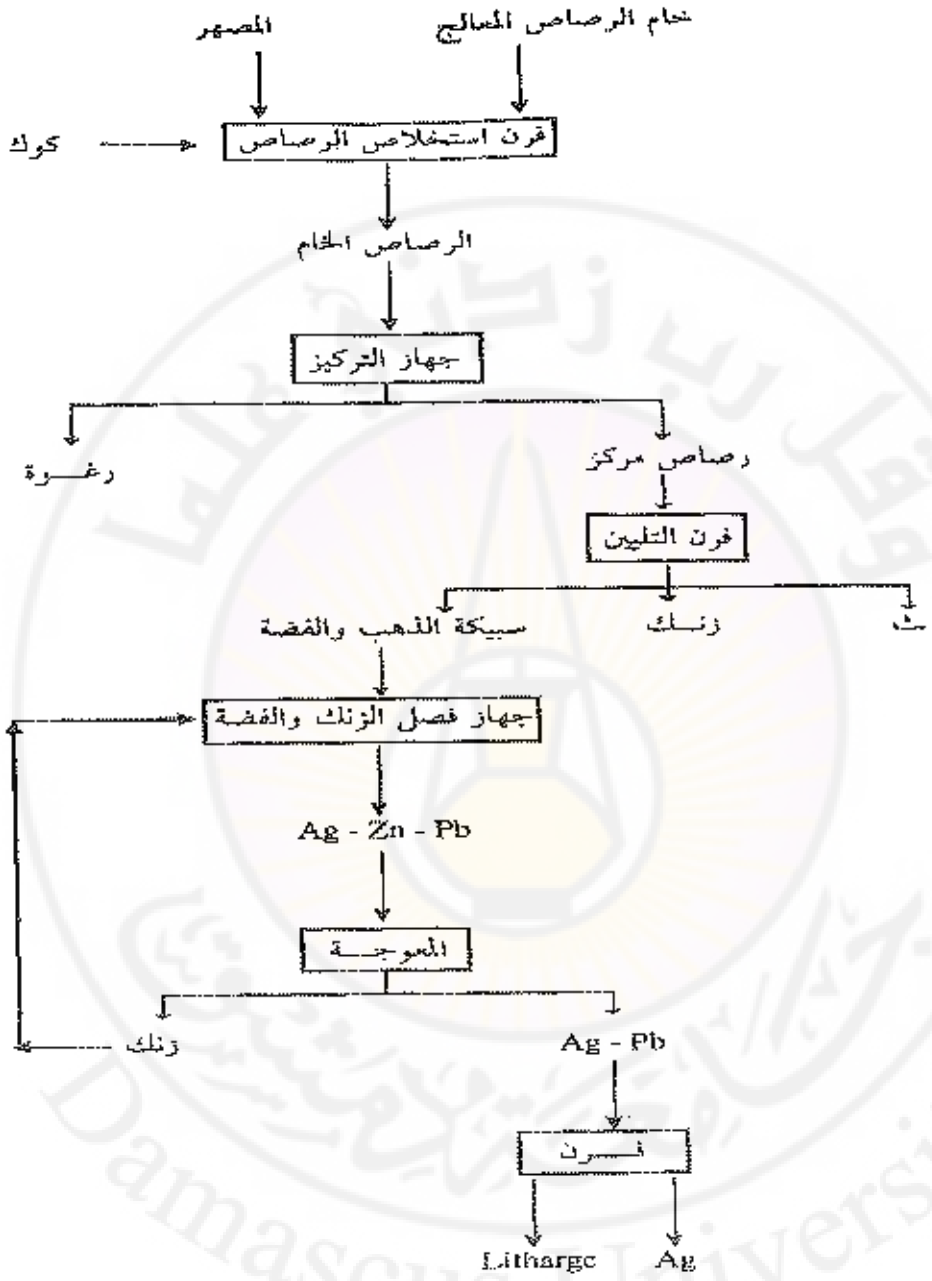
4-3-3: خواص الرصاص:

ارتبط الرصاص دائما بالسعر الرخيص، وهذا غير صحيح، لأن سعر الرصاص في واقع الأمر ضعف سعر الحديد، وحتى لو ارتفع سعر الرصاص أكثر من ذلك فسيظل من العناصر الفلزية المرغوبة، وذلك لتمتعه بالعديد من الخواص المهمة ومن هذه الخواص ما يلي:

1. ممتاز في مقاومته للاحتكاك فهو فلز زلق (lubricant metal)
2. مقاوم لأنواع التآكل المختلفة، التآكل الجوي وتآكل التربة، وتآكل أملاح الماء.



الشكل (4-7): يبين رسما تخطيطيا لمراحل استخلاص الرصاص من خاماته.



الشكل (4-8): المراحل المختلفة لتنقية الرصاص والحصول على الفضة كمنتج جانبي.

3. مقاوم لحمض الكبريتيك المخفف والمركبات الكبريتية (ولا توجد أية مادة أخرى تتمتع بالخاصية نفسها)، ولهذا فإنه يستخدم في نقل وتخزين حمض الكبريتيك المخفف.
4. طري وذو قابلية منفوقة للتشغيل على المكنات.
5. نقطة انصهاره منخفضة وفي الوقت نفسه درجة حرارة غليانه عالية.
6. رخيص الثمن مقارنة بفلزات أخرى ويساعد على ذلك إمكانية إعادة استعماله مرات عدة.
7. ذو مطيلية عالية جدا، ولهذا يسهل تشكيله بأي من الطرق الميكانيكية الاعتيادية للتشكيل.
8. يقاوم نفاذ الإشعاعات قصيرة الطول الموجي – أشعة جاما – ولذا فإنه يستخدم في الحماية من الإشعاعات الذرية والوقاية منها.
9. يسهل لحامه وتوصيله سواء مع أجزاء من نفس الفلز أو مع أجزاء من أي فلز آخر.
10. يكون العديد من السبائك المفيدة.

ولكن على الرغم من مميزات الرصاص العديدة إلا أن له عدة عيوب منها:

1. الكثافة العالية حيث تبلغ كثافته ($11.38\ g\backslash cm^3$).
2. انخفاض مقاومة الشد كثيرا مقارنة بأي فلز آخر، فهي تبلغ (14 MPa) في حين تبلغ مقاومة الألمنيوم للشد (21MPa).
3. رداءة التوصيل الكهربائي.
4. ارتفاع معامل تمدده الحراري الطولي.
5. يسهل تسييله أو تهدله تحت أحمال صغيرة نسبيا، أي أنه ضعيف جدا في مقاومته للزحف.

وبسبب نواحي القصور المذكورة يندر استخدام الرصاص كمادة إنشائية، ومن المعتقد أن استخدام الرصاص يقدر بالنسب التالية اعتمادا على خواصه: (10%) نظرا لوزنه العالي، و(30%) اعتمادا على طراوته وقابليته للتشكيل ومقاومة التآكل، و(24%) استفادة من خواص سبائكه، إضافة إلى (32%) في صورة مركبات كيميائية سواء البويات أو المبيدات الحشرية. ويبين الجدول (4–2) ملخصا لأهم الخواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية لفلز الرصاص.

جدول (4-2): بعض الخواص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية للرصاص

الخاصية	القيمة
الرمز الكيميائي	Pb
العدد الذري	82
الوزن الذري (الكتلة)	207.2 amu
نصف قطر الذرة	1.75×10(-30)m
التكافؤ	4(-),2(+),4(+)
نصف قطر الأيونات pb (4-)	2.15×10(-10)m
Pb(2+)	1.32×10(-10)m
Pb(4+)	0.84×10(-10) m
جهد التأيين pb(+)	7.38 ev
Pb(2+)	22.4 ev
Pb(4+)	98.2 ev
النظائر pb(210)	نصف العمر أقل من سنة
اللون في الضوء المنعكس	فضي
البناء البلوري	مكعب متمركز الوجه FCC
ثابت الشبكية (a)	4.04 A
اصغر مسافة بين مركز ذرتين متجاورتين	3.49 A
الكثافة	11.37×10^{3} kg/m^{3}
درجة حرارة الانصهار	600.4(deg)K(327.4(deg)C
درجة حرارة الغليان	2.028(deg)K(1.788deg)C
معامل التمدد الحراري الطولي بين (20-100) درجة مئوية	2.9×10(-6)mm/cm.deg

الحرارة النوعية عند (25) درجة منوية	0.0303 cal/g.deg
الحرارة النوعية عند (100) درجة منوية	0.03046 cal/g.deg
التوصيل الحراري بين (0-100) درجة منوية	0.81 cal/cm.deg
المقاومة الكهربائية	20.65×10(-8)ohms
الجهد القياسي pb(2+)	-0.3546 %
الصلادة على مقياس موز	1.5
حرارة الانصهار	6.26 cal/g
معامل المرونة في حالة الشد	17.9×10(4)MPa
معامل القص	5.5×10(4)MPa
نسبة بواسون	0.45

4-3-4: استخدامات الرصاص:

تستخدم أكبر كمية من الرصاص في صناعة المراكم (storage batteries)، أما التطبيق التالي لذلك فهو في صناعة أثيلات الرصاص الثلاثية المضافة إلى الجازولين كمادة مانعة للخبط (anti-knock substance)، كما تستخدم كثيراً من مركبات الرصاص في صناعة مواد الدهان جيدة النوعية وبالذات الرصاص الأحمر المستخدم في الحماية من التآكل والوقاية منه. ويستفاد من وزن الرصاص النوعي العالي في مقاومة الأوزان، كما أن كثافة الرصاص العالية وامتصاصه للأشعة تساعد في استخدامه في صناعة الدروع الواقية من أشعة كل من بيتا وجاما في المفاعلات النووية، ولكنه لا يصلح كمادة مغلفة ضد النيترونات أما رخاوة الرصاص وليونته فقد جعلت منه مادة مناسبة لصناعة الحشوات وقفل الوصلات في أنابيب حديد الزهر. ويستخدم الرصاص في تغليف الكابلات الكهربائية، نظراً لمرونته ومقاومته لتآكل التربة، وعندما يستخدم الرصاص كمادة مغلفة للأسلاك الكهربائية فإنه يعمل كذلك كمادة تزليق في عمليات السحب. ولقد استغلت مقاومة الرصاص العالية للتآكل في الأوساط المختلفة لصناعة الأجهزة والمعدات الكيميائية وفي صناعة الأسقف، وفي سباكة المواسير لنقل الماء

والكيميائيات، وإضافة الرصاص إلى الفلزات أو السبائك – كما في حالة البرونز والنحاس الأحمر والفولاذ – يحسن من قابلية تلك المواد للتشغيل بالمكنات كما يصنع من الرصاص العديد من سبائك اللحام.

4-3-5: سبائك الرصاص:

تم أثناء الحرب العالمية الأولى تطوير عدد من سبائك المحامل (bearing alloys)، التي تتميز باحتوائها على نسبة منخفضة أو قليلة من القصدير ونسب أعلى من الرصاص، وكان الدافع وراء تطوير تلك السبائك قلة كمية القصدير المتوافر وارتفاع سعره في ذلك الوقت، ولقد حافظت بعض هذه السبائك على موقعها ومركزها وأهميتها بعد انتهاء الحرب، وأصبحت مستخدمة بصفة دائمة بتركيبها نفسه. ويوضح جدول (4-3) سبائك المحامل الحاملة للرصاص. وقد أدى إزالة القصدير تماما من سبائك المحامل والاعتماد فقط على الرصاص إلى تطوير سبائك المحامل الرصاصية التي تتصلد بإضافة الفلزات الأرضية القلوية (alkaline earth metals). وعلى سبيل المثال تحتوي السبيكة الألمانية لمحامل السكك الحديدية المعروفة باسم (باهنمتال) (Bahnmetal) على (0.7%) كالسيوم، (0.6%) صوديوم، و(0.5%) ليثيوم والبقية رصاص.

وبالرغم من أن الرصاص يكون سبائك عديدة مع كثير من الفلزات الأخرى إلا أن أهم العناصر السبائكية التي تضاف إليه، هما عنصرا الأنتيموان والقصدير، كما أن عدد سبائك الرصاص ذات التطبيقات والفائدة الصناعة محدودة، ويوضح الجدول (4-4) أهم هذه السبائك وخواصها الميكانيكية وكذا استخداماتها. ولما كانت معظم سبائك الرصاص تحتوي على أي من عنصري الأنتيموان والقصدير، لهذا يكون من المفيد أن نتعرف على منحني الاتزان الحراري للرصاص– أنتيموان، والرصاص– قصدير.

جدول(3-4): سبائك المحامل منخفضة القصدير عالية الرصاص المطورة أثناء الحرب العالمية الأولى.

اسم السبيكة	التركيب الكيميائي %			
	رصاص	قصدير	أنتيمون	إضافات أخرى
سبيكة (فلز ابيض) عادية (Normal white metal)	71	5	24	- -
السبيكة الأميركية لمحامل السكك الحديدية	73.5	8	18.5	- -
سبيكة المحامل جلفور (Glievor)	76.5	8	14	1.5 Fe
سبيكة المحامل كولسوسكو	77	8	14	1.5 Cu
سبيكة المحامل تاندم (Tandam)	77.7	5.9	16.8	- -
ماجنوليا الإنجليزية (English Magnolia)	80	5	15	- -
ماجنوليا القياسية (Standard magnolia)	80	6	14	- -
سبائك المحامل كامبل [1] (Campbells1)	82	2	16	- -
سبائك المحامل كامبل[2] (Campbells 2)	83.3	8.3	8.3	- -
سبائك المحامل للأوزان الثقيلة	87	6	7	- -

ولما كانت معظم سبائك الرصاص تحتوي على أي من عنصري الأنتيمون والقصدير، لهذا يكون من المفيد أن نتعرف على منحني الاتزان الحراري للرصاص– أنتيمون، والرصاص – قصدير.

جدول(4-4): أهم السبائك وخواصها الميكانيكية

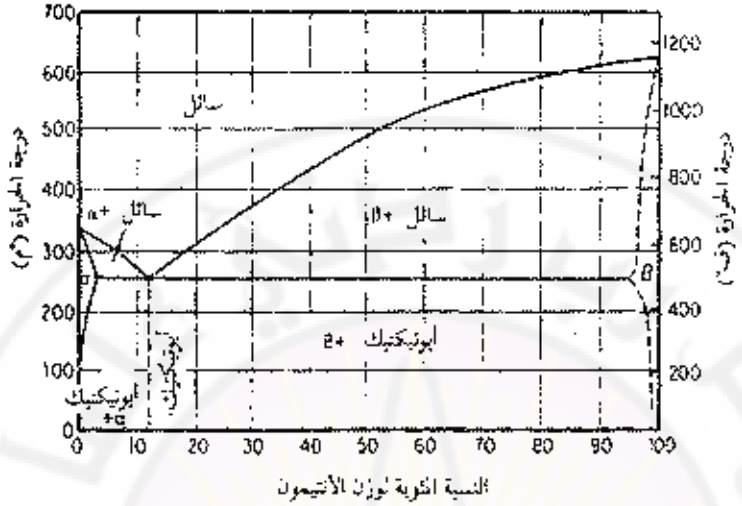
السبيكة	التركيب الكيميائي، ٪				الظروف	الخواص الميكانيكية					الاستخدام
	رصاص Pb	أنتيمون Sb	قصدير Sn	إضافات أخرى		مقاومة الشد		إجهاد الخضوع		النسبة المئوية للاستطالة	رقم برنل للصلادة
						MPa	ksi	MPa	ksi		
سبائك المحامل (بابيت)											
SAE 13	85	10	5	–	–	70	10.0		–	5	19	الأحمال الخفيفة، محامل السيارات
SAE 14	75	15	10	–	صب مبرد	74	10.5	–		4	22	الأحمال المتوسطة، المضخات، أحمال عالية، محامل
SAE15	83	15	1	1 As	–	73	10.35	–		2	20	عركات الديزل
G	83.5	12.75	0.75	3 As	–	67	9.88	–		1.5	22	المحامل عند درجات الحرارة العالية، محامل الشاحنات

السبيكة	التركيب الكيميائي ٪				الظروف	الخواص الميكانيكية					الاستخدام
	رصاص Pb	أنتيمون Sb	قصدير Sn	إضافات أخرى		مقاومة الشد		إجهاد الخضوع		النسبة المئوية للاستطالة	رقم برنل للصلادة
						MPa	ksi	MPa	ksi		
رصاص أنتيموني	99	1	–	–	سحب+تزمين	21	3.00	–		50	7	تغطية الكابلات
	91	9	–	–	صب مبرد	52	7.50	–		17	15.4	ألواح المراكم
رصاص صلب	96	4	–	–	سحب على البارد	28	4.02	–		48.3	–	الألواح المدلفنة والأنابيب المبثوقة
	94	6	–	–		29	4.10	–		47	–	
فلزات الطباعة	95	2.5	2.5	–	–	–	–	–	–		12.4	فلزات الطباعة الكهربائية
	80	14	6		–	–	–	–	–		23	Stereotype استريوتيب
	86	11	3		صب	–	–	–	–		14	Linotype لينوتيب
	78	15	7			–	–	–	–		24	Monotype مونوتيب
	61	25	–	2.0 Cu		–	–	–	–		–	Foundrytype نوع مصهر

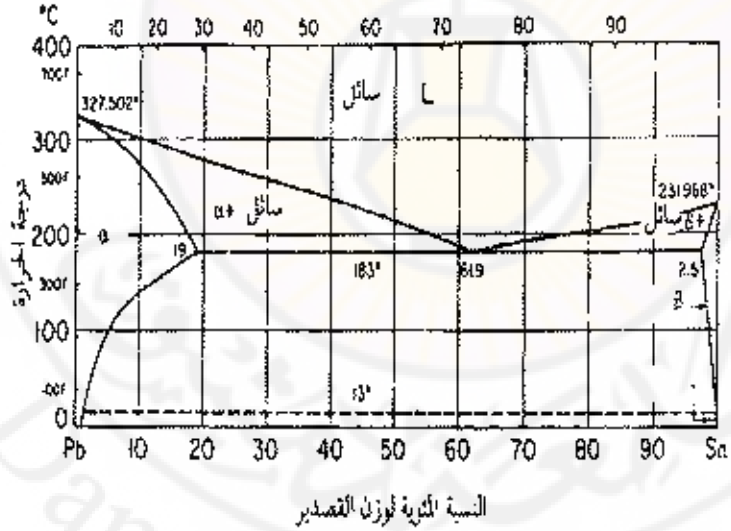
1. منحنى الاتزان الحراري للرصاص أنتيموان:

يوضح شكل (4–9) منحنى الاتزان الحراري للرصاص– أنتيمون، وهو نظام أيوتكتيكي بسيط، وتقع نقطة الأيوتكتيك عند (11.92%) أنتيمون ودرجة الحرارة (260) درجة مئوية، وإضافة الأنتيمون إلى الرصاص ترفع من درجة حرارة إعادة التبلور، كما أنها تزيد كلا من المقاومة والصلادة، وتحتوي سبائك الرصاص التجارية على نسبة من الأنتيمون تتراوح ما بين (10% –

20%). وأهم استخدامات هذه السبائك هو في صناعة ألواح المراكم ومغلفات الكابلات الكهربائية، والأنابيب المنهارة (القابلة للطي) وفي بعض الإنشاءات. الجدول(4-5) يبين خواص سبائك الرصاص- أنتيمون المصبوبة.



الشكل (4-9): منحني الاتزان الحراري للرصاص- أنتيموان.



الشكل (4-10): منحني الاتزان الحراري للرصاص – قصدير.

جدول (4-5): خواص سبائك الرصاص- أنتيمون المصبوبة

نسبة الأنتيمون %	الخواص الميكانيكية	
	مقاومة الشد Ksi	رقم برينل للصلادة
0	2.5	4.0
1	3.4	7.0
2	4.2	8.0
3	4.7	9.0
4	6.36	10.0
5	6.36	11.0
6	6.84	11.8
7	7.18	12.5
8	7.42	13.3
9	7.58	14.0
10	7.67	14.6
11	7.62	14.8
12	7.48	15.0
13	7.38	15.2
14	7	15.3

2- منحني الاتزان الحراري للرصاص- قصدير:

هذا المنحني مبين بالشكل (4-10)، وهو شبيه بمنحني الاتزان الحراري للرصاص- أنتيمون، أي أنه من نوع الأيوتكتيك البسيط مع وجود نقطة الأيوتكتيك عند (61,9%) قصدير ودرجة حرارة (183) درجة مئوية.

يبين الجدول (4-6) تأثير إضافة القصدير على خواص الرصاص الميكانيكية، حيث يزيد القصدير المضاف من مقاومة الشد وصلادة الرصاص، وأهم خاصية في سبائك الرصاص- قصدير انخفاض درجات حرارة انصهارها، ولهذا فهي تستخدم كسبائك لحام (Soldering alloys).

وبالرغم من ذلك فإن سبائك الرصاص- قصدير أقل استخداما تجاريا وصناعيا مقارنة بسبائك الرصاص- أنتيمون ويرجع ذلك إلى:

1- سبائك الرصاص- قصدير: أدنى في خواصها الميكانيكية (مقاومة الشد والصلادة) مقارنة بسبائك الرصاص- أنتيمون عند الكميات المضافة نفسها من الأنتيمون أو القصدير.

2- مقاومة سبائك الرصاص- قصدير للانضغاط والكلال أقل من نظيرتها المحتوية على نسب من القصدير تتراوح ما بين (20%-50%) قصدير.

3- خواصها عند درجات الحرارة العالية أقل بكثير من تلك المحتوية على قصدير.

4- أقل قابلية لعمليات العزل.

إن أهم السبائك المستخدمة في اللحام هي المحتوية على(40%) قصدير و (60%) رصاص أو نسبة (50%) من كلا العنصرين، مع إضافة – أو بدون إضافة- نسبة قليلة من الأنتيمون، وأشهر السبائك المستخدمة هي ما يعرف باسم "تاز ترن" (Terne Metal) والمحتوية على نسب من القصدير تتراوح ما بين 10% و 25% قصدير وتستخدم هذه السبيكة في تغطية فولاذ الأسقف (roofing) وكذلك خزانات وقود السيارات لرفع مقاومة التآكل.

جدول(4-6): الخواص الميكانيكية لبعض سبائك الرصاص- قصدير.

القصدير نسبة مئوية%	مقاومة الشد		الخواص الميكانيكية
	Mpa	Ksi	رقم برينل الصلادة
5	22.4	3.2	8.0
10	28.7	4.1	11.5
15	34.3	4.9	12.0
20	37.8	5.4	11.7
30	43.4	6.2	12.4
40	46.2	6.6	13.0
50	49.0	7.0	14.3
60	50.4	7.2	10.7

ويمكن بوجه عام تقسيم سبائك الرصاص ذات الصبغة العملية التجارية إلى أربع مجموعات اعتمادا على العناصر السبائكية المضافة وكذلك تبعا للاستخدام وهذه المجموعات : سبائك الرصاص البسيطة وسبائك اللحام وسبائك الرصاص الأنتيمونية وفلزات البابيت. وتفاصيل هذه المجموعات كالتالي:

1: سبائك الرصاص البسيطة plain lead alloys

إن سبائك الرصاص البسيطة هي أساس فلز الرصاص ذي النقاوة التجارية وفي بعض الأحيان يحتوي – علاوة على ذلك – على نسب صغيرة من الزرنيخ والقصدير والبزموث (يمكن أن تكون في صورة شوائب).

وبوجه عام تستخدم هذه السبائك في الصناعات الكيميائية، أما سبائك الرصاص المحتوية على الزرنيخ والكالسيوم فتستخدم في صناعة أغلفة وأغطية الكابلات الكهربائية.كما وتستخدم هذه المواد في صناعة البطاريات والدهانات والوصلات المجلفنة ومواد الطباعة وفلزات كرمسي التحميل وكمادة للحام أما الرصاص المتأكل فيستخدم في المراكم.

2: سبائك اللحام soldering alloys

أساس هذه المجموعة هي سبائك الرصاص – قصدير. وتستخدم هذه السبائك في توصيل أو لحام المواد المختلفة حيث تستخدم السبيكة كمادة مالئة، وتمتاز هذه السبائك بانخفاض درجات حرارة الانصهار، وإضافة إلى استخدامها في التوصيل أو اللحام يمكن أيضا استخدامها في تغطية سطوح المادة بطبقة منها (مثل تغطية الأسقف المصنوعة من الفولاذ) لمقاومة التآكل وخاصة التآكل الجوي. وإضافة إلى درجة حرارة انصهارها المنخفضة فانها تتميز كذلك بمقاومة الزيوت والحليب والأسيتون والمياه المالحة (ماء البحر) ولا تتفاعل معها وجميع سبائك هذه المجموعة مقاومة للتآكل الجوي، ولكنها تفقد لمعانها وبريقها.وتتآكل سبيكة اللحام (95%)رصاص – قصدير (5%) بمعدل صغيرعند تعرضها لكبريتات الأمونيوم أو كلوريد الصوديوم أما سبيكة (80%) رصاص – (20%) قصدير فتستخدم في تغليف ولحام الفلزات وكذلك كمادة مالئة في صناعة السيارات. وأشهر سبائك اللحام وأكثرها استخداما على الإطلاق في هذه المجموعة هما : سبيكتا (50%) رصاص – (50%) قصدير و(40%) رصاص – (60%) قصدير المستخدمتان في لحام وتوصيل الفلزات وكلتا السبيكتين تقاوم الأحماض الكربونية والفوسفورية والنيترات والكبريتات وكلوريد البوتاسيوم وكبريتات المغنسيوم ولكنهما تتآكلان وبشدة في وجود حمض النيتريك.

3: السبائك الأنتيمونية Antimonial alloys:

هذه السبائك عبارة عن خليط من الرصاص والانتيمون بالنسب الموضحة في جدول (4-7) ويمكن تقسيم هذه السبائك إلى مجموعتين هما: الرصاص الأنتيموني وفلزات الطباعة.

وتفاصيلهما كما يلي:

1 – الرصاص الأنتموني:

تتراوح نسبة الرصاص في هذه السبائك بين (91% - 99%) أما نسبة الأنتيمون فتتراوح من (9% – 1%) وتزيد صلادة ومقاومة الرصاص بزيادة الكمية المضافة من الأنتيمون، وتستخدم سبائك هذه المجموعة في تغطية الكابلات الكهربائية وتغليفها وصناعة ألواح المراكم وكذا الألواح المدلفنة والأنابيب المبثوقة.

2- فلزات الطباعة :

ربما تكون هذه السبائك غير مستخدمة كثيرا الآن بعد تطور فن وعلم الطباعة واستخدام الطرق الحديثة للطباعة التي لم تكن متوافرة في الماضي القريب من حواسيب وغيرها. ولكن ربما يكون من المفيد التعرف على تلك السبائك كقراءة للتاريخ وفلزات الطباعة هي عبارة عن سبائك من الرصاص– أنتيمون – قصدير. وقد كان أساس اختيار هذه السبائك لعمليات الطباعة هو رخص ثمن الرصاص كمادة أساسية (قاعدة) في السبيكة إضافة إلى درجة حرارة انصهاره المنخفضة التي ساعدت على سهولة السباكة والصب في أي شكل مقارنة بأي فلز آخر وتعمل إضافة الأنتيمون إلى الرصاص على زيادة صلادته، وتساعد على رفع مقاومة البلى كما أنه يخفض من درجة حرارة الانصهار ويساعد على السباكة.

أما إضافة القصدير إلى السبيكة فيزيد من درجة السيولة، ويقلل من درجة التقصف ويساعد في الحصول على حبيبات دقيقة وبوجه عام فإن هذه السبائك تتمتع بعدة خواص منها :

(أ) سهولة الصب في شكل الحروف اللازمة لعملية الطباعة.

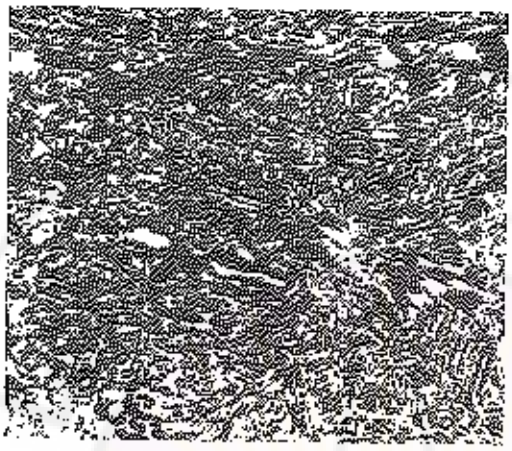
(ب) مقاومة البلى والتآكل الميكانيكي (الناتج عن الطباعة المتعددة)وهذا يناسب الاستخدامات العملية.

(ج) يمكن إعادة استعمالها بالصهر والصب عند تغير شكل الحروف نتيجة التآكل والبلى.

ويضاف في بعض الأحيان إلى هذه السبائك حوالي (2%) نحاس لزيادة الصلادة.

يفضل أن تكون درجة حرارة انصهار هذه السبائك منخفضة إضافة إلى مدى قليل من درجات حرارة التجمد، ولهذا فإن أكثر السبائك استعمالا من السبائك الثلاثية هو التركيب

الأيوتكتيكي أو أقرب نقطة إليه ويوضح شكل (4-11) التركيب المجهري لسبيكة من نوع "لينوتيب" المحتوية على (12%) أنتيمون و(4%) قصدير و (84%) رصاص وتتجمد هذه السبيكة عند درجة حرارة حوالي(256) درجة مئوية.



الشكل (4-11): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة لينوتيب المحتوية على 16% أنتموان و4 % قصدير و 84% رصاص.

4: فلزات البابيت Babbit metals:

في واقع الأمر يطلق على النوع الرابع من مجموعة سبائك الرصاص أسماء عديدة فهو معروف أولا باسم فلزات البابيت – من الناحية التجارية – نسبة إلى أول من صنع هذه السبيكة وأحيانا يطلق عليها اسم سبائك الفلز الأبيض (White metal alloys) نسبة إلى لونها الأبيض المتميز وأحيانا أخرى يطلق عليها سبائك المحامل (bearing alloys) الغنية بالرصاص نظراً لاستخدامها في كراسي التحميل (أطقم الارتكاز) وأساس هذه السبائك هو التركيب الثلاثي : الرصاص – أنتيمون – قصدير.

وأهم ما يميز هذه السبائك هو بناؤها الداخلي الذي يتكون من حبيبات صلدة في كتان طري ولين. وتنقسم هذه السبائك إلى مجموعتين طبقا لتركيبها وهما: مجموعة البابيت الخفيفة والبابيت الغنية بالقصدير. وتفاصيلهما كما يلي:

1. **مجموعة البابيت الخفيفة:** تحتوي هذه المجموعة على نسبة من الأنتيمون تتراوح بين (12%) و (18%) وتصل نسبة القصدير فيها إلى (5%) وعند تجمد هذه السبائك تترسب

أولا بلورات المحلول الجامد في السبيكة البنائية (كنان) المادة في صورتها الأيوتكتيكية من الرصاص – قصدير وتركيبها (PbSn). وتحتوي بلورات المحلول الجامد على كمية الأنتيمون نفسها الموجودة في الكنان أما القصدير فإن نسبته تكون بين (10% و 12%) والوجه الأول يكون في صورة مكعبات من (PbSn) في الكنان السبائكي المكون من الأيوتكتيك الثنائي، كما هو موضح في الشكل (4--12) وتستخدم هذه المجموعة من السبائك في صناعة المحامل المستخدمة عند السرعات الخفيفة والمتوسطة والاستعمالات البسيطة والخفيفة كما في المضخات ومحمل المقعدة (مرتكز العمود) والمراوح والمولدات الكهربائية وقواعد المعدات الميكانيكية والآلات وفي بعض الحالات غير العادية يضاف الزرنيخ إلى هذه السبائك ويمكن عندئذ استخدام سبائك البابيت في الأغراض الثقيلة كما في محركات الديزل ومحمل مقعدة عربات السكك الحديدية والشاحنات والجرارات والآلات المستخدمة في المعدات الثقيلة.

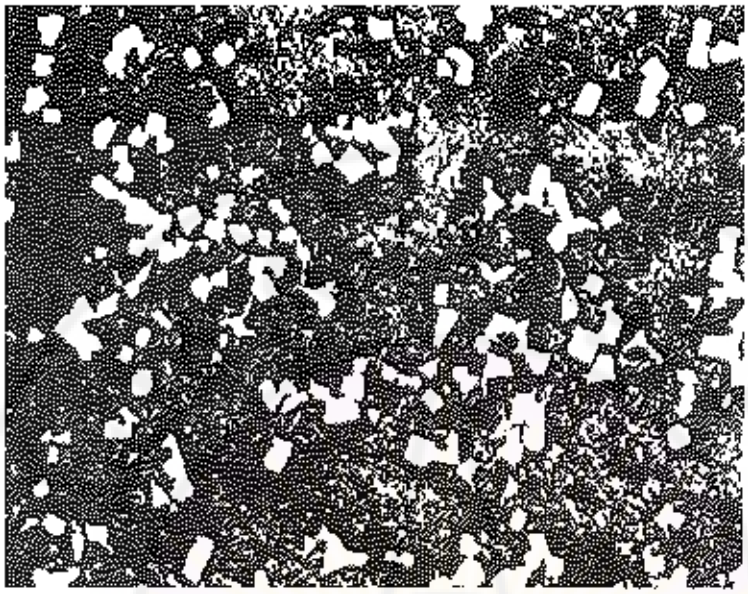
2. **مجموعة البابيت الغنية بالقصدير:** تقوم هذه المجموعة أيضا على التركيب الثلاثي: الرصاص – أنتيمون – قصدير، ولكن سبائك هذه المجموعة تحتوي على نسبة أعلى من القصدير مقارنة بمجموعة البابيت الخفيفة وتتفوق هذه المجموعة في خواصها المختلفة على خواص المجموعة السابقة على الرغم من أن لهما درجة حرارة التجمد نفسها. وأكبر مشكلة تقابل سبائك الرصاص هي ظاهرة العزل أثناء الصب حيث تطفو البلورات الغنية بالأنتيمون وكذلك البلورات الأولية من مركب القصدير الأنتيمون SbSn على السطح نظرا لانخفاض كثافتها مقارنة مع كثافة الكنان الغني بالرصاص ويمكن التحكم في ظاهرة العزل هذه بإضافة كميات صغيرة من النحاس للسبائك.

4-4: الخارصين (الزنك) وسبائكه:

4-4-1: تمهيد:

أنتجت كميات صغيرة من الزنك في مناسبات متفرقة عند صهر الرصاص واستخلاصه من خاماته، نظراً لأن معظم خامات الرصاص تحتوي أيضا على خام الزنك في صورة أكاسيد. وفي مراحل استخلاص الرصاص تختزل كذلك أكاسيد الزنك مكونة بخار الزنك، نظرا لانخفاض درجة حرارة غليانه – ويتأكسد جزء من الزنك المتبخر ويهرب الجزء الأخر من أفران الاختزال ليتجمد خارجها، وبهذه الطريقة أمكن الحصول على الزنك دون معرفته، وكانت الكميات المنتجة

بهذه الطريقة صغيرة ولا يعتد بها، ولكنها كانت كافية للدلالة على وجوده، وبهذا أمكن التعرف على خواصه.



الشكل (4-12): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة المحامل المكونة من 15% أنتمون و5% قصدير و 80% رصاص. والوجه الأبيض الواضح في الشكل هو مكعبات الوجه الأولي من المركب SnSb المترسب في بناء مخلوط ايوتكتيكي والمحلول الجامد من الرصاص والقصدير.

وقد أنتج الزنك في كل من الهند والصين وقد وجدت عملات معدنية استخدمت في الصين في الفترة من (1368) إلى (1644م) وهي سبيكة مكونة من (99%) زنك و (1%) نحاس. وهذا يدل بكل تأكيد على أن الصينيين قد أنتجوا الزنك قبل الميلاد (أو على الأقل قد عرفوه) وإضافة إلى ذلك فإن إنتاج العملات الفلزية بكميات كبيرة وبهذا التركيز يعني أنه قد تم التوسع بإنتاج الزنك والتعرف على خواصه. يصل متوسط الإنتاج السنوي الآن حوالي (505) مليون طن.

4-4-2: استخلاص الزنك:

يعد بلند الزنك أو السفاليريت وصيغته الكيميائية (ZnS) المصدر الأساسي لعنصر الزنك، كما توجد بعض المعادن الأخرى التي تعدّ مصدراً للزنك، ولكنها أقل أهمية، ومن أمثلتها أكسيد الزنك (ZnO)، والكربونات، إضافة إلى مركب كبريتيدي الزنك والحديد، أما بقية خامات الزنك الأخرى

فلا تشكل أية أهمية اقتصادية. وتوجد عدة طرق لاستخلاص الزنك من بلند الزنك، أولها الإذابة بالسوائل، أما الطريقة الثانية فهي اختزال الخام بعد تحميصه والمعروفة باسم الاختزال بالتقطير. وفيما يلي نستعرض هاتين الطريقتين:

1- الإذابة بالحمض:

يطلق أحيانا على هذه الطريقة اسم (العملية الإلكتروليتية)، واكتسبت العملية هذا الاسم من الخطوة الأخيرة فيها، حين يتم ترسيب الزنك من المحلول بالأسلوب الكهروكيميائي، وتقوم هذه العملية على المعالجة المبدئية للخام بكسره وطحنه ثم تركيزه بالتعويم، وفي عملية التعويم يتم فصل خام الزنك عن خامات العناصر الأخرى وبخاصة الرصاص والنحاس وأقصى كمية ممكنة من الحديد، ثم تجري عملية التحميص حيث يتحول كبريتيد الزنك إلى كبريتات الزنك القابلة للإذابة في الماء، ويراعى أن يكون التحميص كاملا، أي يتم تحويل كبريتيد الزنك كلية إلى كبريتات الزنك كما في المعادلتين:

$$ZnS + 2O_2 \rightarrow ZnSO_4 \qquad (1,1)$$

$$2ZnS + 3O_2 \rightarrow 2ZnO + 2SO_2 \qquad (1,2)$$

ويعتمد الناتج على درجة حرارة التحميص فبزيادة درجات الحرارة عن (750م) يتم الحصول فقط على أكسيد الزنك، ولكن عند درجات الحرارة أقل من (750°C) تنتج كبريتات الزنك، وتعتمد كمية الكبريتات الناتجة على درجة حرارة التفاعل، فبرفع درجة الحرارة تقل كمية الكبريتات الناتجة والعكس صحيح.

تذاب نواتج تفاعل (1,1) في حمض الكبريتيك، كما في شكل (4-13). ويتم في هذه الخطوة إزالة الشوائب الموجودة بإضافة أكسيد الكالسيوم، حيث تترسب الشوائب وتفصل، ثم يعاد معالجة هذه الشوائب مرة ثانية للحصول على أي قدر فيها من الزنك. ويمكن التعجيل ومساعدة الإذابة بالتقليب إما بتيار الهواء أو بالتقليب الميكانيكي أو بإضافة عامل مؤكسد مثل أكسيد المنجنيز (MnO_2).

ويفيض السائل الزائد من إناء التقليب – كبريتات الزنك ($ZnSo_4$) المحتوية على كمية صغيرة من الشوائب : نحاس، كادميوم إلى خارج الأحواض، ويمكن التخلص من الشوائب بإضافة مسحوق الزنك، حيث تترسب هذه الشوائب في قاع الإناء وبعد الانتهاء من التقنية ينقل السائل إلى جهاز الترسيب الكهربائي، حيث يمرر التيار الكهربائي المباشر ليترسب الزنك على الكاثود

بدرجة نقاوة عالية تصل إلى (99.997%)، ويرسب الزنك في معظم الأحوال على لوح من النحاس النقي لينزع منها بعد انتهاء الترسيب، ويصهر في الأفران الكهربائية، ثم يصب على شكل كتل (ingots).

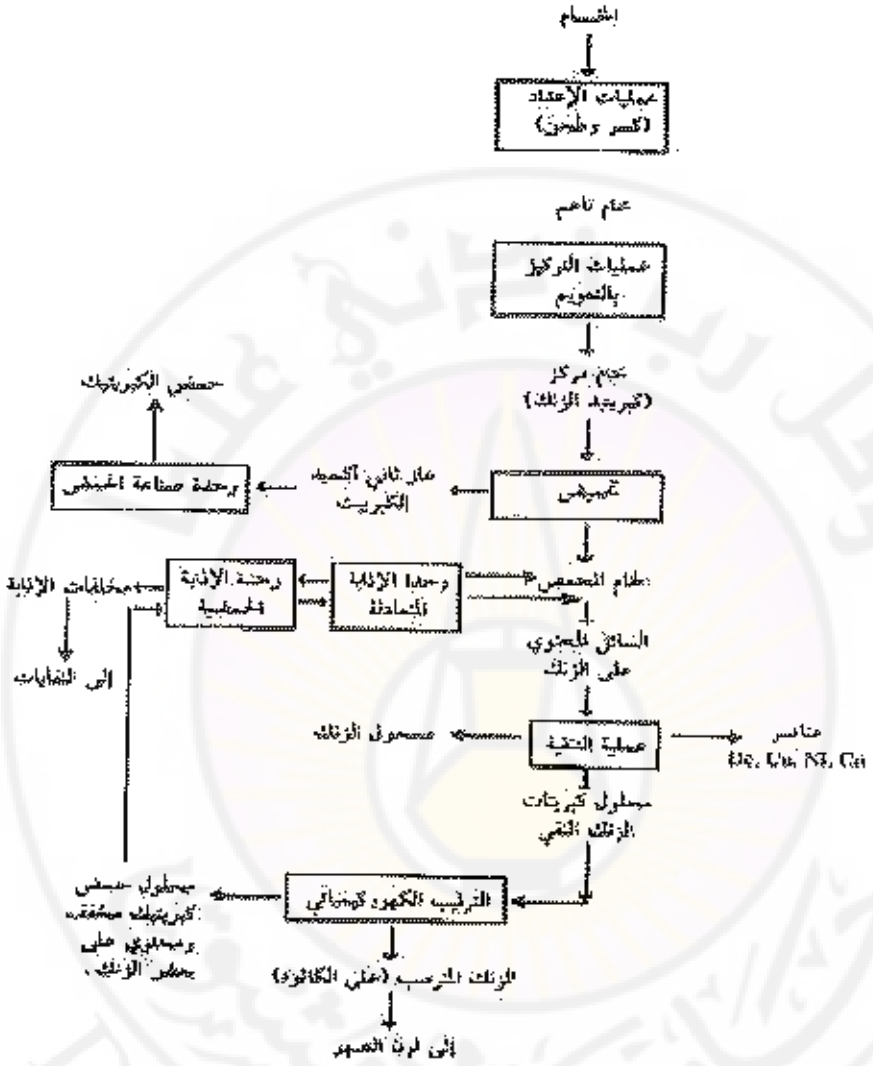
2- الاختزال بالتقطير:

لقد طورت طريقة مناسبة لاستخلاص الزنك بالاختزال وذلك باستخدام المعوجات، وفي هذه الطريقة يتم تبخير الزنك ثم يعاد تكثيفه في منطقة أخرى بمعزل عن الخام.

تتم المعالجة عند درجات حرارة عالية، ويتم خلط وشحن أكسيد الزنك الناتج من التفاعل (1,2) مع الفحم النباتي في معوجات تحت ضغط مخلخل ثم تسخن تلك المعوجات من الخارج، ويحصل الفحم على حاجته من الأكسجين للاحتراق باختزال أكسيد الزنك، ويتبخر الزنك – نظراً لانخفاض درجة حرارة غليانه – وينتقل من منطقة الاختزال إلى منطقة المكثفات حيث يتم ترسيبه، ثم يصب الزنك السائل عندئذ في قوالب، ويوضح شكل (4-14) خطوات هذه العملية.

4-4-3: خواص الزنك:

الزنك فلز لونه أبيض فضي، ولكنه يتحول بسرعة للون الأزرق، ودرجة حرارة انصهاره منخفضة فهي (419) درجة مئوية، أما درجة حرارة غليانه فهي (907) درجة مئوية، ومقاومة فلز الزنك النقي وصلادته أعلى من مقاومة كل من عنصري القصدير والرصاص، ولكنها أقل بكثير من مقاومة وصلادة النحاس والألمنيوم، ولهذا فلا يمكن استخدام الزنك في تطبيقات تتطلب مقاومة عالية للإجهادات. والزنك عادة – فيما عدا الزنك النقي – فلز قصيف وهش عند درجات الحرارة العادية، ولكنه قليل السحب والطرق والمط عند درجات حرارة في مدى من (100) إلى (150) درجة مئوية. وعند إضافة (4%) ألمنيوم إلى الزنك فإن مقاومته وصلادته تزيدان كثيرا وعلاوة على ذلك فإن إضافة الألمنيوم تزيد من قابلية الزنك للسباكة، وتصنع هذه السبائك غالبا بالصب في قوالب.



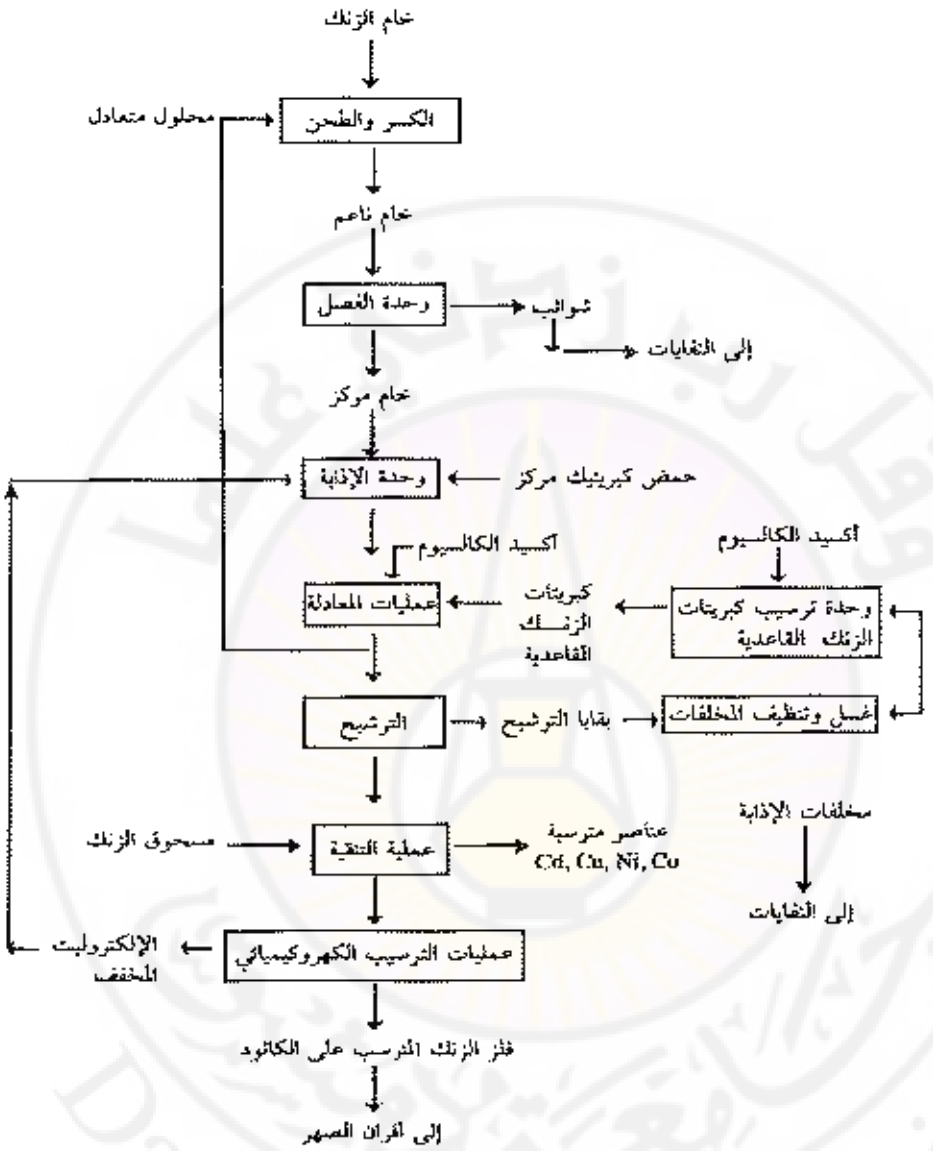
الشكل (13-4): مخطط توضيحي لطريقة استخلاص الزنك من زنك بلند بطريقة الإذابة المفردة.

يمتاز الزنك بمقاومته للتآكل الجوي، فالهواء الجاف ذو تأثير ضعيف على تآكل الزنك عند درجات الحرارة العادية، ولهذا فإن من أهم استخدامات الزنك حماية المنشآت الفولاذية من التآكل. والزنك ذو موقع متقدم في السلسلة الكهروكيميائية بعد المغنسيوم والألمنيوم، ولكنه أعلى من الكاديوم والحديد والنيكل والهيدروجين، ولهذا تغطى أسطح الفولاذ بطبقة من الزنك لتقيه من التآكل، ويتأكسد الزنك عند درجات الحرارة العالية (200) درجة مئوية بمعدل سريع، وفي وجود الهواء الرطب مع توافر ثاني أكسيد الكربون تتكون كربونات الزنك المائية التي تتماسك بقوة مع السطح وتمنع استمرار التفاعل.

إن ذرات الزنك ذات قدرة فائقة على التحرك داخل البناء الشبكي، ولذا تعاد بلورة الزنك النقي بسرعة عند درجة حرارة الغرفة بعد عملية التشكيل و بالتالي يتخلص العنصر من أية انفعالات داخلية ناتجة. لكن قدرة الزنك على مقاومة الأحمال الصغيرة – مقاومة الزحف – ضعيفة، ويعد ذلك أخطر وأكبر عيب في فلز الزنك، ويحد تماما من استخداماته في التطبيقات الهندسية كمادة للإنشاء. ولكن في السنوات الأخيرة عندما تمت إضافة كميات صغيرة من النحاس والتيتانيوم أمكن التغلب على ضعف مقاومة الزحف، وبالتالي أصبح بالإمكان استخدام الزنك كمادة إنشائية في عدد من الأغراض الهندسية والتطبيقات. ويتزايد في الوقت الراهن الإقبال على الزنك بسبب خواصه، وكذا بسبب تكوين سبائك ذات خواص جيدة.

4-4-4: استخدامات الزنك:

نظراً لانخفاض درجة حرارة انصهار الزنك نسبياً، وينعكس ذلك على خواصه الميكانيكية والفيزيائية، فهي خواص متوسطة، ولهذا لا يمكن استخدام الزنك – أو سبائكه – في التطبيقات التي تحتاج مقاومة إجهادات عالية، وعلى سبيل المثال تستخدم سبائك الزنك – ألمنيوم ذات القابلية للسباكة في توصيل المواد البلاستيكية بملء الفراغ بين هذه المواد عند توصيلها. وعلى الرغم من أن الزنك مهدد في الوقت الراهن باستبداله بعناصر أخرى، إلا أن كمية المنتج منه ما زالت في زيادة مستمرة، وسيظل إنتاجه في الازدياد لعدد قادم من السنوات، ويرجع ذلك إلى عدة مزايا يتمتع بها الزنك وسبائكه، وتشجع على استخدامه في بعض التطبيقات المختلفة. ومن هذه المزايا ما يلي :



الشكل (4-14): رسم تخطيطي لعملية استخلاص الزنك من خام كبريتيد الزنك باستخدام طريقة الإذابة المزدوجة.

1. رخص ثمن الزنك مقارنة بالمواد الفلزية الأخرى
2. سهولة تشكيل سبائكه، كما يمتاز بالمرونة المتقدمة (المتفوقة)
3. مقاومته العالية للتآكل، ولهذا يستخدم الزنك في تغطية أسطح الفولاذ لحمايتها من التآكل بفعل الهواء الجوي.
4. يكون الزنك مع عدد من العناصر الأخرى سلسلة من السبائك المختلفة، فمثلا يكون الزنك مع النحاس مجموعة من سبائك النحاس الأصفر، وسبائك النيكل- فضة، وتتراوح نسبة الزنك في هذه السبائك ما بين (15%) و (40%)، وتمتاز هذه السبائك بمدى واسع من المقاومة والمطيلية.
5. يكون الزنك على سطح المواد الأخرى، وبخاصة الفولاذ طبقات تقي الفلز من التآكل، وتعرف هذه العملية باسم التزنيك (الطلاء بالزنك)، ويوجد العديد من الطرق المتبعة في تغطية سطح الحديد بالزنك وأشهرها وأهمها الجلفنة بالغمس في فلز الزنك المنصهر، وهناك طرق أخرى، ولكنها أقل استخداما، ومنها: الجلفنة الكهروكيميائية، والرش بالزنك المنصهر، وكذا تستخدم طريقة التغليف، حيث يغطى السطح بمسحوق الزنك، ثم يجري التسخين لتنتقل ذرات الزنك إلى جسم المادة الأخرى، ومن ثم يحدث الارتباط بين الزنك والجزء المغطى.

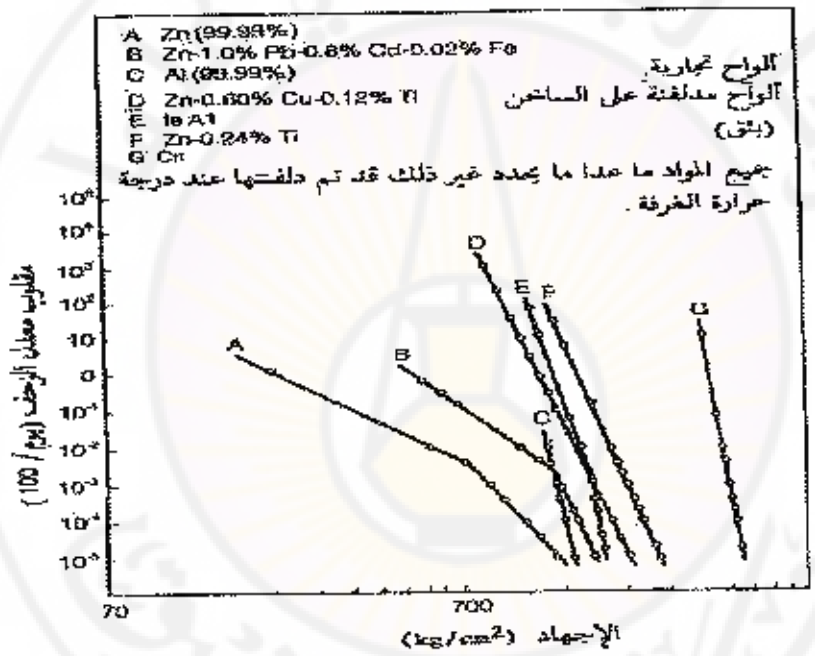
يستخدم الزنك كذلك في صنع قوالب الصب، وأشهر مادتين مستخدمتين هما : (AG 40 A) و (AG 41 A) وتركيب وخواص هذه السبائك سيأتي ذكرهما في الجزء التالي. وتستخدم هذه القوالب في صناعة السيارات، وبعض أجزاء في المنشآت المختلفة، وفي صناعة الأوعية والأدوات واللعب وأجهزة المكاتب.

4-4-5: سبائك الزنك:

إن فلز الزنك كما ذكرنا متوسط الخواص، ويعيبه ضعف مقاومته للزحف كما هو واضح في شكل (4-15)، وكذلك انخفاض درجة حرارة إعادة بلورته (حيث يتم ذلك عند درجة الحرارة العادية). ولكن تتحسن خواص الزنك كثيرا بإضافة عناصر سبائكية إليه، فمثلا إضافة النحاس

والتيتانيوم ترفع كثيرا من مقاومته للزحف، وفيما يلي نستعرض تأثير بعض عناصر السبائكية على خواص الزنك، قبل الدخول في تفاصيل سبائك هذا العنصر.

1. **الألمنيوم:** من أهم خواص عنصر الزنك عدم تكوينه محلولا جامدا مع أي عنصر آخر فيما عدا الألمنيوم الذي يكون معه محلولا جامدا ويمكن أن تصل درجة الذائبية فيه إلى (80%). ويذوب الزنك في الحالة الجامدة مع النحاس والمغنسيوم والذهب ولكن بدرجة أقل.
2. **النحاس:** ترفع إضافة النحاس درجة حرارة إعادة بلورة الزنك، وبهذا فإن هذه الإضافة تزيد من مقاومة الشد والصلادة ومقاومة الزحف لفلز الزنك، ولكنها تقلل من مقاومة الفلز للصدمات، ولا يؤثر النحاس المضاف على مقاومة الزنك للتآكل في الظروف العادية.



الشكل (4-15): علاقة مقلوب معدل الزحف بالإجهاد في حالة الزنك وسبائكه مقارنة بعنصري الألمنيوم والنحاس.

3. **التيتانيوم:** إضافة التيتانيوم إلى الزنك محدودة أو قليلة التأثير على مقاومة الشد وصلادة الزنك المدلفن، ولكنه ذو تأثير قوي جدا على مقاومة العنصر للزحف، وتساعد إضافة

التيتانيوم على تصغير حجم حبيبات الزنك المصبوب والحد من نمو الحبيبات عند درجات الحرارة العالية.

4. **الرصاص:** لا يذوب الرصاص في الزنك في حالته الجامدة، ويمكن في الزنك النقي التعرف مباشرة على أقل كمية من الرصاص – حتى أقل من (0.001%) – حيث يكون الرصاص منفصلا في صورة عقد أو كريات على حدود حبيبات الزنك. والأثر الوحيد للرصاص على الزنك أنه يخفض درجة حرارة تشكيل الزنك.

5. **الكادميوم:** الكادميوم أحد العناصر القليلة التي تكون محلولا جامدا مع الزنك، والكادميوم قليل التأثير على خواص الزنك، ولكنه يضاف أحيانا لتسهيل عملية الدلفنة، نظراً لأنه يرفع درجة حرارة إعادة البلورة، وهكذا يحسن الكادميوم من المقاومة والصلادة ومقاومة الزحف.

6. **الحديد:** تأثير الحديد على الزنك أمر معقد، وليس بسيطا كبقية العناصر الأخرى، فإذا زادت كمية الحديد في الزنك على (0.001%) فإنه يظهر بالفحص الميكروسكوبي، نظراً لتكوينه المركب الفلزي المتداخل (FeZn)، ووجود هذا المركب يتحكم في حجم حبيبات الزنك، وبالتالي مقاومة الزنك المدلفن. ولكن إذا ارتفعت نسبة الحديد إلى (0.008%) يفقد الزنك مطيليته ويتحول إلى فلز قصيف. ويؤثر الحديد كذلك على خواص الزنك الكيميائية، فمثلاً تسبب نسبة (0.0014%) من الحديد زيادة معدل تآكل الزنك وبخاصة في ماء البحر، ويمكن تقليل ذلك الأثر بإضافة (0.1%) ألمنيوم. أما إذا زادت نسبة الحديد على (0.0025%) فيزيد معدل تآكل الزنك في الأحماض.

7. **القصدير:** ذائبية القصدير في الزنك في الحالة الجامدة أقل من (0.001%) وتزيد الذائبية عند درجة الحرارة (200م)، وهي درجة حرارة الأيوتكتيك، ويترسب القصدير على حدود الحبيبات مسببا مشاكل عدة أثناء الدلفنة. ووجود القصدير في سبائك الزنك – ألومنيوم ذو تأثير سيء للغاية، وينبغي ألا تزيد نسبته بحال من الأحوال على (0.001%) لأن الزيادة تساعد على رفع معدل التآكل بين الحبيبات في الجو الرطب.

8. **المغنسيوم:** يقلل المغنسيوم من قابلية التآكل على حدود البلورات، أما إذا وصلت نسبته إلى (0.06%) فإنه يؤدي إلى ضعف مقاومة المادة للصدمات، ويقلل المطيلية، كما يسبب صعوبة التشكيل عند درجات الحرارة العالية.

إن عدد سبائك الزنك محدود، وتركيب هذه السبائك واستخداماتها موضحة في جدول (4-7). وفيما يلي نلقي الضوء على بعض هذه السبائك.

الجدول (4-7): التركيب الكيميائي لسبائك الزنك الأكثر شيوعا وأهم استخداماتها.

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)					الخواص الميكانيكية						
	زنك	نحاس	ألومنيوم	رصاص	عناصر أخرى	مقاومة الشد		مقاومة القص		النسبة المئوية للاستطالة	رقم برنل للصلادة	المخالسة
						MPa	Ksi	MPa	Ksi			
سبيكة الزنك النقي : زنك نقي	99.9 +											
السبائك المصبوبة : AG40A (ZAMAK-3)	95.96		4.0		0.04Mg	287	41.6	217	31.0	16	82	الصب في قالب
AC41A (ZAMAK-5)	94.96	1.0	4.0		0.04Mg	333	47.6	266	38.0	7.0	91	الصب في قالب
Slush alloy (١)	95.0	0.3	4.7			196	28.0					الصب المبرد
Slush alloy (٢)	94.5		5.5			175	25.0				1.0	الصب المبرد
السبائك المطروقة : السبيكة المسحوبة (0.08)	99.92			0.08		(١) 19.5	(٢) 23.0			(١) (٢) 50 65		شرائح مدلفنة على الساخن شرائح مدلفنة على البارد
المسبيكة المسحوبة (0.06)	99.88			0.06	0.06cd	21.0	25			30 52	43	مدلفنة على الساخن
						22.0	29			30 40		مدلفنة على البارد

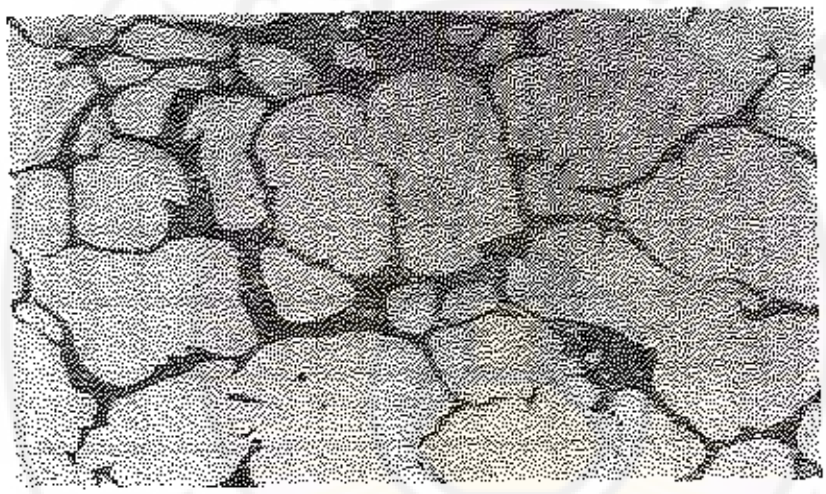
(١) الخاصية مقاسة في اتجاه موازٍ لاتجاه الدلفنة (٢) الخاصية مقاسة في اتجاه عمودي على اتجاه الدلفنة

تابع جدول (4-7)

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)					الخواص الميكانيكية					
	زنك	نحاس	ألومنيوم	رصاص	عناصر أخرى	مقاومة الشد		مقاومة القص		النسبة المئوية للاستطالة	رقم برنل للصلادة	الحالة
						MPa	Ksi	MPa	Ksi			
السبيكة المحورية (ZA-8)	99.4			0.3	0.3Cd	23	29			32 50 28 45	47	مدلفنة على الساخن مدلفنة على البارد
النحاس الصلد المشغل	99.0	1.0				24	30			35 50 25 40	52 60	مدلفنة على الساخن مدلفنة على البارد
مدلفنة الزنك	98.99	1.0			0.01Mg	29	40			10 20 18 25	61 80	مدلفنة على الساخن مدلفنة على البارد
سبيكة Zr-Cu-Zr	99.05	0.8			0.1Zr	32	42			21 38 60 64		مدلفة على الساخن مدلفنة على البارد
سبائك خاصة :												
قوالب لعب	82		13.0	5.0	0.02Zr		105		60	1.0	29	قوالب الصب
رفائق القصدير	92						87			40.0		شرائح رقائق
المعدن الأبيض	92		8.0				65			50.0	20	صب مبرد
الأواني المبوترية	91		7.0	2.0			86			40	9.5	الواح ملونة

1: سبائك الزنك – تيتانيوم – نحاس:

إن نقطة الضعف الخطيرة في الزنك – كما سبق توضيحه – هي مقاومة الفلز للزحف، ولقد تركزت الجهود في السنوات الأخيرة على دراسة كيفية التغلب على ذلك العيب في هذا العنصر، وكان التفكير منصباً على ضبط انزلاق الحبيبات بالنسبة لبعضها، وذلك بتكوين محلول جامد مع الزنك بإضافات صغيرة من بعض العناصر، وقد كان تأثير عناصر النحاس، والكروم، والكادميوم قليلاً ومحدوداً، أما تأثير التيتانيوم المضاف على مقاومة الزحف لعنصر الزنك فكان أفضل كثيراً، وهذا التأثير مبين في شكل (4–16).

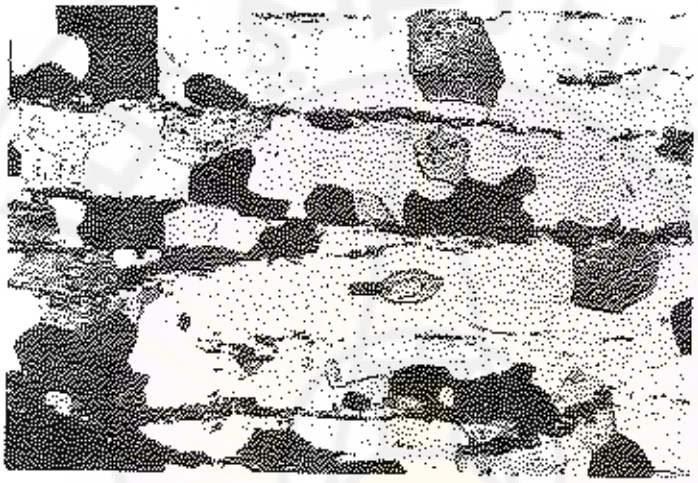


الشكل (4-16): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة الزنك - نحاس - 0.1% تيتانيوم في حالتها المصبوبة.

ولقد وجد أن النسبة المثالية للإضافات تتراوح ما بين (0.05%) و (0.2) تيتانيوم، ومن (0.5%) إلى (1.0%) نحاس. وقد ساعدت تقنية الصب المستمر ودلفنة سبائك الزنك – 1.0% نحاس – 0.1 % تيتانيوم في الحصول على مادة فلزية جديدة ذات خواص مميزة، ويقارن جدول (4–8) بين الخواص الميكانيكية لهذه السبيكة وعدد آخر من السبائك.

ويبين الشكلان (4–16) و (4–17) البنيان الميكروسكوبي لسبائك الزنك – نحاس – تيتانيوم بعد الصب مباشرة، وكذلك بعد إجراء عمليتي الدلفنة والتلدين على الترتيب. وكما تبين الصور

الفوتوغرافية – في السبائك المصبوبة – حبيبات من المحلول الجامد الغني بالزنك المحاط بالأيوتكتيك، كما يظهر البناء الصفائحي المحتوي على المركب الفلزي ($TiZn_{15}$). وعند إجراء الدلفنة على السبيكة تأخذ الحبيبات باتجاه عملية التشغيل على شكل جديلة، والتي تظهر في شكل (4-17) في صورة شعيرات، وتأخذ الشعيرات اتجاه الدلفنة. ومما لا شك فيه أن وجود هذه الشعيرات يعوق حركة الحبيبات، والطريق الوحيد للتغلب على مقاومة المادة العالية هو التلدين لدرجة الحرارة (400) درجة مئوية.



الشكل (4-17): قطاع ميكروسوبي في سبيكة الزنك – 0.1% نحاس – 1% تيتانيوم بعد دلفنتها، ثم تلدينها عند درجة الحرارة (400) درجة مئوية.

2- سبائك الزنك لقوالب الصب Zinc die-casting alloys:

إن التطور الكبير في صناعة السباكة (الصب) باستخدام القوالب (die-casting) مع تطبيق الميكنة في هذا المجال، إضافة إلى زيادة حجم المنتجات قد أدى إلى التطلع إلى مواد جديدة لصناعة قوالب الصب بدلا من قوالب الحديد التي استخدمت لأكثر من قرن من الزمن، وكان الزنك وسبائكه أحد العناصر التي نظر إليها كبديل في هذه الصناعة المهمة التي تشكل أداة مهمة في هندسة الإنتاج. وقد بدئ باستخدام الزنك لصناعة قوالب الصب في عام (1929م)، وعلى الرغم من أن الصبات كانت جيدة، إلا أن حالة القوالب قد ساءت وتلفت في فترة قصيرة

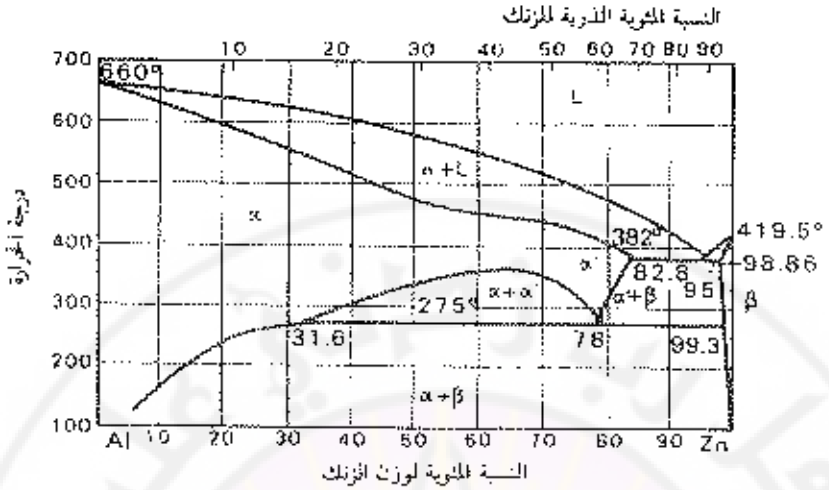
لا تتعدى عدة أشهر، وكانت هذه كارثة محققة للزنك، أدت إلى الاستغناء عنه في هذا التطبيق الهندسي المهم.

جدول (4-8): مقارنة بين الخواص الميكانيكية لسبيكة الزنك – تيتانيوم – نحاس وبعض الفلزات والسبائك الأخرى

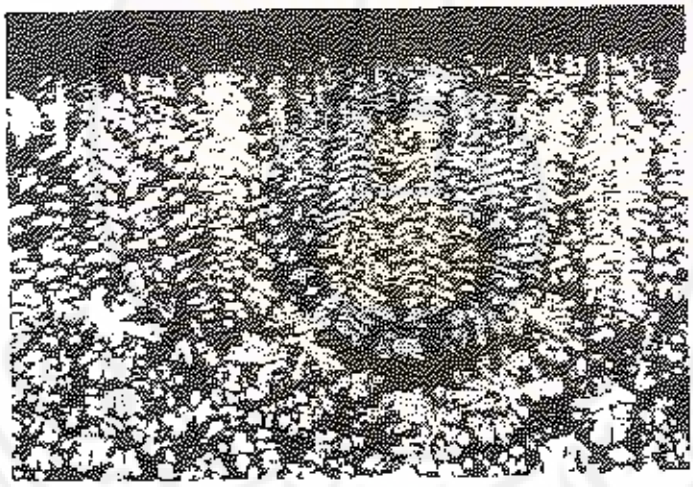
الفلزات السبيكة	الكثافة جم/سم٣	مقاومة الشد (MPa)		النسبة المئوية للاستطالة		رقم فيكرز للصلادة (GPa)	معامل يونج للمرونة (GPa)
		اتجاه موازٍ للدافئة	اتجاه عمودي على الدافئة	اتجاه موازٍ للدافئة	اتجاه عمودي على الدافئة		
سبيكة الزنك Zn-0.1% Ti-0.3% Cu	7.2	162	193	40	20	58	96.6
ألمنيوم 99.5% Al	2.7	140		10		42	69.9
سبيكة النحاس الأصفر 70% Cu-30% Zn	8.52	269		70		66	103.4
النحاس الدافئ على البارد	8.9	371		4		115	124.1

وربما يرجع تلف القوالب إلى التآكل بين الحبيبات نتيجة وجود بعض الشوائب، مثل الرصاص والقصدير، والتي لا تذوب أو تكون إذابتها قليلة جدا في الزنك الجامد، وبالتالي تترسب على حدود الحبيبات، وعندما استخدم الزنك ذو النقاوة العالية (99.99%) أو أكثر مع إضافة عنصر الألمنيوم لتكوين سبائك الزنك – ألمنيوم لقوالب الصب لم تحدث مشاكل لقوالب الصب وعمرت القوالب لمدة طويلة. وقد أطلق على السبائك الجديدة المطورة لقوالب الصب اسم "زاماك" (zamak)، وتعرف في المملكة المتحدة باسم "مازاك" (mazak)، وتركيب هذه السبائك موضح في الجدول (4–8)، وللحصول على أفضل نتائج من تلك القوالب ينبغي أن يكون الرصاص والكادميوم والقصدير في أقل قيمة لهم.

يوضح الشكل (4–18) منحني الاتزان الحراري لسبائك الزنك – ألمنيوم ويظهر من الشكل أن أقصى ذائبية للألمنيوم في الزنك هي (5.5%) عند درجة حرارة الأيوتكتيك (382) درجة مئوية. وأثر الألمنيوم الأساسي على الزنك هو في زيادة المقاومة وتخفيض حجم الحبيبات، وإذا زادت كمية الألمنيوم المضاف على (3–4%) فإن مقاومة السبيكة للصدمات تقل. كما تفقد السبيكة مطيليتها عند (5%) ألمنيوم. وكما هو واضح من منحني الاتزان الحراري لهذه السبائك فإن سبائك "الزاماك" تتكون أساسا من الوجه (β) الغني بالزنك ووجه آخر هو (α) الغني بالألمنيوم، وعند تبريد سبائك "الزاماك" المحتوية على (0.35%) ألمنيوم ينفصل أولا الوجه (β) الجامد المحتوي على 0.35% ألمنيوم، ويتجمد السائل الباقي كأيوتكتيك مكونا ألفا وبيتا كما هو مبين في شكل (4–19) وبعد الصب مباشرة يبدأ الوجه (α) في الترسيب في بلورات الوجه بيتا حتى تصل نسبة الألمنيوم فيه إلى (0.07%) وهي حالة الثبات.



الشكل (4-18): منحني الاتزان الحراري للزنك – ألمنيوم.



الشكل (4-19): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة (mazak-3) كما في حالتها المصبوبة.

نظرا لأن سبائك الزنك – ألمنيوم تستخدم عند درجات حرارة مختلفة – درجات حرارة صب الفلزات المختلفة – فإن من المفيد التعرف على خواص هذه السبائك عند درجات الحرارة المختلفة، وهذا التأثير مبين في شكل (4–20)، ويتضح من الشكل أن زيادة درجة الحرارة تخفض من مقاومة المادة كما تقلل كثيرا من مقاومة الزحف، وتصل إلى أقل قدر لها عند درجة

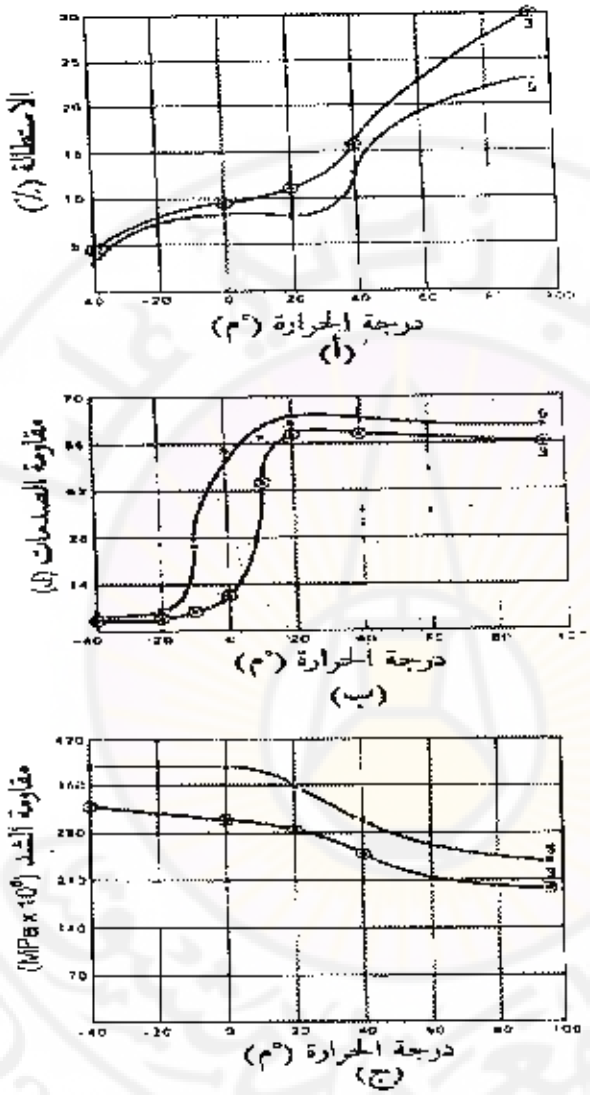
الحرارة (10) مئوية، ولكن على الرغم من ذلك فما زالت هذه السبائك ذات مقاومة للصدمات أفضل من مقاومة حديد الزهر. ونظرا لانخفاض مقاومة هذه السبائك للصدمات فيجب ألا تتعرض لدرجة حرارة أعلى من (10) مئوية عند تعرضها لأية إجهادات خارجية. وإضافة إلى انخفاض كل من المقاومة الميكانيكية ومقاومة الزحف لسبائك الزنك – ألمنيوم فإن مقاومتها للصدمات تقل فجائيا عند درجة حرارة (10) مئوية، ولكن مقاومة هذه السبائك للصدمات عند درجة حرارة (– 40) مئوية أفضل من مقاومة حديد الزهر للصدمات عند درجة الحرارة هذه.

3- سبائك الزنك فائقة اللدونة:

لقد أمكن التوصل إلى عدة سبائك من الزنك عالية المطيلية جدا أو متفوقة الاستطالة، حيث تصل النسبة المئوية للاستطالة فيها إلى (1000%) دون أن تتكسر أو تظهر عليها علامات أو بداية الفشل. وإضافة إلى ذلك فإن هذه السبائك لينة وطريّة إلى درجة غير عادية، إضافة إلى مطيليتها المتفوقة تحت إجهادات منخفضة. وتتحقق هذه الخواص جميعا من خلال البناء الداخلي وهو حبيبات صغيرة جدا – في منتهى الدقة – في حدود (1μm)، أي أن حجم الحبيبات في هذه الحالة أقل من (0.1) من حجم حبيبات الفلز في الظروف العادية، ويمكن الوصول إلى بنية دقيقة جدا إلى أقصى حد ممكن في حالة سبيكة الزنك – ألمنيوم الأيوتكتويدي المحتوية على حوالي (22%) ألمنيوم عن طريق:

1. التبريد المفاجئ من درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الأيوتكتيود.
2. الدلفنة إلى درجة كبيرة أي نسبة عالية من تخفيض المساحة السطحية.

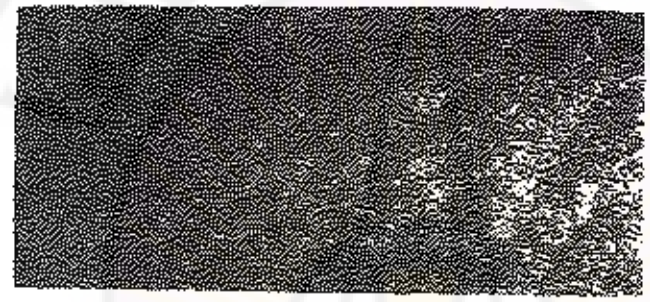
والبناء الميكروسكوبي الذي نحصل عليه في الحالتين موضح في شكل (4-21)، وعندما يتم تسخين المادة الناتجة من أي من المعالجتين السابقتين إلى درجة حرارة أقل من درجة حرارة التحول من (200) و (275) مئوية نحصل على مادة متفوقة (غير عادية) اللدونة.



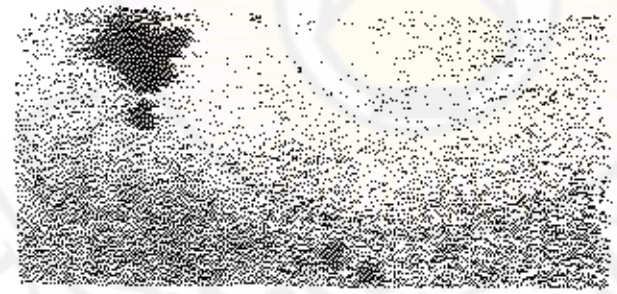
الشكل (4-20): تأثير درجات الحرارة على الخواص الميكانيكية لسبائك الزنك المصبوب.
(أ) الاستطالة (%)، (ب) مقاومة الصدمات، (ج) مقاومة الشد
حيث يشير الرقم (3) لسبيكة mazak 3 والرقم (5) لسبيكة mazak 5



(أ)



(ب)



(جـ)

الشكل (4-21) : قطاع ميكروسكوبي في سبائك الزنك عالية اللدونة.
(أ) 80% زنك – 20% المنيوم كما في حالة الصب.
(ب) نفس سبيكة (أ) بعد تبريدها المفاجئ من درجة الحرارة (350) مئوية.
(ج) نفس سبيكة(أ) بعد التبريد المفاجئ والدافئة عند درجة الحرارة (250) مئوية.

لقد دأب الكثيرون – بعد التعرف على هذه المادة – على تسمية سبيكة (سبائك) الزنك – ألمنيوم ذي الدرجة العالية من اللدونة والمقاومة المنخفضة بالسبائك البوليمرية، كما يقارنون بينها وبين المواد البلاستيكية (البوليمر) وبخاصة البلاستيك الذي يلدن بالتسخين (ثرموبلاستيك) (Thermoplastic)، والذين أطلقوا هذه التسمية لديهم بعض الحق، نظرا لأن سبائك الزنك متفوقة اللدونة يمكن صبها وتشكيلها في أشكال معقدة من خلال الصب بالتفريغ أو بالنفخ أو بطرق أخرى مشابهة تماما لتشكيل المواد البوليمرية. ولكن بجانب هؤلاء الصواب في نقطة أخرى، وهي أنه بتبريد هذه السبائك لدرجة حرارة الغرفة تصبح تصرفاتها تماما كبقية الفلزات الأخرى، إضافة إلى أن مقاومتها وصلادتها تكون عندئذ أكبر بكثير من أي بلاستيك لدن بالحرارة، إضافة إلى أن سبائك الزنك المتفوقة اللدونة عالية الكزازة (stiffness)، كما أنها موصلة للتيار الكهربائي وتتمتع بالثبات الكيميائي، ولا يمكن أن يجاريها في ذلك أي نوع من أنواع البلاستيك.

إن توافر سبائك الزنك متفوقة المرونة قدم لمهندسي التصميم مادة فلزية يسهل جدا تشكيلها في قوالب، فهي تتجمد بالتسخين عند درجات حرارة معقولة جدا في قوالب فهي تتجمد بالتسخين عند درجات حرارة معقولة جداً في مدى من (200) إلى (270) درجة مئوية، كما أن أدوات تشكيلها بسيطة وذات تكلفة رخيصة مقارنة بأدوات الضغط العادية، مما يسر الأمر كثيرا أيضا على مهندس الإنتاج.

4-5: القصدير وسبائكه:

4-5-1: تمهيد:

القصدير هو أحد الفلزات التقنية المهمة في العصر الراهن، وعلى الرغم من استخداماته العديدة والمتنوعة، والتي تصل إلى كل مكان تدب فيه الحياة على وجه الأرض، إلا أن غالبية الناس لا تشعر كثيرا بوجوده، وربما يرجع ذلك لأحد السببين أو كليهما معا:

أولا: تعد كمية القصدير المنتجة والمستخدمة في التطبيقات الهندسية والعملية المختلفة مقداراً صغيراً مقارنة بالفلزات الأخرى، فكمية القصدير المستعمل في أنحاء العالم كافة في حدود(200,000) طن سنويا وهذا مقدار – مقارنة بالفلزات الأساسية الأخرى مثل النحاس والزنك والرصاص – صغير جدا، حيث تتراوح الكمية المستخدمة من الفلزات المذكورة بين (3) و (9) ملايين طن سنويا.

ثانيا: لا يستخدم القصدير بصورة منفردة مطلقا، ولكنه يستعمل في صورة عنصر سبائكي، في حين أن معظم العناصر الفلزية الأخرى تستخدم بصورتها المنفردة أو ربما يطلق الناس على سبائك العناصر الأخرى اسم الفلز مثل سبائك النحاس أو سبائك النيكل أو غير ذلك، ولهذا فإن اسمها متداول، وهذا شيء غير متوافر في حالة القصدير، الذي يكون جزءا من سبيكة وليس قاعدة للسبائك.

وعلى الرغم من أن القصدير لم يعرف في العصور القديمة ولم يوجد مطلقا في صورة منفردة، إلا أنه أحد أقدم العناصر التي استخلصها الإنسان واستخدمها في العصور القديمة، وكان سببا في تطور حياة الإنسان الأول. ويدلل هؤلاء على صحة قولهم بأن الإنسان القديم اكتشف سبيكة البرونز واستعملها – وهي سبيكة من النحاس والقصدير – ويؤكد هؤلاء المؤرخون أن الإنسان الأول قد صنع هذه السبيكة أو على الأقل طورها بعد أن اكتشف وجودها وتعرف عليها، ودلت نتائج تجاربه على تأثير القصدير على تصليد النحاس ليكون سبيكة البرونز متفوقة المقاومة على كلا العنصرين.

ومن المعتقد أن توصل الإنسان في ذلك الوقت إلى شحذ سبائك البرونز لتعطي نصلا حادا يستفاد به في قطع الأشياء، قد أغراه عندئذ بتشكيلها لصنع العدد والأدوات القاطعة، إضافة إلى الأسلحة من أسهم ورماح وغيرهما والتي حلت محل العدد والأدوات الحجرية. وكان لاكتشاف البرونز الأثر البالغ في نهضة وتقدم الإنسان، ولهذا أطلق علماء الانثروبولوجيا كلمة 'عصر البرونز' على إحدى فترات عصور التاريخ، وعصر البرونز هو بالتحديد الحقبة الزمنية التي ساد فيها استخدام سبائك البرونز.

وبالرغم من أن البرونز يعد حاليا من الآثار والتحف، إلا أنه ما زال حتى اليوم يقوم بدور أساسي ومهم في التقنية الحديثة أو يمكن باختصار أن نقول إن القصدير قد بدأ استخدامه منذ العصر المتقدم الأول عصر البرونز وإنه مازال يستخدم في الوقت الراهن عصر الفضاء أي أن القصدير استمر يقوم بدور رئيسي في حياة البشرية منذ بداية حياة الإنسان على ظهر الأرض حتى يومنا هذا وسيظل على المنوال نفسه بمشيئة الله لفترات طويلة قادمة.

لقد اشتق اسم القصدير من الكلمة اليونانية القديمة (stanoum) ومنها أخذ رمزه الكيميائي (Sn). وربما ترجع هذه التسمية إلى الاسم اليوناني القديم الذي يطلق على الأصوات المميزة التي يصدرها القصدير عند كسره سواء أثناء عمليات التشكيل أو الانهيار التي تعرف باسم بكاء

القصدير، وتشبه هذه الأصوات صوت الأفاعي وتكون الأصوات أكثر وضوحا عندما تكون حبيبات المادة جرشه.

4-5-2: استخلاص القصدير:

إن أهم خامات القصدير هو الكاستيريت وهو أكسيد القصدير (SnO_2) ونظراً لانخفاض نسبة القصدير في خاماته إضافة إلى احتواء الخام على عدة شوائب ضارة بالقصدير عند استخلاصه، فإنه يلزم معالجة الخام معالجة جيدة ومكثفة لرفع نسبة القصدير في الخام قبل مراحل الاستخلاص، وكذا التخلص من أكبر نسبة ممكنة من الشوائب وبعض الشوائب مثل النحاس والحديد والزنك والبزموث والانتيمون يصعب إزالتها في مراحل إعداد الخام وهي ما تعرف باسم مرحلة ما قبل الاستخلاص أو حتى في مرحلة الاستخلاص نفسها وأفضل طريقة للتخلص من تلك الشوائب هي في مراحل التنقية التالية للاستخلاص.

نظراً لأهمية القصدير وقلة كميته المتوافرة في القشرة الأرضية وارتفاع ثمنه فإنه يجب أن تكون عملية التركيز فعالة قدر الإمكان ويساعد على ذلك أن كثافة الكاستيريت النوعية أعلى بكثير من كثافة الجرانيت والمعادن الأخرى المتحدة به والموجودة معه لهذا نستخدم طريقة الفصل بالكثافة بنجاح في تركيز خام القصدير. وتؤدي عمليات تركيز الخام -- وخاصة خامات القصدير من جنوب شرق آسيا – لرفع نسبة القصدير في الخام قبل الاستخلاص لتصل نسبته الى (70%) وبعد انتهاء التركيز يتم صهر الخام واختزاله باستخدام الكربون عند درجات الحرارة العالية ولكن يفضل قبل الصهر والاختزال معالجة الخام المركز لإزالة بعض الشوائب الفلزية وأفضل عمليات المعالجة وأكثرها استخداما هي عملية التحميص عند درجات الحرارة العالية حيث يتطاير كل من الكبريت والزرنيخ في صورة اكسيديهما، وفي بعض الأحيان تتبع عملية التحميص عملية الإذابة باستخدام الماء أو الحمض المخفف لإزالة شوائب المواد الذائبة غير المتطايرة وكذا بعض الشوائب التي تقبل الذوبان بعد عملية التحميص التي تجري في وجود كربونات الصوديوم أو كلوريد الصوديوم.

بعد عمليات المعالجة السابقة يخلط الخام المركز الجاف مع مسحوق الكربون:

- في صورة فحم الانثراسيت – مع إضافة كربونات الكالسيوم التي تعمل كمصهر ويتم اختزال أكسيد القصدير بالكربون – وهي عملية سهلة – بعد التسخين لدرجة حرارة تتراوح بين (1300) و (1400) درجة مئوية حيث يتم التفاعل:

$$SnO_2 + C \rightarrow Sn + CO_2$$

لكن نظراً لوجود أكسيد السيليكون (SiO_2) إضافة إلى أكسيد القصدير اللذين يكونان سيليكات القصدير فإن جزءا من القصدير أثناء الاختزال يذهب مع السيليكا إلى الخبث. ولما كان القصدير فلزا غاليا ومهما لذا يلزم إعادة معالجة الخبث للحصول على القصدير مرة ثانية. ويستخدم في ذلك إما الأفران الدوارة وهي أقدم الطرق استعمالا أو الأفران الكهربائية وهي أحدث الأفران استخداما. وتتفق الأفران المستخدمة في أسلوب الاستخلاص ولكنها تختلف في التفاصيل وتصب نواتج الاختزال في وعاء كبير حيث يطفو الخبث على السطح ويهبط الفلز (القصدير) إلى القاع ويتم فصلهما ومعالجتهما فيعاد الخبث إلى الفرن مرة ثانية، أما القصدير فيصب في قوالب تمهيدا لعمليات التنقية.

نظرا لتأثير الشوائب الفلزية السيء على خواص القصدير لذا لابد من التخلص من هذه الشوائب، وهناك طريقتان لتنقية القصدير من هذه الشوائب هما : التنقية بالحرارة (الطريقة الساخنة) والتنقية الكهروكيميائية:

1- التنقية بالحرارة (التنقية الساخنة):

تعتمد طريقة التنقية بالحرارة على نقطتين مهمتين هما:ارتفاع درجة حرارة انصهار الشوائب مقارنة بدرجة حرارة انصهار القصدير، وكذلك انخفاض وزن الشوائب النوعي مقارنة بالوزن النوعي للقصدير، ولهذا تستخدم هاتان النقطتان في التنقية في طريقة تعرف باسم الفصل بالصهر، وتجري تنقية القصدير بالحرارة في فرن صغير دوار مائل حيث تسخن الشحنة ببطء إلى درجة حرارة أعلى قليلا من درجة حرارة انصهار القصدير (232°C)، والتحكم في درجة الحرارة أمر مهم حتى نتأكد من انصهار القصدير ببطء وبانتظام وباستمرار، وتجمع قطرات القصدير المنصهر في إناء خارج الفرن أما الشوائب – ونظرا لارتفاع درجة حرارة انصهارها – فتظل بداخل الفرن في حالة جامدة حيث تعاد مرة ثانية إلى فرن الاستخلاص كجزء من الشحنة، وذلك بهدف استرجاع أي كمية من القصدير بها حتى لو كانت صغيرة.

يتم في عملية التنقية هذه إزالة معظم الحديد والزرنيخ والنحاس والانتيمون نظرا لارتفاع كل من درجة حرارة انصهار تلك العناصر ودرجة حرارة انصهار مركباتها أما إذا وجد الرصاص أو البزموت في القصدير فلا يمكن إزالتهما بهذه الطريقة نظرا لانخفاض درجة حرارة انصهارهما أي أنهما ينصهران ويتجمعان مع عنصر القصدير وللتخلص من الرصاص والبزموت – إذا وجدا

ضمن الشوائب في القصدير – تجرى عملية تنقية تالية هي عملية الغليان والمعروف باسم التنقية بالصعد وهي الخطوة التالية لعملية فصل الصهر.

تجرى الخطوة الثانية في التنقية الحرارية المعروفة باسم التنقية بالصعد في وعاء من حديد الزهر حيث يسخن القصدير المتجمع من الخطوة السابقة إلى درجة حرارة تبلغ نحو (300) درجة مئوية– أعلى من درجة حرارة انصهار القصدير – ويقلب السائل باستمرار بإمرار هواء مضغوط وغمس أقطاب أو عصي– ومن هناك جاء اسم العملية – من الخشب الأخضر الذي يتحلل معطيا غازات تساعد كذلك على تقليب الشحنة ونظرا لشدة التقليب الناتج عن الغازات ترتفع الشوائب إلى سطح الشحنة حيث تتأكسد مكونة الكدارة– أو الخبث – وتزال عندئذ هذه الكدارة بالكشط من أعلى سطح الإناء حيث تعاد مرة أخرى إلى فرن الاستخلاص لاسترجاع ما تحويه من قصدير.

2- التنقية الكهروكيميائية:

تستخدم طريقة التنقية الكهروكيميائية للحصول على فلز القصدير عالي النقاوة وتبلغ درجة نقاوة القصدير الناتج من هذه التنقية (99,9%) وتستعمل التنقية الكهروكيميائية للقصدير في عدة حالات منها:

(أ): في بعض محطات التنقية الحرارية أي أن التنقية الكهروكيميائية تلي التنقية الحرارية وذلك لزيادة نقاوة القصدير المنتج من التنقية الحرارية وخاصة إذا كانت نسبة تركيز القصدير في الخام السبدئي عند الاستخلاص منخفضة حيث يؤدي الخام الفقير في محتواه من القصدير إلى منتج به نسبة عالية من الشوائب والتي تتطلب كثيرا من المعالجة والتنقية ويصل الأمر إلى الحاجة لاستخدام طريقتي التنقية كليهما للحصول على القصدير كمنتج عالي النقاوة.

(ب): في المصانع القائمة على المصدر الثانوي للقصدير – أي خام درجة ثانية – أو من المخلفات أو الخردة وفي هذه الحالة تحتوي المادة الخام الأولى على نسبة عالية من العناصر الأخرى التي يجب التخلص منها.

وأساس طريقة التنقية الكهروكيميائية للقصدير هو نفسه الأساس المتبع مع أي فلز آخر حيث يصب الفلز غير النقي في كتل أو ألواح فلزية مكونا الأنود في الدائرة الكهروكيميائية ذات التيار المباشر ويصنع الكاثود فيها من ألواح رقيقة من القصدير يترسب عليها القصدير النقي بعد

انتقاله من الأنود ويتكون الإلكتروليت في الخلية الكهروكيميائية من حمض الكبريتيك أو الهيدروكلوريك مع بعض الإضافات للحصول على قصدير مترسب في صورة ناعمة ولكي يتماسك مع بعضه البعض على سطح الكاثود.

تبلغ درجة نقاوة القصدير المترسب في طريقة التنقية الكهروكيميائية (99,9%) مقارنة بدرجة نقاوة (99,75%) في حالة التنقية بالحرارة اما الشوائب فتترسب في قاع الخلايا الكهروكيميائية حيث تعاد مرة ثانية للمعالجة.

4-5-3: خواص القصدير

يتمتع القصدير بخواص فريدة فدرجة حرارة انصهاره منخفضة كما أنه منخفض الصلادة أي أنه فلز طري، وبالتالي فإنّ خواصه الميكانيكية الأخرى ضعيفة وبوجه عام تعتمد خواص القصدير على كمية ونوعية الشوائب ومعدل إجراء الاختبار ودرجة حرارة الاختبار – والخواص الميكانيكية للقصدير موضحة في جدول (4-9) – نظراً لأن التغير في مستويات الانزلاق مع انخفاض درجة الحرارة يؤدي إلى انخفاض فجائي في المطيلية عند درجة الحرارة (-120) درجة مئوية، ولما كانت درجة حرارة انصهار القصدير منخفضة فتعاد بلورة الفلز النقي عند درجة حرارة الغرفة، ولذا فإن القصدير – على العكس من العناصر الفلزية الصناعية الأخرى – يتصلد بالتشكيل في المراحل الأولية للتشكيل ثم يطرى بعد ذلك ويلين مع زيادة التشكيل نظرا لزيادة حجم حبيبات العنصر مع الزيادة في مقدار التشكيل وتنطبق هذه الصفة كذلك على مثل: سبائك اللحام الطرية (قصدير – رصاص) وسبائك البيوتر (القصدير – انتيمون – نحاس) والتي سيأتي ذكرها فيما بعد.

تعتمد خواص القصدير الكيميائية كثيرا على الظروف المحيطة مثل درجة الحرارة والرطوبة وقوة المحلول ونوع المحلول. وبوجه عام يقاوم القصدير النقي التفاعل مع الغازات والأحماض الضعيفة والقلويات عند درجة الحرارة العالية ولهذا يحتفظ القصدير بلونه الفضي– الأبيض المشابه للون الفضة في الجو العادي وفي الأجواء الصناعية الملوثة. ويقع القصدير في الجدول الدوري مع مجموع اللا فلزات مثل الكربون وأشباه الفلزات: السليكون والجرمنيوم ومجموعة أخرى من العناصر على الجانب الأخر هي الرصاص، ولهذا يتوقع أن يظهر في القصدير بعض الصفات اللا فلزية. ويكون القصدير مع الكربون المركبات الفلزية العضوية.

جدول (4-9): الخواص الميكانيكية لفلز القصدير

الخاصية	القيمة
مقاومة الشد :	
عند 20 °C	14.5MPa
عند 100 °C	11.0MPa
عند 200 °C	4.5MPa
مقاومة القص عند درجة الحرارة العادية	12.3MPa
معامل المرونة عند 20 °C	49.9×10^3MPa
معامل الجسوءة عند 20 °C	18.4×10^3MPa
معامل الكتلة عند 20 °C	58.2×10^3MPa
نسبة بوازون	0.357
مقاومة الزحف عند 15 °C	
العمر عند اجهاد 2.3MPa	170 يوما
العمر عند اجهاد 1.4MPa	550 يوما
مقاومة الكلال لعدد دورات 10^2 عند 15 °C	± 2.5MPa
رقم الصلادة :	
عند درجة الحرارة 20 °C	3.9BNH
عند درجة الحرارة 20 °C	2.3BHN
عند درجة الحرارة 20 °C	0.9BHN

وللقصدير تركيبان بلوريان : بيتا(β) وهو من نوع رباعي الأضلاع متمركز الجسم ولون القصدير في هذه الحالة أبيض وهي صورة القصدير التي توجد عند درجة الحرارة العادية، أما البناء البلوري الآخر فهو المكعب الماسي ويمثل ذلك البناء البلوري للفلز في صورة الوجه ألفا (α) ويوجد هذا البناء عند درجات الحرارة المنخفضة، ويكون القصدير في هذه الحالة رمادي اللون وتقع درجة حرارة التأصل عند درجة الحرارة (13°C) ولكن التأصل يتم عمليا عند درجات حرارة أقل من ذلك بكثير (-40 °C) وتؤثر الشوائب الفلزية وعناصر السبائكية على درجة حرارة التحول البلوري حيث إنها تؤخر عملية التحول التأصلي وتعطله ومعامل التمدد الحراري للقصدير غير منتظم في جميع الاتجاهات البلورية مما يؤدي إلى ظهور البروزات على السطح الخارجي وبوجه خاص عند حدود الحبيبات الكبيرة والقصدير ضعيف التوصيل الكهربائي، فنسبة توصيله الكهربائي (13%) مقارنة بالنحاس القياسي، ولكن يتحسن معامل توصيله الكهربائي مع انخفاض درجة الحرارة.

يتفاعل القصدير مع الأكسجين في الهواء الجاف عند درجة الحرارة العادية ببطء شديد ولا يفقد القصدير لونه المميز الأبيض – الفضي الجميل إلا بعد زمن طويل يصل لعدة أعوام حيث تتكون طبقة رقيقة من أكسيد القصدير التي تمنع أكسدته في الجو الجاف ولكن الجو الرطب يزيد كثيراً من معدل الأكسدة ويفقد القصدير بريقه بعد فترة قصيرة وتأثر القصدير بالكبريت أو مكوناته الغازية محدود وإذا حدث وتأثر القصدير بالكبريت من الجو المحيط فإن ذلك يعني أن تلك الظروف غير مناسبة للإنسان، يمثل هذا الجو عندئذ مصدر مخطورة على صحة الإنسان.

4-5-4: استخدامات القصدير

انطلقت استخدامات القصدير واستعمالاته من خواصه المتميزة وأهم الصفات المميزة التي ساعدت على استعمال القصدير ما يلي:

1- نقطة انصهاره المنخفضة

2- قابلية القصدير وسبائكه – في حالة انصهارها –لتغطية تلال الأسطح الأخرى

3- تميز القصدير وسبائكه في عملية الصب والسباكة لسهولة انسيابه وجريانه

4- تفوق القصدير وكذلك سبائكه في مقاومة الاحتكاك في وجود زيوت التشحيم وتمتع سبائك القصدير بوجه خاص – على العكس من سبائك العناصر الأخرى – بالاحتفاظ بجزء من الزيت على سطحها

5- قابلية القصدير لتكوين سبائك مع معظم العناصر الفلزية الأخرى

6- يتمتع القصدير وسبائكه بمقاومة جيدة للتآكل

7- القصدير عنصر غير سام وكذا سبائكه

8- يتمتع القصدير وسبائكه بمظهر جذاب وشكل خارجي جيد وجميل.

9- للقصدير وسبائكه قابلية ممتازة للطرق والدلفلة على البارد.

على الرغم من هذه المميزات العديدة التي يتمتع بها القصدير وسبائكه إلا أنه يعيبه ضعف مقاومته الميكانيكية وتحول الخواص الميكانيكية الضعيفة للقصدير وبالذات المقاومة الميكانيكية دون استخدامه كمادة للإنشاءات، ولكن يمكن التغلب على ذلك من خلال تصليد الفلز وتقويته بعناصر سبائكية، ويمكن أن يكون قصور القصدير في خواصه الميكانيكية السبب الرئيسي الذي يحد من استعمال القصدير بصورته الفلزية المنفردة.

يقتصر استخدام عنصر القصدير بمفرده في صناعة الرقائق التي يمكن إنتاجها بسمك (0.004 مم) وتستخدم تلك الرقائق في المكثفات الكهربائية الجافة عالية الدرجة وفي تغليف الشكولاته ومنتجات الحليب نظراً لأن القصدير لا يتفاعل مع تلك المنتجات ولكن في الوقت الحالي حلت رقائق الألمنيوم – الأقل تكلفة – محل رقائق القصدير كما يستخدم القصدير في صنع أغطية زجاجات العطور وفي بعض أغراض اللحام الخاصة وتصنع منه أنابيب معجون الأسنان وتستخدم أيضا كميات كبيرة من القصدير في تغليف الفولاذ والنحاس والبرونز لمنع تآكل السطح السفلف (المكسي)، ويتم التغليف (أو التكسية) على الساخن للمواد غير الحديدية أو يستخدم التغليف الكهربائي بالقصدير وخاصة للمنتجات الدوائية والزراعية وتتمثل معظم استخدامات القصدير في صنع السبائك المختلفة التي سيتم الحديث عنها في الجزء التالي وكذلك عن تطبيقات هذه السبائك واستعمالاتها.

4-5-5: سبائك القصدير:

إن استخدام القصدير – كما سبق ذكره – بصورة منفردة محدود للغاية وتكون معظم استعمالات القصدير في صورة سبائكية حيث يكوّن القصدير سبائك ثنائية مع معظم العناصر الفلزية وفي بعض الأحيان مع العناصر غير الفلزية وهو ما يطلق عليه أحيانا المركبات الفلزية العضوية أو يطلق عليه اسم المركبات الاصطناعية وسوف يقتصر الحديث في هذا الكتاب على السبائك الفلزية وقبل الدخول في تفاصيل السبائك المستخدمة تجاريا سيتم استعراض عدد من منحنيات الاتزان الحراري لسبائك القصدير الثنائية.

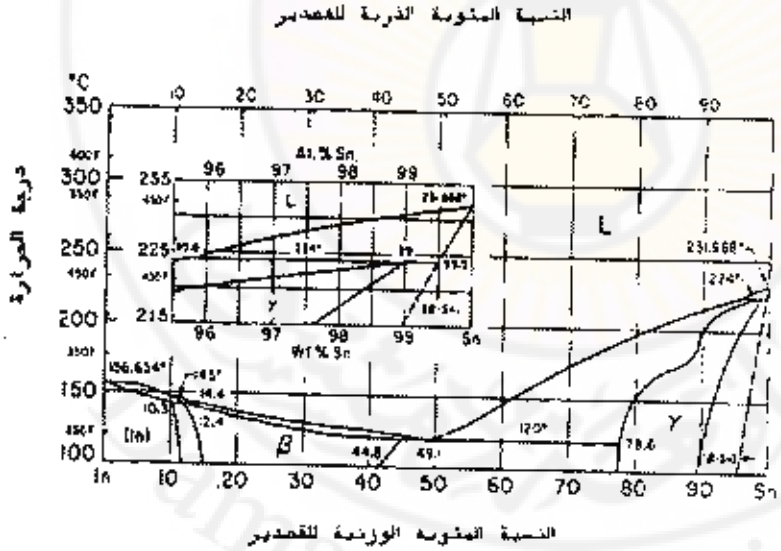
أ- بعض منحنيات الاتزان الحراري للقصدير

نستعرض في هذا الجزء منحنيات الاتزان الحراري للقصدير مع عناصر السبائكية التي تضاف إليه لتكوين السبائك ذات الاستخدام التجاري وهذه العناصر هي: الانديوم، والانتيمون، والبزموث، والرصاص، والفضة، والكادميوم والنحاس. للتعرف على المكونات المختلفة لهذه السبائك عند درجات الحرارة العادية.

1- القصدير – أنديوم: وهو نظام إيوتكتيكي تظهر فيه نقطة الإيوتكتيك عند كميات متساوية من العنصرين عند درجة الحرارة (120) درجة مئوية وتستخدم هذه السبائك في لحام المواد الفلزية ذات درجة الانصهار المنخفضة. ونظرا لوجود الانديوم الذي يساعد على

تبلل سطح الزجاج تستخدم هذه السبيكة على وجه الخصوص في توصيل ولحام الزجاج – وهي من سبائك اللحام النادرة في توصيل الزجاج – وبالذات في العوازل الحرارية الثنائية. وهناك اهتمام تجاري خاص بالسبيكة الثلاثية عند إضافة الرصاص لتكوين سبيكة القصدير – انديوم – رصاص لتستخدم في اللحام بالسبيكة وخاصة عند درجات الحرارة المنخفضة وهي مستخدمة وبنجاح كذلك لتوصيل الزجاج. الشكل (4–22).

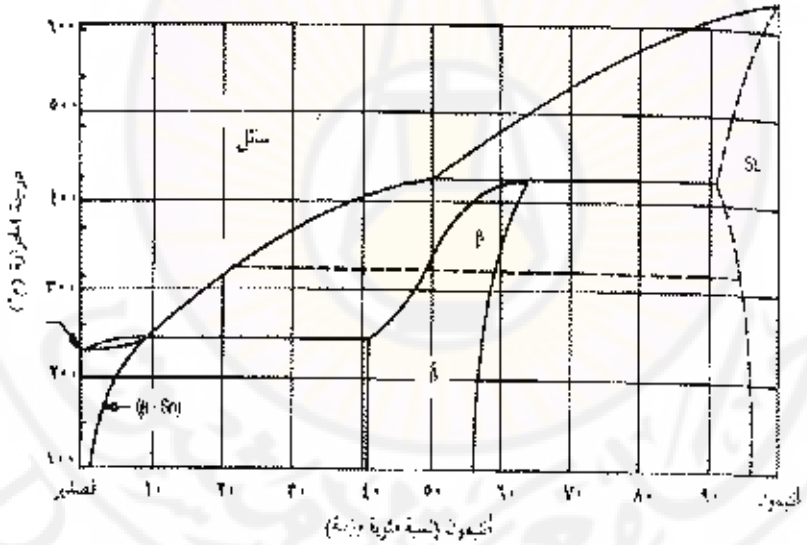
2- **القصدير– أنتيمون:** ومن أهم معالم هذا المنحى الشكل (4–23). انخفاض ذوبانية الأنتيمون في القصدير من درجة حرارة السيولة حتى درجة حرارة الغرفة ويؤدي ذلك إلى ترسيب الوجه بيتا(β) وهو مركب فلزي تركيبه الكيميائي(SbSn) وتستخدم سبائك القصدير – أنتيمون في صناعة مادة اللحام الطري، وتستخدم سبيكة القصدير (7%) أنتيمون في صناعة سبائك المحامل المصنعة بالصب مع التبريد الفجائي، ويؤدي التبريد الفجائي إلى ترسيب الوجه بيتا في صورة بلورية مكعبة، ويحتوي الوجه بيتا عندئذ على نسبة مئوية (50%) من كل من عنصري القصدير والأنتيمون، ولكن يتغير هذا التركيب عند درجة حرارة الغرفة ليصبح في صورة: (41%) أنتيمون إلى (59%) قصدير.



الشكل (4-22): منحني الاتزان الحراري للقصدير – أنديوم.

وبإضافة كمية صغيرة من النحاس لسبائك القصدير –انتيمون (مثل سبائك البيوتر وسبائك المحامل) يكون منحى الاتزان الحراري للسبائك الثلاثية مشابها لمنحى الاتزان الحراري للنظام الثنائي من القصدير–نحاس وتستعمل سبائك القصدير–انتيمون المحتوية على نسبة انتيمون تتراوح بين (20%) و (40%) في قوالب الصب.

3- **القصدير- بزموت**: تمثل مجموعة سبائك القصدير– بزموت النظام الإيوتكتيكي التقليدي وتقع درجة حرارة الإيوتكتيك عند أقل من (140) مئوية وتبلغ نسبة البزموت فيه (60 %) وقد أدى انخفاض درجة حرارة انصهار هذه السبائك إلى استخدامها في صناعة مواد اللحام الطرية، وتبلغ ذائبية البزموت في القصدير حوالي (20%) عند درجة حرارة الإيوتكتيك، ولكنها تنخفض بانخفاض درجة الحرارة لتصل إلى الصفر تقريباً عند درجة الحرارة العادية. أما ذائبية القصدير في البزموت فهي أقل من (1%) عند درجة حرارة الأيوتكتيك، وتصل درجة الإذابة إلى الصفر عند درجة الحرارة العادية.

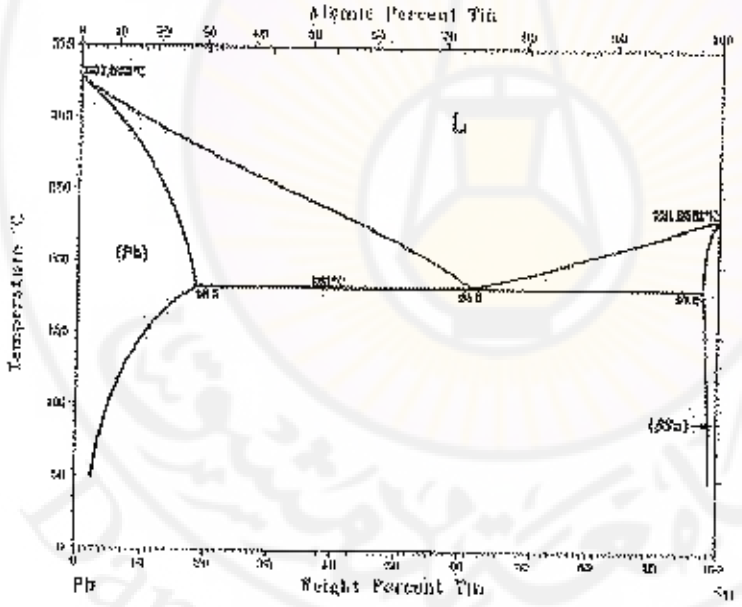


الشكل (4-23): منحني الاتزان الحراري للقصدير – أنتيمون.

4- **القصدير – رصاص**: منحني الاتزان الحراري لسبائك القصدير – رصاص هو من نوع الأيوتكتيك التقليدي المكون للمحلول الجامد عند طرفي المنحني، وهذا النظام ذو أهمية

خاصة لسبائك اللحام الطرية وبالذات في مناطق التركيب المتفرع، ويلاحظ في هذه الحالة اختلاف نقطة السيولة ونقطة التجمد، ولذا يمكن اختيار السبيكة المناسبة طبقاً للخواص المطلوبة، وإن التركيب الميكروسكوبي يعتمد إلى حد بعيد على نسبة القصدير إلى الرصاص في السبيكة. الشكل (4-24).

5- **القصدير – زنك:** هذه السبائك مرتبطة مع سبائك اللحام الطري في وجود الألمنيوم، وتحتوي سبائك اللحام من هذه المجموعة على نسبة زنك تتراوح بين (10%) و (30%)، ولهذا فإن تركيب سبائك اللحام عندئذ من الزنك الأولي (ذائبية القصدير في الزنك أقل من 0.1%) المترسب كنان خليط من أيوتيك القصدير – زنك، ودرجة حرارة انصهارها حوالي (199) درجة مئوية، كما تستخدم هذه السبائك في التغليف الكهربائي عندما تحتوي على نسبة من الزنك تتراوح بين (20%) و (25%)، و تستعمل هذه السبائك في حماية الفولاذ من التآكل بطريقة مشابهة للزنك النقي.



الشكل (4-24): منحني الاتزان الحراري لخليطة القصدير – رصاص.

6- **القصدير – فضة:** منحني الاتزان في هذه الحالة من النوع المركب، وتستخدم السبائك الغنية بالقصدير في اللحام الطري، وأشهر السبائك في هذه الحالة هي من النوع الأيوتكتيكي، أي القريبة من نقطة الأيوتكتيك، وعند اللحام يتكون المركب الفلزي (Ag3Sn)، وتصل ذائبية القصدير في الفضة إلى حوالي (10%)عند درجة الحرارة (200) درجة مئوية، وتستخدم سبائك القصدير– رصاص – فضة كسبائك لحام طرية.

7- **القصدير – كادميوم:** يقع الأيوتكتيك الثنائي لهذين الفلزين عند درجة حرارة (177) مئوية و(68%) قصدير، ويساعد انخفاض درجة حرارة الأيوتكتيك على استخدام سبائك القصدير – كادميوم في صناعة سبائك اللحام الطرية ذات درجات حرارة الانصهار المنخفضة، ولقد جرت العادة في هذه السبائك على إضافة كمية من الرصاص للاستفادة من الأيوتكتيك الثلاثي للقصدير – كادميوم – رصاص، والتي تظهر عند درجة الحرارة (145) مئوية، وبقية منحني الإتزان الحراري ليست ذا أهمية تجارية، رغم أن سبيكة (70%) كادميوم – (30%) قصدير قد تستخدم أحياناً في اللحام وتلامس الإلكترونات، نظراً لخواصها الكهربائية المميزة، حيث لا توجد أية قوة دافعة كهربائية حرارية بين هذه السبيكة والمواد الموصلة باللحام.

8 – **القصدير – نحاس:** أهمية منحني الاتزان الحراري لهذه السبائك هي في تكوين سبائك البرونز ، والتي سنتناولها بالتفصيل في الفصل الخامس الخاص بالنحاس، وتحتوي سبائك البرونز على مقدار من القصدير يتراوح بين (15 %) و (20%)، ويتكون الأيوتكتيك في سبائك النحاس – قصدير عند حوالي (0.7%) نحاس، ويظهر وجهان هما (ألفا + دلتا) ($\delta + \alpha$) وتركيبهما (Cu_5Sn) و (Cu_3Sn) على التوالي، ويتكون هذان الوجهان بالتخلل بين الأوجه الجامدة عند سطح التوصيل بين القصدير والنحاس.

ويمكن تقسيم سبائك القصدير إلى ست مجموعات رئيسة اعتماداً على تركيبها الكيميائي، وبالتالي خواصها واستخداماتها وهي: سبائك القصدير البسيطة، سبائك اللحام والتوصيل، وسبائك المحامل، والبيوتر ، وسبائك القصدير قوالب الصب، وسبائك القصدير المصهورة.

أساس مجموعة سبائك القصدير البسيطة هو القصدير النقي – تبلغ نقاوة القصدير في هذه الحالة حوالي (99.98%) – وتستخدم هذه السبيكة عادة في التغليف الكهربائي بالقصدير، وفي تصنيع المركبات الكيميائية. ويستخدم القصدير التجاري النقاوة [درجة نقاوته (99.8%)، وكذلك

القصدير الصلد (99.6%) قصدير + (0.4%) نحاس | في صناعة الرقائق الفلزية وأنابيب معجون الأسنان، ويستخدم القصدير ذو النقاوة العالية في بعض الأغراض الصيدلانية، وتزيد مقاومة القصدير عند إضافة القليل من النحاس إليه، ولا يحتاج القصدير إلى تلدين بعد تشكيله، نظراً لعدم تصلده بالتشكيل.

يطلق على سبائك اللحام المستخدمة في اللحام والتوصيل اسم سبائك اللحام الطرية (soft solder alloy)، ويمكن أن يكون السبب في إطلاق اسم الطرية عليها انخفاض درجة حرارة انصهارها، أو ضعف مقاومتها أو كلا السببين معاً، وتشكل هذه السبائك ثاني استخدام للقصدير المنتج بعد سبائك المحامل، حيث تستهلك صناعة سبائك اللحام الطرية حوالي (23%) من مجموع إنتاج القصدير، ولقد تغيرت النظرة كثيراً إلى هذه السبائك في عمليات اللحام والتوصيل، فبعد أن كانت تستخدم إلى عهد قريب في السمكرة وتوصيل أنابيب المياه، فقد أصبحت تستخدم الآن في الصناعات الإلكترونية، كما في الحاسبات ووسائل الاتصالات المتقدمة والتليفزيون والحاسبات الصغيرة والحاسبات الشخصية وأجهزة التحكم الالكتروني، كما تم تطوير طرق جديدة للتوصيل (التماس) (electrical contact) في الدوائر الكهربائية المطبوعة (printed electrical circuits) باستخدام سبائك اللحام والتوصيل.

ونظراً للأهمية المتنامية لسبائك الوصلات الكهربائية المتقدمة فنورد فيما يلي أهم متطلبات سبيكة اللحام الطري ومواصفاتها:

1 – يمكن استخدامها في الوصلات الكهربائية (كما في الإلكترونيات).

2 – توصيل المركبات ميكانيكياً معاً (كما في العلب أو الألواح).

3 – تسمح بانتقال الحرارة من مركبة (جزء) إلى الآخر (كما في المبادلات الحرارية).

4 – تحتفظ بمقومة معقولة عند درجات الحرارة المختلفة من درجات الحرارة المنخفضة – تحت الصفر – إلى درجات حرارة غليان الماء (كما في محطات التجميد ومبردات السيارات).

5 – تكون سدادة محكمة للسوائل والغازات (pressure tightness).

وأهم سبائك اللحام والتوصيل التي تناسب المواصفات السابق ذكرها هي المكونة من القصدير والرصاص، ويوجد عدد آخر من السبائك المناسبة للاستخدامات نفسها، وهي مكونة من القصدير والأنتيمون أو القصدير والفضة، بالإضافة إلى السبائك الثنائية المذكورة فهناك مجموعات من السبائك الثلاثية من : القصدير – رصاص – فضة. ويوضح الجدول (4–10) سبائك اللحام المختلفة وخواصها واستخداماتها.

تختلف تصرفات سبائك اللحام حسب ظرف الاستخدام، ومن المفيد ذكر عدد من النقاط المهمة المتعلقة بخواص سبائك اللحام التوصيل وتصرفاتها تحت الظروف مختلفة، حتى يكون المستخدم على بينة من تصرفات تلك السبائك تحت الظرف المختلفة التالية:

1 – مقاومة سبائك اللحام المحتوية على القصدير أعلى عند درجات الحرارة المنخفضة من مقاومتها عند درجات الحرارة العالية، أما عند درجات حرارة التجمد – أو في مناطق الصقيع – استخدام السبائك الغنية بالرصاص المحتوية على (20%) قصديراً، نظراً إلى أن مطيلية السبائك عالية القصدير تنخفض كثيراً بانخفاض درجات الحرارة، كما تفقد المادة مقاومتها للصدمات.

2 – هناك فرق أساسي وجوهري بين سبائك اللحام اللينة المستخدمة عند درجات الحرارة المنخفضة في حدود تتراوح ما بين (100°C) و (200 °C) وسبائك اللحام على الساخن – الذي يتم عند درجات حرارة عالية في حدود من (700 °C) و (800 °C) فإن اللحام الطري لا يصهر الفلزات المراد توصيلها، ويتم عندئذ التفاعل بين سبيكة اللحام والفلز المراد توصيله، حيث تتكون طبقة من المركب الفلزي المتداخل بين الجزأين الموصلين، فمثلاً في حالة توصيل النحاس يتكون المركب (Cu_6Sn_5)، ويعمل هذا المركب كرابط بين الطرفين الموصلين، بينما اللحام عند درجات الحرارة العالية على أساس صهر الجزأين المراد توصيلهما، حيث يتخلل كل جزء في الآخر دون أن يتكون أي مركب وسيط لتوصيل الطرفين.

3 – يفضل عند استخدام سبائك القصدير في اللحام الإلكتروني أن يكون التركيب أقرب يكون لنقطة الأيوتكتيك، أي سبيكة مكونة من (61.9% قصديراً – 38.1% رصاصاً) للاستفادة من انخفاض درجة حرارة الانصهار (183 °C) بالإضافة إلى حسم قابلية بلل السطح، وكذا تحول السبيكة مباشرة من الحالة السائلة إلى الحالة الجامدة وذلك بسبب انخفاض مدى التجمد. أما في الأعمال التي لا تتطلب القدر نفسه من الدقة، فتستخدم سبائك ذات نسبة أقل من القصدير.

4 – تعد السبائك الثنائية من القصدير والرصاص أساس سبائك اللحام أو التوصيل، وهناك مجموعات أخرى: بعضه من القصدير والأنتيمون، والبعض الآخر من القصدير والفضة، وكذا المجموعات الثلاثية من القصدير – رصاص – فضة. أما سبائك القصدير–أنتيمون–

فضة فتستخدم في لحام وتوصيل الأجهزة الكهربائية العاملة عند درجات حرارة عالية، وهذه السبيكة ذات درجة توصيل كهربائي أعلى من السبائك المحتوية على الرصاص، كما تستعمل سبائك القصدير – أنتيمون – فضة في لحام أوعية وآنية الطعام والأغذية خوفاً من آثار الرصاص السامة.

5 – تتمتع سبائك اللحام والتوصيل بعدد من المميزات، أهمها ما يلي:

(أ) سهلة سريعة الاستخدام.

(ب) يوجد تنوع ومدى واسع لتقنية عمليات التسخين المستخدمة، وهي بوجه عام لا تحتاج إلى درجة حرارة عالية.

(ج) أرخص وأقل كثيراً في التكلفة من طرق اللحام الأخرى.

(د) لا يحدث تغير في التركيب البنائي للفلز أو السبيكة الأصلية المراد توصيلها، نظراً لانخفاض درجة الحرارة التي يتم عندها التوصيل، على العكس من اللحام عند درجات الحرارة العالية التي تؤثر في التركيب البنائي للأجزاء المجاورة لمنطقة اللحام.

(هـ) يسهل التخلص من الوصلة وفصلها عند الحاجة لذلك، ويتم الفصل بمجرد التسخين البسيط ودون ظهور أي تغير على المادة الأصلية.

(و) يمكن إعادة التوصيل والفصل مرات عديدة دون مشكلات تذكر ودون أن تعاني المادة الموصلة من أية آثار جانبية أو تغيرات في تركيبها البنائي. ولكن يعيب سبائك اللحام والتوصيل فقط انخفاض المقاومة الميكانيكية للوصلة، والتي تشكل خطورة عند تحميل المادة، حيث تكون منطقة التوصيل هي نقطة الضعف فيها والتي ربما يحدث عندها فشل وانهيار المادة.

سبائك المحامل Bearing alloys

يطلق على هذه السبائك أسماء متعددة بجانب اسم سبائك المحامل، فتعرف أحيانا باسم الفلزات البيضاء (white metals)، وأحيانا أخرى باسم البابيت (babbit metals)، ويرجع اسم "بابيت" إلى اسحاق بابيت الذي اكتشف هذه السبيكة في عام (1893 م) والتركيب نفسه الذي استخدمه اسحاق بابيت هو بالتمام ما سجله ليوناردو دافنشي قبل ذلك بقرنين من الزمن. الجدول(4-12)

جدول (4-10): تركيب سبائك القصدير و خواصها الميكانيكية (Allen, 1977)

السبائك	التركيب				الخواص الميكانيكية				الحالة
	Sn قصدير	Sb أنتيمون	Cu نحاس	أخرى	مقاومة الشد $\times 10^2$ MPa	مقاومة القص $\times 10^2$ MPa	النسبة المئوية للاستطالة (*)	رقم برنل للصلادة	
سبائك القصدير البسيطة:									
قصدير نقي	99.98				31		55(*)	5.3	صب
مستقيم	99.8				21		55		صب
صلبة	99.6		0.4		40		55		(80%) تخفيض في السمك
سبائك اللحام:									وصلة لحام
أنتيموني	96	5.0			142	111			وصلة لحام
فضة	95			5.0Ag	140	106			وصلة لحام
طرية	70			3.0Pb	142	111			وصلة لحام
أيوتكتيك	63			37.0Pb	290	80			
طرية	50			50.0Pb	61	60	70	14.5	
بابيت:						مقاومة			
سبيكة 1	91	4.5	4.5		93	الضغط	2.0	17	صب مبرد
سبيكة 2	89	7.5	3.5		112	44	2.0	24	صب مبرد
سبيكة 3	84	8.0	8.0		100	61	1.0	27	صب مبرد
سبيكة 4	75	12.0	3.0	10.0Pb	80	66	1.5	24	صب مبرد
سبيكة 5	65	15.0	2.0	18.0Pb	78	55	1.5	22	صب مبرد
						50			

(*): الطول القياسي : 10 سم

جدول (4-11): بعض سبائك التصدير المستخدمة وصلات اللحام اللينة.

التركيب الكيميائي					درجة حرارة الانصهار °C	نوعية الاستخدام
عناصر أخرى	Pb رصاص	Sb انتيمون	Ag فضة			
100					232	لحام الخط الجانبي للطب، الوصلات المقاومة للرطوبة غير سامة.
64	35.8-35.4	0.2-0.6	-	-	185-183	الوصلات الكهربائية والإلكترونية في الأجهزة المهمة.
60	39.8-39.5	0.2-0.5	-	-	188-183	لحام الخط الجانبي
50	49.5	0.5	-	-	212-183	وصلات الألواح الفلزية والأغراض الهندسية الخفيفة.
40	59.6	0.4	-	-	234-183	الأغراض الهندسية العامة، والوصلات الأنبوبية الدقيقة، وخط اللحام الجانبي للطب.
30	59.7	0.3	-	-	225-183	أعمال الوصلات المنزلية والأعمال الصحية، وصل الكابلات الكهربائية، ومزدانات محركات السيارات.
20	79.8	0.2	-	-	276-183	
10	89.5	0.5	-	-	381-267	مزدانات محركات السيارات، وقواعد المصابيح الكهربائية.
2	98	-	-	-	325-320	انثلاجات الكهربائية، والدوائر الكهربائية الخفيفة.
50	47-47.5	3.0-2.5	-	-	204-185	خط اللحام الجانبي للطب.
40	57.8-58.0	2.4-2.0	-	-	227-185	هذه أرخص وأقوى من السبائك التي لا تحتوي على الأنتيمون وهي مناسبة فقط للاستخدام في توصيل المواد التي لا تحتوي على زنك فيها.
30	68.2-68.5	1.8-1.5	-	-	248-185	
62	35.8	0.2	2	-	184-178	تخفض من معدل التمثل في المواد المحتوية على الفضة وذات مقاومة أعلى للرطوبة أكثر من سبائك التصفير –40% رصاص.
95	-	5	-	-	243-236	تستخدم عند درجات الحرارة العالية –مقاومة للرطوبة.
96.5	-	-	3.5	-	221	تستخدم عند درجات الحرارة العالية –مقاومة جيدة للرطوبة –تقلل من تآكل الفضة المطلية على الفضة – غير سامة.
1	97.5	-	1.5	-	310-309	الأجهزة العاملة عند درجات الحرارة العالية أو عند درجات الحرارة المنخفضة.
5	93.5	-	1.5	-	301-296	الأجهزة العاملة عند درجات الحرارة المنخفضة (تحت الصفر).
30	52	-	-	18 Cd	145	وصلات العوازل الحرارية –لحام الأجزاء.
80	-	-	-	20 Zn	270-200	لحام الألمنيوم.
48	-	-	-	52 In	117	وصلات الزجاج والحراريات.

وتتكون السبائك التي اقترحها "بابيت" من القصدير كقاعدة للسبيكة بإضافة 7% أنتيمون و 3% نحاس، ولا يزال هذا التركيب نفسه- تقريبا- مستعملا في الوقت الراهن. ويتراوح القصدير في سبائك البابيت أو سبائك المحامل الحديثة ما بين (65%) و (91%) أما السبائك التي أساسها الرصاص، فقد تم استعراضها سابقا. ويضاف إلى القصدير عناصر الأنتيمون والنحاس وتصل نسبة الأنتيمون المضاف إلى (12%) بينما تصل نسبة النحاس إلى (10%) وذلك في السبائك المستخدمة تجارياً.

يحسن قبل الدخول في تفاصيل التركيب الكيميائي والبناء الميكروسكوبي لسبائك المحامل أن نلقي نظرة على أهم خواص ومواصفات هذه السبائك حتى يمكن التعرف على أساس تطويرها. وفيما يلي إيجاز لأهم الخواص والمواصفات المطلوبة في سبائك المحامل.

1- خواص سطحية تقوم بجذب طبقة رقيقة من مادة التزييت أو زيت التشحيم والتزليق والاحتفاظ بها، كما يجب أن تقاوم مص الزيت لداخل كتان السبيكة.

2- مقاومة عالية للتشكيل أو التشوه بالأحمال المترددة أو الثابتة.

3- صلادة مناسبة وكافية لمقاومة البلى ومقاومة التحات الميكانيكي.

4- تكيف وتوافق جيدان وهذا يعني قابلية تعديل جيدة لموازنة أي عدم انطباق أو تشوه في عمود الإدارة.

5- تطويق محكم لامتصاص أي حطام أو رايش (شوائب) ناتجة من عمليات احتكاك الأسطح معا.

6- مقاومة عالية ضد التآكل.

وللأسف تتعارض بعض هذه المتطلبات معا،فمثلا المتطلبان (2) و (3) يعنيان صلادة عالية، بينما المتطلبان (4) و (5) يعنيان ليونة وطراوة في المادة. وعلى هذا فإن سبائك المحامل تمثل بالضرورة المواءمة بين هذه العوامل المختلفة والموازنة بين الخواص المتباينة للوصول إلى أفضل مواصفات.

وتعطي اختبارات الكلال التقليدية – وهي ذات أهمية أفضل بكثير من قياس مقاومة الشد-صورة أكثر وضوحا. ونتائج أكثر دلالة على مدى مناسبة سبائك المحامل المختلفة للاستعمالات المختلفة، ولكنها لا تربط تصرف المادة في ظروف الحائط الرقيق من قاعدة المحمل ((bearing block أو لقمة الارتكاز (bearing) ولا توضح كيفية عملها. وأفضل الطرق بلا شك هي قياس تصرف هذه المواد في ظروف مشابهة تماما لظروف عمل المكنات، ولقد صمم

الكثير من التجارب لقياس تصرفات سبائك المحامل التجارية تحت ظروف مماثلة لظروف العمل وخاصة في تطبيقات استخدام وعمل السيارات.

جدول (4-12): سبائك المحامل البيضاء (Barry and Thwaites) (BS3332;1961).

التركيب الكيميائي (%)				درجة السبيكة
Pb رصاص	Cu نحاس	Sb انتيمون	Sn القصدير	
< 0.35	3.25	7.5	>88.9	3332/1
< 0.35	4.25	9.25	>86.15	3332/2
4	5	10	>80	3332/3
9.5	3.5	12	75	3332/4
15	3	7	75	3332/5
28	3	10	59	3332/6
>75	0.75	13.5	12	3332/7
78.5	< 0.5	15.5	5.5	3332/8
(1)	1.5	-	68.5	3332/9
(1) يمثل الباقي هنا عنصر زنك الذي تصل نسبته إلى 30%				

ويتضح أيضاً من المواصفات المطلوبة في سبائك التحميل أن السبيكة المتجانسة (السبائك وحيدة الوجه) لا تناسب هذا الغرض، لذلك فإن الفلز الوحيد وكذلك سبيكة المحلول الجامد – متجانسة الخواص ووحيدة الوجه– لا يصلحان للاستخدام بنجاح في هذا الغرض،وأفضل المواد الفلزية (السبائك) هي المكونة من بلورات فلزية صلدة مليئة بعروق من المركبات الطرية أو اللينة (سبائك ذات وجهين). وعلى الرغم من توافر هذه المواصفات في سبائك المحامل، إلا أن المواد الفلزية مهما كان نوعها ليست ذات معامل احتكاك صغير من تلقاء نفسها، ولكن يتحقق ذلك باحتفاظها بآثار ولو قليلة جدا من زيت التزييت أو التزليق (lubricant oil) ويتحقق ذلك في سبائك المحامل من خلال:

1- أن تلتصق بسطح سبيكة كرسي التحميل طبقة رقيقة من مواد التشحيم، وتمتاز سبائك القصدير عن غيرها بطبيعة تبلل أسطحها بصورة أفضل من أي سبائك أخرى.

2- أن تحتوي السبائك على قنوات (بحيرات (pools تحتفظ بكميات من زيت التزليق وهكذا تساعد هذه البحيرات على انتشار زيت التزليق على سطح المحمل من هذه البحيرات، إلى المواضع التي تحتاج إليه.

وقد بني عمل هذه السبائك على أساس على أن الجزيئات الصلدة تعمل كأرضية ((pavement لمساندة الحمل، بينما يغوص الكتان الطري قليلا إلى مستوى أقل من مستوى الأرضية مؤدياً إلى تكوين عدد من القنوات أو البحيرات التي تحتفظ بزيت التزليق، ومن ثم تقوم هذه القنوات بمد السطح الخارجي بمادة التزليق عند الحاجة إليها.

وهذه النظرية عن طبيعة عمل سبائك المحامل هي نقطة اختلاف وعدم اتفاق بين العاملين في هذا المجال، نظرا لأن سبائك الألمنيوم – قصدير ذات الكفاءة العالية في مجال المحامل هي ذات كتان صلد وتحتوي على كثير من الجزيئات الموزعة بغير انتظام في الكتان، وهذه الجزيئات غير منظورة، وتتركب من القصدير الطري، وعلى الرغم من الاختلافات، إلا أن التفسير السابق ما زال معمولا به حتى الآن، وذلك لعدم وجود نظرية أفضل منها.

يمكن تقسيم سبائك المحامل إلى ثلاث مجموعات : سبائك عالية القصدير، وسبائك عالية الرصاص، وسبائك تحتوي على كميات مناسبة من القصدير والألمنيوم. وفي المجموعات الثلاث فإن عناصر السبائكية الرئيسة التي تسبب الصلادة هي الأنتيمون والنحاس. وتتكون نتيجة إضافة الأنتيمون مركبات فلزية متداخلة موزعة في كتان السبيكة ومغروسة فيه، والمركبات الفلزية المتكونة واحدة في المجموعات الثلاث من سبائك المحامل، ولكنها تختلف في التركيب والخواص ويوضح جدول (4–12) التركيب البنائي لعدد من هذه السبائك.

تعد السبيكة المحتوية على (93%) قصدير و (3.5%) أنتيمون و(3.5%) نحاس من أهم السبائك المفضلة في محامل محركات الطائرات، كما أنها واحدة من أقل السبائك التي تم إنتاجها للاستخدام في ظروف العمل الصعبة والشاقة، وكذلك في الظروف الحرجة. ولما كانت كمية الأنتيمون المذابة في القصدير تصل إلى (7%)، لهذا تظهر البلورات المكعبة. ويكون النحاس مركبات جديدة مع القصدير، وتنفصل تلك المركبات جزئيا عند التبريد مكونة شبكة من البلورات الأبرية الرفيعة. والبلورات الأبرية المتكونة صلدة، وتظل مغروسة في كتان سبيكة القصدير رافعة من صلادته. ويساعد التركيب البنائي للسبيكة بهذه الكيفية على مقاومتها للصدمات وإجهادات الانحناء، وكذلك مقاومتها لقوى الاهتزازات السريعة المترددة.

وتعد السبيكة المتكونة من (86%) قصدير و (10.5%) أنتيمون و (305%) نحاس مثالاً آخر لهذا النوع من سبائك المحامل، ولكنها أرخص وأقل تكلفة، ولكن يعيب هذه السبائك أن مقاومتها للاحتكاك ليست بالمستوى نفسه من جودة السبيكة السابقة عالية القصدير. ويتم في السبيكة

منخفضة القصدير انفصال بلورات القصدير المحتوية على النحاس أولا، وباستمرار التبريد وعند درجات حرارة أقل تنفصل بلورات القصدير أنتيمون المكعبة.

وإضافة إلى ماسبق ذكره عن سبائك التحميل فهناك بعض النقاط المهمة المرتبطة بالتركيب البنائي لهذه السبائك وهي على النحو التالي :

1- المركبات الابرية هي عبارة عن بلورات من المركب الفلزي (Cu_6Sn_5)عند نسبة أنتيمون حوالي (8%) ولكنها تغير تركيبها وتصبح (CuSn) عندما تنخفض نسبة الأنتيمون الى (3.5%).

2- مكعبات المركب (SbSn) أقل كثافة من السائل الذي انفصلت عنه، وفي حالة التبريد البطيء فهي تتركز وتتجمع معا. والنظرية التقليدية لذلك، أن الانفصال الأولي للمركبات الأبرية من (Cu_6Sn_5) يكون شبكة يتعثر فيها المركب (SbSn)، ولهذا فهي تمنع تمركزها. وهناك نظرية أخرى تقول إن انفصال مكعبات (SbSn) يبدأ من نويات (Cu_6Sn_5) الأولية ولذا فهي تنمو حولها.

3- يوجه عام تزيد مقاومة الشد والانضغاط وصلادة سبائك: القصدير – أنتيمون – نحاس بزيادة نسبة الأنتيمون والنحاس ولكنها تخفض من مطيلية السبائك – والسبيكة المحتوية على نسبة من النحاس بين (8%) و(10%)هي الأقل مطيلية.

4- مقاومة سبائك المحامل للكلال أكثر أهمية من مقاومتها للشد. ويوجه عام تزيد مقاومة الكلال بزيادة نسبة الأنتيمون، ويكون التأثير أوضح عندما تكون السبيكة في حالة المحلول الجامد أي تحتوي على حوالي (8%) أنتيمون. ويقل تأثير الانتيمون في رفع مقاومة السبيكة للكلال عند رفع نسبته الى أعلى من (8%)، كما تزيد إضافة النحاس من مقاومة هذه السبائك للكلال.

5- تزيد إضافة البزموث أو التيلوريوم أو الكادميوم بكميات صغيرة، حوالي (1%)، من مقاومة سبائك المحامل للكلال. وفي حالة الأحمال العالية فإن بعض المصنعين والمنتجين يضيفون حوالي (1%) كادميوم لهذه السبائك لزيادة مقاومتها، كما تضاف بعض العناصر الأخرى مثل الفضة والنيكل وحديثا البيريليوم أو الكروم بهدف تهذيب – تصغير – حجم الحبيبات، وبالتالي رفع مقاومة هذه السبائك للكلال بدرجة كبيرة.

6- زيادة درجة الحرارة أثناء العمل والاستخدام تزيد من حجم حبيبات سبائك المحامل الغنية بالقصدير ؛ نظرا لأن بلورات المحلول الجامد من القصدير –أنتيمون غير متجانسة

(anisotropic). ويسبب التغير في درجة الحرارة توليد الإجهادات الداخلية صغيرة القيمة بعد عدد من الدورات الحرارية مؤدية بالتالي إلى زحف البلورات. ويؤدي الزحف بدوره إلى ظهور سلالم (خطوات أو مصاطب) بصورة كبيرة على حدود الحبيبات، ويعد هذا سببا في فشل المادة

البيوتر Pewter

البيوتر سبائك قوامها الأساسي القصدير - تزيد نسبة القصدير في هذه السبائك على (90%)- وتحتوي على الرصاص ونسب متفاوتة من الأنتيمون والبزموث.

والتركيب الكيميائي لسبيكتين من سبائك البيوتر ، موضح في جدول (4-13) وتستخدم هذه السبائك بكثرة في الآنية والأوعية والأغراض المنزلية وكذلك للزينة والحلي. ويمكن الحصول على أسطح مختلفة الألوان – طبقا لدرجة الإنهاء السطحي– بين اللون الساطع إلى المؤكسد الغامق، وتباين درجات تشطيب السطح تضيف إلى هذه الأسطح كثيراً من الجمال. وقد أدى الحصول على هذه الدرجة من الجمال إلى أن يحل البيوتر في الوقت الحالي محل الأشياء المصنعة من الفضة في الأغراض المنزلية التي استعملت كثيراً في الماضي. كما يصنع من البيوتر– باستخدام أسلوب الصب بالقوة الطاردة المركزية– التماثيل والأشكال الفنية الجمالية المختلفة.

جدول(4-13): التركيب الكيميائي لسبيكتي البيوتر (BS, St 40, (Charmn 1977).

السبيكة	القصدير	نحاس		أنتيمون		رصاص	كادميوم
		أقصى نسبة منوية	أقل نسبة منوية	أقصى نسبة منوية	أقل نسبة منوية	أقصى نسبة منوية	أقصى نسبة منوية
A	ليست أقل من 91%	2.5	1.0	7.0	5.0	0.5	0.05
B	ليست أقل من 93%	2.5	1.0	5.0	3.0	0.5	0.05

لقد استخدمت سبيكة البيوتر في عصر الرومان، وفي الماضي أطلق اسم"بيوتر"على أي فلز أو سبيكة تحتوي على نسبة عالية من القصدير ، وبوجه خاص استخدم هذا التعبير لسبائك القصدير – رصاص. ولقد ساعد انخفاض درجة حرارة انصهار هذه السبائك إضافة إلى تمتعها بدرجة عالية من الانسيابية على صب وسباكة أصعب الأشكال وأشدها تعقيدا.

إن أساس استخدام البيوتر هو سهولة تصنيعه بالصب ثم تجميعه في الشكل المطلوب. ومقاومة المنتج النهائي ليست ذات أهمية، كما في حالة الأدوات المنزلية مثل أوعية الشاي أو ما شابه ذلك، ولكن يجب أن تكون مقاومتها في حدود معقولة، والبيوتر المصبوب أعلى مقاومة من نظيرتها المصنعة من الشرائط والرقائق؛ نظرا لأن البيوتر يلين أثناء الدلفنة كما سبق ذكره، ولكن إضافة (2.0 %) بزموث أو (0.1 %) فضة إلى سبائك القصدير – أنتيمون – نحاس يساعد على إمكانية تشكيل السبائك عند درجة الحرارة (150) مئوية دون أن تفقد المادة صلادتها الناتجة عن التشكيل. والخواص الميكانيكية – الصلادة – لثلاث من سبائك البيوتر تحت ظروف تشكيل مختلفة موضحة في جدول (4–14) ويتضح من الجدول أن أفضل طرق التشكيل هي الدلفنة ثم التلدين وذلك للحصول على أعلى صلادة ممكنة.

جدول (4-14): صلادة سبائك البيوتر بعد التشكيل والمعالجة الحرارية. (Alten,1977)

التركيب الكيميائي الاسمي(%)				رقم فيكرز للصلادة		
قصدير	أنتيمون	نحاس	إضافات أخرى	كما هي مصبوبة	بعد الدلفنة	دلفنة 90% تلدين لمدة ساعة عند 80°C
92.5	6.0	1.5	-	2.3	13	19
92.4	6.0	1.5	0.1 Ag	2.6	13	24
91.5	6.0	1.5	2.0 Bi	3.0	15	28

سبائك القصدير قوالب الصب Die–cast alloys

إن سبائك القصدير هي أولى السبائك جميعا بصناعة قوالب الصب – وهي مستخدمة كثيرا الآن – نظرا لانخفاض درجة حرارة انصهارها وسيولتها العالية جدا.

ولقد سهل ذلك إنتاج صبات وتصميمات معقدة وخالية من العيوب دون تدمير أو إتلاف القالب أو الحاجة إلى تغييره.

ولقد استخدمت هذه التقنية لسبائك العناصر ذات درجات حرارة الانصهار العالية وذات المقاومة الأكبر مثل سبائك عناصر: الألمنيوم والزنك، ولقد توسع إنتاج قوالب الصب من سبائك الألمنيوم والزنك لدرجة أنها قد حلت محل سبائك القصدير وأخذت مكانها، وتضاءل كثيراً إنتاج قوالب سبائك القصدير. ولكن رغم ذلك فما زالت سبائك القصدير قوالب الصب تحتل موقعا مهما؛ نظرا لما تمتاز به سبائك القصدير، وأهم مميزاتها ما يلي:

1- انخفاض درجة حرارة انصهار سبائك القصدير، وبالتالي انخفاض درجة حرارة الصب.

2- لا تتلف سبائك القصدير أو تدمر قوالب الصب انظرا لانخفاض درجة حرارة الصب وكذلك لانخفاض معامل احتكاك القصدير.

3- إمكانية صب سبائك القصدير بأبعاد كبيرة حيث يصعب ذلك مع سبائك العناصر الأخرى، ويرجع ذلك إلى الانسيابية العالية لسبائك القصدير المنصهرة ويساعد ذلك على ملء أية فراغات في الشكل المصبوب.

4- إمكانية صب سبائك القصدير بدرجة عالية من الدقة في الأبعاد مقارنة بالسبائك الأخرى، ويعود ذلك إلى انخفاض معامل انكماش تلك السبائك عند التبريد مقارنة مثلا بسبائك الألمنيوم.

وترجع الظواهر المميزة لصب سبائك القصدير للسببين التالين:

(أ) انخفاض درجة حرارة التشكيل (الصب)، وهذا يمنع أو يقلل من تشوه القالب.

(ب) صغر معامل الانكماش الحراري للصبة من درجة حرارة التجمد حتى درجة حرارة الغرفة.

يمكن صب قطاعات صغيرة من القصدير وسبائكه بدرجة من الدقة تبلغ (±0.02%) مع صغر سمك القطعة حتى (0.05) مم. وسبائك القصدير المصبوبة ذات مدى واسع من التركيب كما هو مبين في جدول (4-14)، ويعتمد اختيار تركيب معين أو سبيكة بعينها على عدة عوامل منها:

1- الغرض الذي ستستخدم فيه هذه المادة.

2- الخواص الميكانيكية المطلوبة، حيث يمكن رفع المقاومة بزيادة نسبة الأنتيمون.

3- مقاومة التآكل الحتي، ويتم رفع مقاومة المادة للتآكل بزيادة نسبة الأنتيمون المضاف.

4- الكلفة المسموح بها.

5- مقاومة الاحتكاك، ويمكن الحصول على أقل نسبة من الاحتكاك من خلال إضافة كمية من الرصاص.

وبالرغم من المميزات العديدة التي سبق ذكرها، إلا أنه يجب ملاحظة تجنب درجات التشكيل العالية، وذلك بالتحكم في كمية العناصر المضافة، وبالذات العناصر ذات الذائبية المحدودة في القصدير المنصهر. فمثلا إضافة النحاس بكمية في حدود (8%) ترفع درجة حرارة الانصهار إلى حوالي (400) مئوية، وبالتالي تزيد المخاطر الناجمة من السبيكة المنصهرة وبالذات تآكل قوالب الصب أو أجزاء من مكنات التشغيل. أما إضافة الرصاص فتنتج مصاعب في السباكة،

وكذلك زيادة نسبة الانكماش الحادث عند التبريد من درجة حرارة الصب إلى درجة الحرارة العادية.

ويشكل عنصر الانتيمون الإضافة الأساسية لسبائك قصدير قوالب الصب، نظرا لأنه يساعد على عملية الصب، ولكن يمكن إضافة عناصر أخرى مثل النحاس والرصاص.

تستخدم سبائك القصدير قوالب الصب في أغراض كثيرة، كما هو مبين في الجدول(4-15)، وتقاوم هذه السبائك التآكل بدرجة كافية للاستخدامات المطلوبة، ويمكن تحسين مقاومتها للتآكل بدرجة أعلى، وذلك بطلاء السبائك أو تغطية أسطحها بالأسايب الكهروكيميائية.

جدول (4-15): التركيب الكيميائي لبعض سبائك القصدير في قوالب الصب وأهم استخداماتها. (Barry and Thwaites, 1983)

التركيب الكيميائي للسبيكة (%)				الاستخدامات
انتيمون Sb	نحاس Cu	رصاص Pb	قصدير Sn	
30-40	-	-	60-70	عدادات الغاز المنزلقة والشبكات
25		25	50	
20	5	-	75	موازن العجلات الميكانيكية
17-10	8-2	12-4	63-84	هياكل وحقائب الأجهزة الكهربائية
11	-	86	3	مقاومات الأوزان
7-4	2-1	-	91-95	أجزاء الديكور والزخرفة والحلي
-	-	42	58	قواعد الشمعات المنزلية

سبائك القصدير الصهورة (Fusible tin alloys):

يطلق اسم السبيكة الصهورة (Fusible alloys) على السبيكة التي تنصهر عند درجة حرارة منخفضة، عادة أقل من درجة حرارة الانصهار القصدير النقي أو سبائك اللحام الطرية، والسبائك الصهورة هي التي تتكون عند نقطة الايوتكتيك بين القصدير وعناصر السبائكية مثل: البزموث أو الرصاص أو الانديوم أو الكادميوم أو بين ثلاثة من هذه العناصر أحدها القصدير. وتركيب ودرجات حرارة انصهار هذه السبائك مبينة في جدول (4-16). كما أن بعض الخواص الميكانيكية لهذه السبائك موضحة في جدول (4-17).

جدول (4-16): التركيب الكيميائي ودرجات حرارة انصهار بعض سبائك القصدير الصهورة (Barry and Thwaites,1983).

نوع السبيكة	التركيب الكيميائي (%)					مدى الانصهار			
	قصدير Sn	بزموث Bi	رصاص Pb	كادميوم Cd	عناصر أخرى	التجمد		درجة السيولة	
						°C	F	°C	F
أيوتكتيك ثنائي	62.0	-	38.0	-	-	183	361	183	361
أيوتكتيك ثنائي	67.0	-	33.0	-	-	176	349	176	340
أيوتكتيك ثلاثي	51.2	18.2	30.6	-	-	145	293	145	293
أيوتكتيك ثلاثي	48.8	10.2	41.6	-	-	138	281	166	331
أيوتكتيك ثنائي	43.0	57.9	-	-	-	138	281	138	281
سبائك تجارية	58.0	-	-	-	42In	117	243	145	292
أيوتكتيك ثنائي	48.0	-	-	-	42 In	117	243	117	243
سبائك تجارية	14.5	48.0	28.5	-	9 Sb	103	217	227	440
أيوتكتيك ثلاثي	53.9	-	-	20.2	-	103	217	103	217
سبائك تجارية	33.0	34.0	33.0	-	-	96	205	143	289
سبائك روز	22.0	50.0	28.0	-	-	96	205	110	230
سبائك نيوتن	18.8	50.0	31.2	-	-	96	205	97	217
أيوتكتيك ثلاثي	15.5	52.5	32.0	-	-	96	205	96	208
أيوتكتيك ثلاثي	17.0	57.0	-	-	26 In	79	174	79	174
أيوتكتيك ثنائي	-	33.2	-	-	66.3 In	72	162	72	162
أيوتكتيك ثنائي	15.4	38.4	30.8	15.4	-	70	158	97	207
سبائك تجارية	11.3	42.5	37.7	8.5	-	70	158	90	194
سبائك تجارية	13.0	42.0	35.5	10.0	-	70	158	80	176
فلز وود	12.5	50.0	25.0	12.5	-	70	158	72	162
أيوتكتيك رباعي	13.1	48.5	27.3	10.0	-	70	158	70	158
أيوتكتيك ثلاثي	12.0	49.0	18.0	-	21.0 IB	57	136	57	176
أيوتكتيك رباعي	8.3	44.7	22.6	5.3	19.4 IB	47	117	47	117
أيوتكتيك ثنائي	8.0	-	-	-	92.0 Gb	20	68	20	68

يمكن تقسيم سبائك القصدير الصهورة الى ثلاث مجموعات : المجموعة الأولى: أساسها الايوتكتيك الثلاثي بين القصدير والبزموث والرصاص، ودرجة حرارة انصهارها حوالي (96) مئوية. أما المجموعة الثانية فمكونة من القصدير والبزموث والرصاص والكادميوم، وتنصهر هذه المجموعة من السبائك عند درجة حرارة حوالي (70) مئوية، وبعض سبائك هذه المجموعة تعرف باسم فلز (وود) (Wood`s metal). والمجموعة الثالثة ودرجات حرارة انصهارها أعلى من درجة حرارة انصهار المجموعة الأولى والمجوعة الثانية، وهي ثنائية أو ثلاثية الأيوتكتيك. ويمكن التحكم في درجات حرارة الانصهار عن طريق إضافة عناصر أخرى، وتؤدي بعض الإضافات إلى تغيير درجات حرارة الانصهار لتتراوح ما بين (20) و (227) درجة مئوية، تبعا للعنصر المضاف. وبعض سبائك القصدير الصهورة قريبة من تكوين الايوتكتيك، وليس هناك

فرق بين خط السيولة وخط التجمد. كما أنّ هناك سبائك أخرى تتصهر في مدى من درجات الحرارة – وليس عند درجة حرارة محددة– والسبائك التي تتصهر في مدى من درجات الحرارة تناسب استخدامات محدودة ومعينة.

جدول (4-17): الخواص الميكانيكية التقريبية لبعض السبائك المصهورة. Barry and (Thwaites,1983)

التركيب الكيميائي								
قصدير Sn	بزموث Bi	رصاص Pb	انتيمون Sb	كادميوم Cd	مقاومة الشد Mpa	النسبة المئوية للاستطالة (l)	رقم برنل للصلادة	أقصى إجهاد Mpa أمان
43.0	57.0	-	-	-	55	200	22	3.4
14.5	48.0	28.5	9.0	-	90	1	19	2.0
13.6	49.0	27.5	-	10.0	41	220-6	20-9	2.1
12.5	50.0	25.0	-	12.5	31	3	25	-
6.3	44.7	22.6	-	5.4				

وتتنوع استخدامات سبائك القصدير المصهورة واستعمالاتها في تطبيقات مهمة ومنها:

1- أجراس إنذار الحريق والمصهرات(fuses): تصنع من السبائك المصهورة الوصلات ما بين جرس الحريق ووصلة المياه لتتصهر مباشرة وتتدفق المياه اللازمة لإطفاء الحريق. وكذا أنظمة تشغيل الأبواب، والتوصيلات والإنشاءات الكهربائية كما في بدالات التليفون أو سخانات المياه، حيث يتم حمايتها من زيادة التيار باستخدام مصهرات من السبائك المصهورة.

2- مبينات درجات الحرارة (temperature indicators): تستخدم السبائك المصهورة للتعرف على درجة الحرارة في الطائرات وأجهزة اختبار سبائك المحامل، نظرا لأن الطرق التقليدية غير مناسبة لهذا الغرض. واستخدام سبائك القصدير المصهورة في تلك المجالات ذو أهمية كبيرة، حيث يحتاج الأمر في مثل تلك الظروف إلى أعلى درجة من الدقة في التعرف على درجات الحرارة لتجنب أخطار الحريق والانهيارات.

3- حلقات مانعة للتسرب (Seals): تستخدم السبائك المصهورة في اللحام وخاصة للحلقات المانعة للتسرب، نظرا لأن تلك السبائك لا تؤثر في أجزاء المركبات الموصلة ولاتدمرها. فسبيكة اللحام المكونة من (10%) بزموث و (49%) قصدير و (41%) رصاص تصنع

منها الحلقات المانعة،كما يمكن استخدام السبيكة المكونة من (50%) قصدير و(50%) إنديوم في لحام الزجاج، أما أسنان حقن الجراحة فتصنع من سبيكة مكونة من(44%) قصدير و(28%) رصاص و (27%) بزموث و (1%) أنتيمون.

4- قطعة الشغل وممسك العدة (tool holding):عندما يكون المطلوب تصنيع أجزاء معقدة وصعبة التركيب، والمطلوب توصيل هذه الأجزاء معا بإحكام، فإن ذلك يتم بأن تجمع الأشكال وتضمن في السبيكة المصهورة، حيث تمسك معا ثم يتم التشكيل في الصورة المطلوبة، كما هو الحال في زعانف المراوح والتربيذات الغازية.

5- تشكيل الفلزات: يمكن أن تساعد سبيكة البزموث- الرصاص- قصدير – الكادميوم ذات درجة حرارة الانصهار المنخفضة – تنصهر عند درجة الحرارة (70) مئوية – على الانحناءات في الفولاذ المقاوم للصدأ، أو أية مواد فلزية أخرى باستخدامها كمقو داخلي، وبذا تمنع أية تعوجات أو انبعاجات.

6- صناعة البلاستيك (plastic fabrication): تستخدم بعض السبائك المصهورة خاصة سبائك البزموث – قصدير في رش قالب الصبة بطبقة سمكها من 1:7 مم، وتمتلئ هذه الغلالة وتملأ بالبلاستيك عند إنتاج البلاستيك في قوالب الصب.

4-6: النحاس وسبائكه:

4-6-1: تمهيد:

عرف النحاس واستخلص منذ عصور ما قبل التاريخ، ومن المحتمل أن يكون النحاس من بين أول العناصر التي استخدمها الإنسان، ويرجع ذلك لعدة أسباب منها: وجود النحاس في صورة منفردة ونقية، إضافة إلى الألوان البراقة والمميزة لمعدن النحاس التي لا يمكن تجاهلها، والتي يسهل جداً التعرف عليها، كما أن كثيراً من خامات النحاس يمكن اختزالها إلى فلز النحاس بيسر وسهولة دون صعوبات أو عقبات كبيرة، وأيضاً وجود النحاس بصورة فلزية في الكثير من الأقطار . ولكونه طرياً فقد أمكن بسهولة ودون أدنى متاعب تشكيله لأغراض الحلي والزينة إضافة إلى الاستخدامات المنزلية.

ونظراً لاحتواء خامات النحاس على فلزات أخرى متحدة معها ومرتبطة بها، فإن هناك احتمالاً قوياً أن سبائك النحاس قد أنتجت عن طريق صهر واختزال تلك الخامات. ومعظم المنتجات الفلزية التي صنعها الإنسان في العصور القديمة، والتي ما زالت موجودة حتى وقتنا هذا، كانت

مصنوعة من البرونز (bronze) - البرونز سبيكة من النحاس والقصدير - ومن المعتقد أن البرونز قد أنتج بالصدفة في بداية الأمر عن طريق صهر واختزال خليط من خامي النحاس والقصدير، ثم تمت عمليات تطوير هذه السبائك في وقت لاحق. ومن المحتمل أن يكون الإنسان الأول قد وصل إلى ذلك بالصدفة، ثم أخذ في التجريب والبحث لتطوير هذه السبائك، نظراً لحصوله على خواص أفضل من خواص فلز النحاس منفرداً.

ويمكن القول دون خطأ كبير إن الإنسان القديم وقبل أن يتعرف على الخواص المهمة والمتميزة للسبائك الحديدية قد مثل له البرونز حينذاك أفضل مادة فلزية من ناحية المقاومة والصلادة وإمكانية التشكيل إضافة لاستخدامه لصناعة السكاكين والحراب وأدوات الصيد والأدوات المنزلية الأخرى.

وقد جاء العصر البرونزي بعد العصر الحجري، ولكن هناك من بين علماء تاريخ الفلزات و المواد الهندسية من يعتقد أن هناك عصرا قد سقط بين هذين العصرين وهو العصر النحاسي (Copper Age). ومن المعتقد أن المصريين القدماء أول من استخلصوا فلز النحاس، وأهم منجم لإنتاج خامات النحاس في العالم في الوقت الحالي يقع في جمهورية التشيلي في أميركا الجنوبية، و قبل ثلاثين عاما مضت احتل النحاس المركز الثاني في إنتاج الفلزات في العالم بعد الحديد. وقد ساعد على استخدام النحاس بكميات كبيرة ما يتمتع به من تميز في خاصيتي التوصيل الكهربائي والحراري، ولكن في الوقت الراهن هبط مركز النحاس و احتل المرتبة الثالثة، وجاء الألمنيوم في المرتبة الثانية، و رغم ذلك فمازال النحاس يستخدم في الوقت الراهن بكميات أكبر من ذي قبل، وقد وصل الإنتاج العالمي ذروته في عام (1970) حيث بلغ مجموع المنتج من النحاس عالميا (6,854,000) طن وهو رقم لم يصل إليه العالم من قبل، و لكن ذلك الرقم أخذ في التناقص حاليا.

ولقد ساعد على استخدام النحاس بكميات كبيرة ما يتمتع به من تميز في خاصيتي التوصيل الكهربائي و الحراري، إضافة إلى خواصه الأخرى المتميزة مثل: مقاومة التآكل و إمكانية تشكيله بالسحب، وبالمثل تتمتع سبائكه المهمة بالخواص نفسها وكل تلك المميزات جعلت النحاس فلزا مفيدا و مهما للغاية.

خامات النحاس المتوافرة في العالم حاليا بكل أنواعها ذات درجة متدنية، نظرا لأن تركيز النحاس فيها منخفض، حيث يبلغ مدى تركيز النحاس في الأنواع الموجودة من الخامات في الوقت الحالي حوالي (1%)، و ربما يعود تبني نوعيات الخام المتوافرة في العالم حاليا إلى

استخدام الإنسان في العصور السابقة لمعظم الخامات الغنية بالنحاس عالية التركيز، و تدني نوعية الخام المتوافرة حاليا يعني أن الإنسان في الوقت الراهن مضطر، وليس أمامه أي بديل عن استخدام خامات النحاس الفقيرة بعد إجراء عمليات التركيز مما يزيد في تكلفة الاستخلاص و يقلل من الكميات المنتجة منه.

4-6-2: استخلاص النحاس:

تصنف خامات النحاس في ثلاث مجموعات: كبريتيدات النحاس و أكاسيد النحاس و النحاس في صورة منفصلة. و يعد خام كبريتيدات النحاس الأكثر أهمية، ومن أهم الكبريتيدات التي يحصل عليها في المنجم خام الكالكوسيت (Chalcocite) Cu_2S و خام كالكوبيريت (Chalcopyrite) $CuFeS_2$، أما خامات أكاسيد النحاس فتشمل على أكاسيد النحاس و مركبات منها متحدة مع الماء أو السيليكا أو غيرهما من الأكاسيد الأخرى. و يمكن أن يضاف لمصادر النحاس الأساسية مصدر مهم آخر، وهو ما يعرف باسم المصدر الثانوي و يأتي من مخلفات النحاس أو النحاس المستعمل الذي يطلق عليه خردة النحاس، حيث يمكن اعادة صهر و استخدام النحاس عدة مرات، وتعد هذه إحدى المميزات المهمة لفلز النحاس. ويتم تركيز كبريتيد النحاس بطرق التركيز المختلفة، لزيادة تركيز النحاس كما هو موضح في الشكل(4-24) وهو رسم تخطيطي لإنتاج النحاس من خام الكبريتيد.

يتم صهر النحاس و استخلاصه في الأفران الدوارة، حيث ينتج المات وهي خليط من كبريتيدي الحديد والنحاس - (وهناك نوع آخر من المات في حالة استخلاص النيكل ويكون المات عندئذ خليط من كبريتيدي النحاس والنيكل) إضافة إلى الخبث الذي يطفو على سطح المات، حيث يمكن فصلهما نظرا لاختلاف الكثافة. ويشحن المات بعد ذلك في أفران المحولات، حيث ينتج النحاس بالتحويل حيث يتم أثناء عملية التحويل أولا أكسدة كبريتيد الحديد حيث تنبعث خلال تفاعل أكسدة كبريتيد الحديد كمية كافية من الطاقة الحرارية التي تكفي لتسخين شحنة المحول وإتمام التفاعل، ولا توجد أي ضرورة لاستخدام أي وقود إضافي، بل بالعكس تضاف إلى المحولات أثناء التفاعلات كمية من خردة النحاس للتحكم في درجة الحرارة و تخفيضها. قبل بداية تفاعل كبريتيد النحاس مع الأكسجين و يطفو أكسيد الحديد على سطح المحول حيث يزال كصبة أولى على هيئة خبث من أكاسيد الحديد وبعد

إجراء عملية الصهر الأولى يدفع الهواء بعد ذلك حيث يتفاعل أكسجين الهواء الجوي مع كبريتيد النحاس محول الكبريتيد إلى النحاس مباشرة طبقا للتفاعل:

$$2Cu_2 + O_2 \rightarrow 4Cu + 2So_2$$

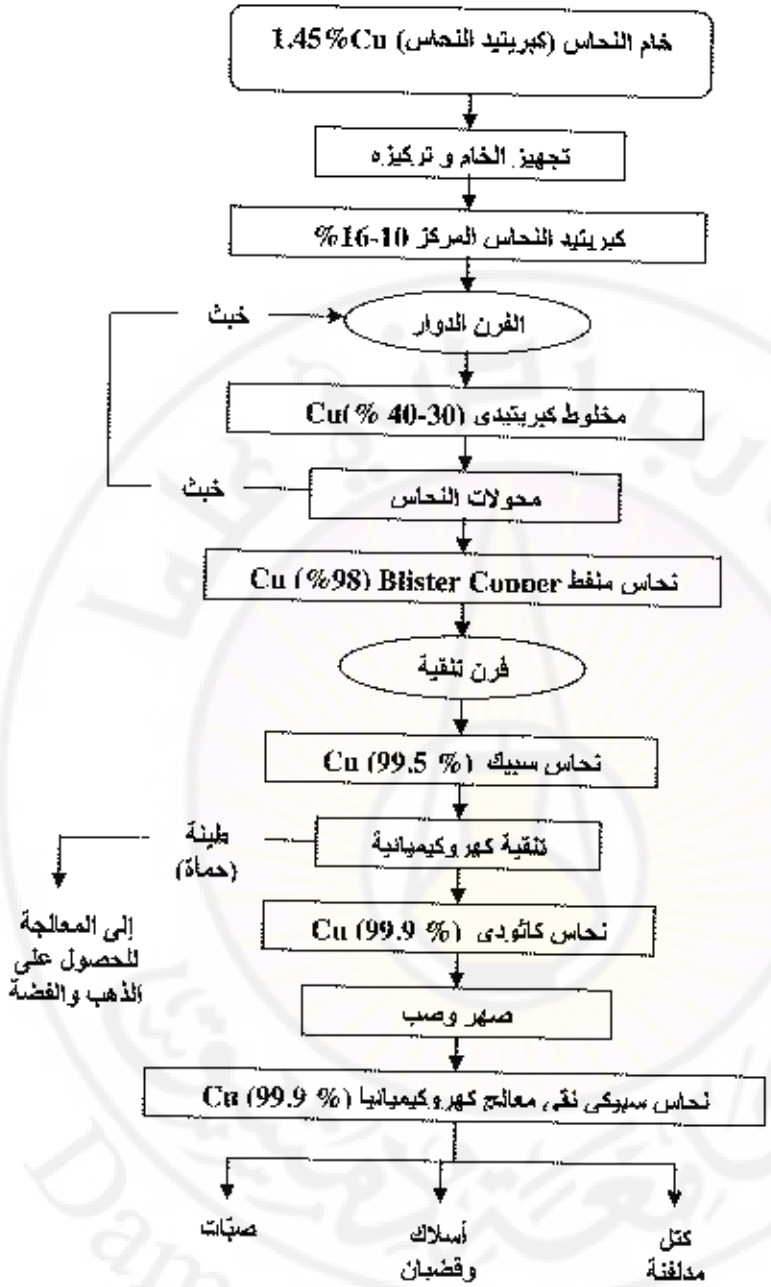
ويكون ناتج الخطوة الثانية من عملية التحويل عنصر النحاس المحتوي على بعض الشوائب الفلزية الأخرى، إضافة إلى جزء من النحاس في صورة أكسيد النحاس، وأكسيد النحاس الناتج من عملية التحويل هو نتيجة أكسدة النحاس المختزلة مع جزء من الهواء، وتحدث عملية أكسدة النحاس هذه قرب نهاية عملية التحويل.

يحتوي النحاس المنفط الناتج من الاختزال بالحرارة على حوالي 2% شوائب فلزية، ويمكن تنقية النحاس المنفط الناتج من عملية التحويل إما بالحرارة أو بالتنقية الكهروكيميائية، حيث تستدعي المواصفات الخاصة بالنحاس المستخدم في الأغراض الكهربائية أن تكون درجة نقاوته (99.9%) ويمكن الوصول لهذه الدرجة من النقاوة باستخدام التحليل الكهروكيميائي، وعند استخدام طريقة التنقية الكهروكيميائية لزيادة تركيز النحاس ورفع درجة نقاوته، فإنه يمكن أيضا الحصول على الذهب والفضة الموجودين في فلز النحاس المستخلص وذلك في حالة وجود الفلزين النفيسين مع خام النحاس، ويحتاج إعداد الخلية الكهروكيميائية لتكون مناسبا للتحليل الكهروكيميائي إلى فرن تنقية لافح تمهيدي، وتعرف هذه العملية باسم (التنقية بالصهر). (والصهر خشب يذاب منه الفار يضاف إلى النحاس عند تنقيته بالنار للتحكم بالمحتوى الأوكسجيني بالغازات المختزلة التي تتولد من احتراق الخشب في الفلز المنصهر)، ويتم في الفرن اللافح إزالة معظم الشوائب الفلزية في صورة أكاسيد و تتأكسد جميع العناصر الأخرى، لأن جميع الشوائب أكثر قابلية للتأكسد وأكثر اتحاد مع الأكسجين مقارنة بعنصر النحاس، وتزال المواد المؤكسدة في صورة خبث، ولكن يحدث أيضا في العملية نفسها أكسدة جزء من النحاس إلى أكسيد النحاس، و لكن أكسيد النحاس المتكون يختزل مرة ثانية إلى عنصر النحاس عن طريق بطانة الفرن المصنوعة من الكوك أو الفحم النباتي أو أجزاء الشجر الخضراء.... وتقف عملية اختزال أكسيد النحاس عندما تصل نسبة الأكسيد في المصهور إلى حوالي(0.5%) حتى يمكن الحصول على فلز النحاس بصورة يمكن صبه بسهولة، ونحصل على صبة ممتازة لاعيوب فيها، و يعرف الناتج في هذه الحالة باسم النحاس السبيك، أما إذا استمرت عملية الاختزال لتقل نسبة أكسيد النحاس عن

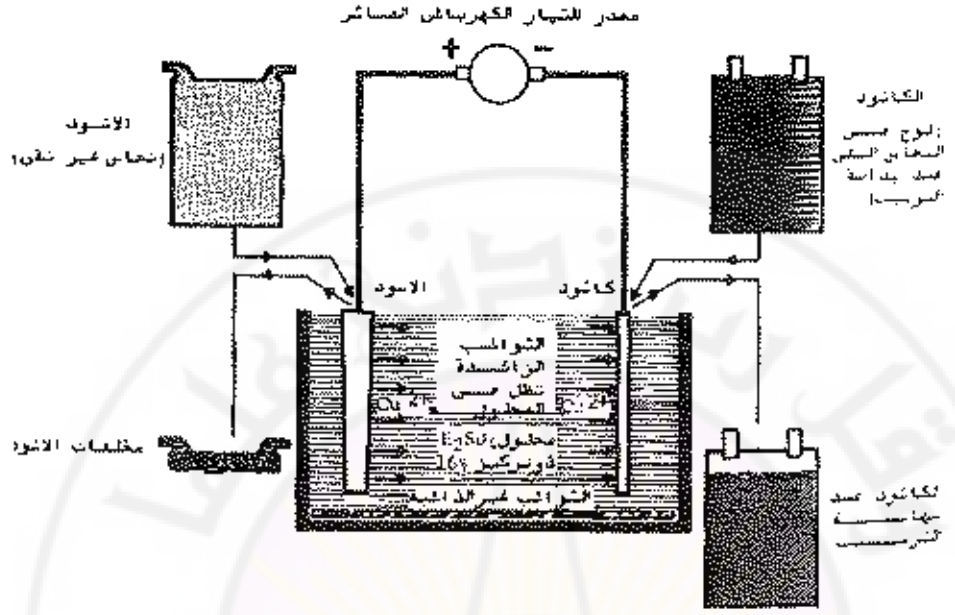
(0.5%) في المصهور (أو النحاس السائل) فإن عملية الصب تصبح صعبة إضافة إلى أن الصبة الناتجة تكون مليئة بعيوب المسامية.

يحتوي النحاس الناتج من الأفران اللافحة على نسبة من الشوائب تبلغ (0.5%) أساسها أكسيد النحاس. و للحصول على النحاس الذي تصل درجة نقاوته إلى (99.98%)، يصب النحاس الناتج من عملية اللفح لتكوين المصعد (الأنود) في الدائرة الكهربائية المبينة في الشكل (4-25) وفيها يكون الالكتروليت عبارة عن كبريتات النحاس وحمض الكبريتيك، أما الكاثود (المهبط)، فيكون عبارة عن صفيحة رقيقة من النحاس النقي، حيث يتم ترسيب النحاس الذي يبلغ نقاؤه (99.98%) على المهبط، ويعرف النحاس المنتج بهذه الطريقة باسم النحاس عالي النقاوة. وتعاد إذابة النحاس المترسب على المهبط، وهو نحاس عالي النقاوة، ويصول إلى قضبان نحاسية أو علب أو كتل أو أي أشكال أخرى مناسبة للف أو السحب، أو أي طرق أخرى لتصنيع النحاس. ولضمان الحصول على نحاس عالي النقاوة و خال من الأكسجين - كل ما زادت النقاوة زاد معامل التوصيل الكهربائي - فلا بد أن تتم عملية الصهر و الإذابة للنحاس الناتج من التنقية الكهروكيميائية تحت ظروف مختزلة لمنع أكسدة النحاس النقي.

في أثناء عملية التنقية الكهرو كيميائية تذوب بعض الشوائب الموجودة في المصعد - النحاس المنفط غير النقي - أثناء عملية التحليل الكهروكيميائي دون أن تصل إلى المهبط، بينما تظل بقية الشوائب الأخرى في صورة غير ذائبة عند المصعد، وتكون الشوائب غير الذائبة مرسبات على شكل ملاط عند المصعد، ويحتوي هذا الملاط المتكون على الذهب والفضة اللذين يتم استرجاعهما واستخلاصهما بعدة عمليات أو معالجات أخرى.



الشكل (4-24): خطوات إنتاج النحاس عالي النقاوة من خام كبريتيد النحاس.



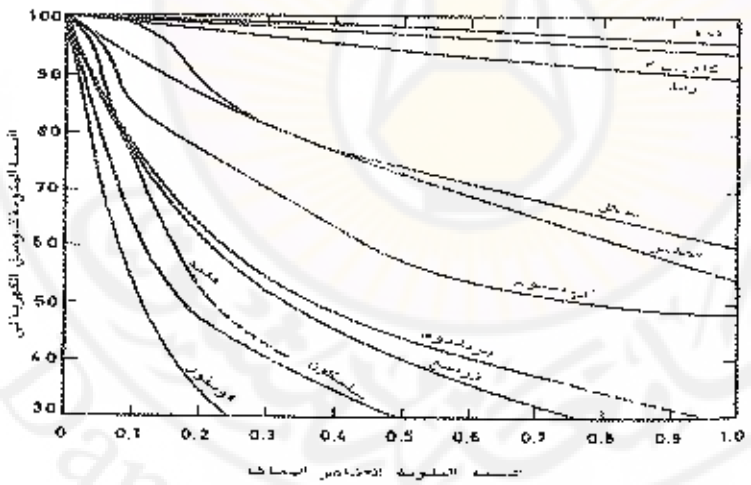
الشكل (4-25): الطريقة الكهروكيميائية لتنقية النحاس.

4-6-3: خواص النحاس:

التركيب البلوري للنحاس هو مكعب متمركز الوجه، وتبلغ كثافته 8.94 غ/سم^3، ودرجة حرارة انصهاره 1083 درجة مئوية، أما درجة غليانه فهي 2595 درجة مئوية. ويعد النحاس ثاني فلز في توصيل الكهرباء بعد الفضة، كما هو مبين في الجدول (4-18) الذي يقارن بين معامل التوصيل الكهربائي والحراري للعديد من الفلزات المعروفة، وتعد خاصية التوصيل الكهربائي من أهم خواص النحاس، وهي ساعدت على انتشاره و توسيع استعماله، وفي عام(1931م) وضعت الهيئة الدولية للكيمياء الكهربائية المعيار الثابت لكفاءة التوصيل الكهربائي وذلك باستخدام النحاس الملدن كمواصفة قياسية (I.A.C.S) وقد نصت على أن مقاومة سلك طوله متر واحد ومقطعه واحد ميليمتر مربع لا تزيد على (0.017241). أما الآن ومع التطور التقني في استخلاص الفلزات وتنقيتها فقد أمكن إنتاج نحاس بدرجة أعلى من نقاوة نحاس (I.A.C.S.) القياسي، ولهذا تصل خاصية التوصيل الكهربائي للنحاس الصافي عديد البلورات التي تصنع الآن (102.3%) وتتراوح نسبة التوصيل الكهربائي

للنحاس التجاري المستعمل الآن مابين (100.5%) و (101.8%)، وتصل مقدرة التوصيل الكهربائي للنحاس اللين التجاري الخالي من الأكسجين إلى (101%). أما التوصيل الفولتمتري للنحاس فيصل إلى (94%) بالنسبة للفضة، بينما يصل معامل توصيل الفلزات الثمينة الأخرى مثل الذهب إلى (66%) مقارنة بالفضة.

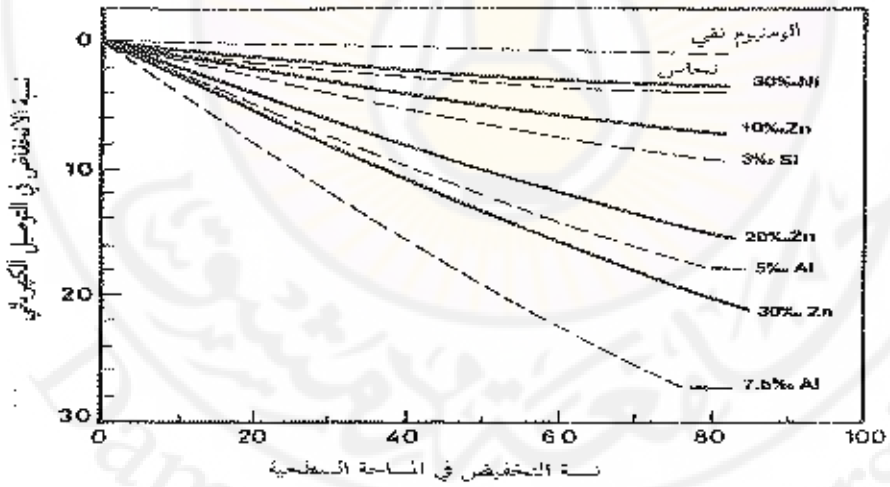
تقلل الشوائب الموجودة في فلز النحاس كثيرا من معامل توصيله الكهربائي كما هو مبين في الشكل (4-26) كما يقلل أيضا التشكيل على البارد من معدل التوصيل الكهربائي كما هو موضح في الشكل (4-27) ولكن التأثير الناتج عن التشكيل على البارد أقل بكثير من التأثير الناتج عن وجود شوائب، ويعتمد تأثير الشوائب على معامل التوصيل الكهربائي للنحاس على ذوبانية العنصر فيه، فيكون اثر العناصر عديمة الذوبانية أو محدودية الذوبانية محدودا، و العكس صحيح. حيث يكون تأثير العناصر عالية الذوبانية أكبر في تخفيض التوصيل الكهربائي للنحاس، وعلى هذا فوجود بعض الشوائب لا يقلل كثيرا من معامل التوصيل الكهربائي، بل إنه يلزم إضافة هذه العناصر لزيادة مقاومة النحاس الميكانيكية، فمثلا إضافة الكادميوم بنسبة (1%) يصاحبه مقدار قليل في تخفيض التوصيل الكهربائي حيث يظل معامل التوصيل حوالي (90%) من قيمة التوصيل الكهربائي للنحاس الطري.



الشكل (4-26): تأثير النسبة المئوية للعناصر المضافة على التوصيل الكهربائي للنحاس.

جدول (4-18): التوصيل الكهربائي والحراري النسبي لعدد من الفلزات النقية مقارنة بالنحاس القياسي عند درجة حرارة 20 درجة مئوية.

الفلز	معامل التوصيل النسبي (أساس النحاس 100%)	
	الكهربائي	الحراري
فضة	106	108
نحاس	100	100
ذهب	72	76
ألمنيوم	62	56
مغنسيوم	39	41
زنك	29	29
نيكل	25	25
كادميوم	23	24
كوبالت	18	17
حديد	16	17
فولاذ	17-13	17-13
بلاتين	16	18
قصدير	15	17
رصاص	8	9
أنتيمون	4.5	5



شكل(4-27): تأثير التشكيل على البارد على التوصيل الكهربائي لفلز الألمنيوم وفلز النحاس وبعض سبائك النحاس.

ولكن إضافة (1%) من الكادميوم ترفع المقاومة الميكانيكية، حيث تصل مقاومة هذه السبيكة عند السحب على البارد إلى حوالي 460Mpa مقارنة بـ 360Mpa للنحاس المصلد بالإجهاد، أي أن إضافة 1% كادميوم يزيد مقاومته الميكانيكية بمقدار (28%) مقارنة بالأصلية. وعلى العكس من ذلك فهناك عناصر ذات تأثير سيئ للغاية على معامل التوصيل الكهربائي مثل الزرنيخ و الحديد و الفوسفور، نظراً لذوبانيتها العالية في النحاس - فمثلا ينخفض التوصيل الكهربائي للنحاس الحاوي على 0.04% فوسفور إلى حوالي 75% من قيمة توصيل النحاس النقي ووجود أكسيد النحاس CuO بنسبة قليلة في صورة كريات صغيرة أمر جيد، لأنها عديمة التأثير على التوصيل الكهربائي أو الخواص الأخرى.

بينما يساعد وجود أكاسيد النحاس في هذه الصورة على تجميع العناصر الأخرى الضارة _مثل البزموث و غيره _ في صورة أكاسيد غير ذائبة في النحاس، بدلا من أن تكون تلك الشوائب طبقات من الفلز ذائبة على حدود الحبيبات، ولكن بعض التطبيقات الهندسية تتطلب نحاسا خاليا تماما من الأكسجين وفي هذه الحالة لابد من إضافة بعض العناصر المزيلة أو شديدة الاتحاد مع الأكسجين و بنسبة زائدة للتخلص من الأكسجين، وبالتالي تمنع هذه الإضافات تشكل أكسيد النحاس. وبوجه عام تقلل هذه الإضافات من معامل التوصيل الكهربائي مثلها في ذلك مثل التشكيل على البارد، فكلما زادت صلادة النحاس زادت مقاومته للتوصيل الكهربائي.

تبلغ أقصى مقاومة للسحب للفات النحاس الساخن حوالي 221Mpa واستطالة تتراوح مابين 45% و 55% في طول قياسي قدره خمس سنتيمترات.

وتزيد مقاومة السحب في النحاس المصنع على البارد إلى حوالي 399Mpa بعد تخفيض 20% في المساحة، وتقل الاستطالة لتصل إلى حوالي 4%.

و الخواص الميكانيكية المذكورة خاصة بالنحاس الجامد المستخلص بالتحليل الكهربائي، أما الخواص الميكانيكية للنحاس التجاري فتعتمد على كمية و مستوى الشوائب ونوعية هذه الشوائب، إضافة إلى درجة التشكيل على البارد فإن مقاومة النحاس تزيد بزيادة نسبة الشوائب، ولكن المطيلية تقل كثيرا برفع كمية الشوائب.

إذاً يتميز النحاس بالمطيلية العالية التي يمكن من خلالها تشكيله و تشغيله بسهولة كبيرة عند درجات الحرارة العادية، بينما يصبح النحاس قصيفا عند درجات الحرارة المنخفضة أقل من الصفر، وتزيد مقاومته للشد بانخفاض درجة الحرارة زيادة ملموسة. الجدول(4-19) يبين

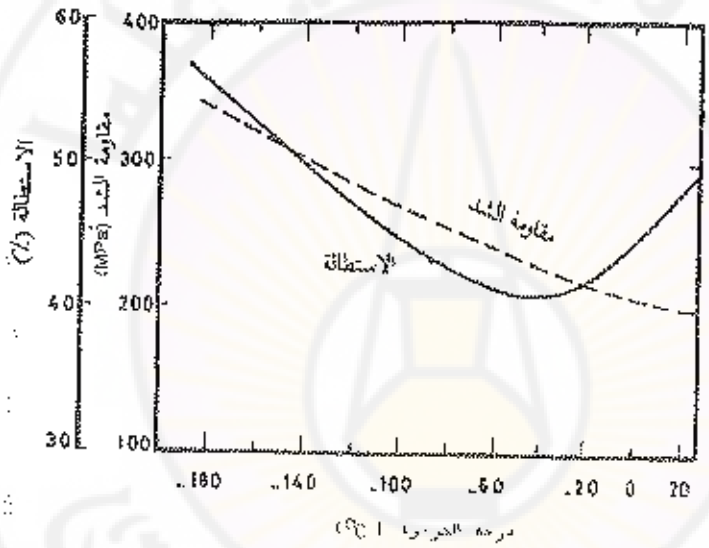
مقارنة بين خواص النحاس الطري و النحاس المصلد بالتشكيل. بينما لا تتأثر مقومة النحاس للكلال (التعب) كثيرا بدرجة الحرارة المنخفضة، و بسبب عدم تأثر الخواص الميكانيكية للنحاس كثيرا بانخفاض درجة الحرارة، فإنه يستخدم في صناعة أوعية وأجهزة التبريد التي تعمل عند درجة حرارة التجمد. وعلى العكس من عدم تأثر خواص النحاس بانخفاض درجة الحرارة فإن زيادة درجة الحرارة تخفض مقاومته بدرجة كبيرة مع زيادة ملحوظة في المطيلية شكل(4-28)، ونتيجة لتدني خواص النحاس بارتفاع درجة الحرارة فإنه غير مناسب للاستعمال في التطبيقات الواقعة تحت تأثير الإجهادات عند درجات الحرارة العالية، أي أن مقاومته للزحف غير جيدة. ويتضح من بيانات الجدول أن النحاس يفقد مقاومته للزحف تماما عند رفع الحرارة إلى 269 °C.

جدول (4-19): خواص النحاس الطري والنحاس المصلد بالتشكيل.

المعامل	الخواص الميكانيكية	
	نحاس طري Mpa	نحاس مصلد بالتشكيل Mpa
معامل المرونة	117.210	124.104
معامل الجساءة	44.815	51.710
نسبة بواسون	0.35	0.35

يتفاعل النحاس مع الكثير من العناصر الأخرى وكذلك مع الأحماض كما أنه ذو مقاومة عالية للتآكل، إذ إن مستوى الجهد للنحاس الثنائي منخفض، فهو بحدود 0.34 فولت، وهذا يفسر مقاومته الممتازة للتآكل، ورقي مكانته في سلسلة الجهد الكهربي للفلزات (السلسلة الكهروكيميائية للعناصر). وترجع قدرة النحاس الممتازة لمقاومة التآكل لتكوينه طبقة رقيقة واقية من أكسيد النحاس على سطح الفلز، ويحول تكون هذه الطبقة دون وصول الوسط المتأكل لسطح الفلز، ويتأكسد النحاس في درجات الحرارة العالية مكونا أكسيدين هما أكسيد النحاسيك CuO و أكسيد النحاسوز Cu_2O وأكسدة النحاس غالبا عملية بطيئة، ولكن زيادة درجة الحرارة تزيد معدل الأكسدة كثيرا كما هو مبين في الشكل (4-29) ويتضح من الشكل أنه عند درجات الحرارة الأعلى من 200 °C يزيد معدل الأكسدة مع تكون طبقة سميكة من

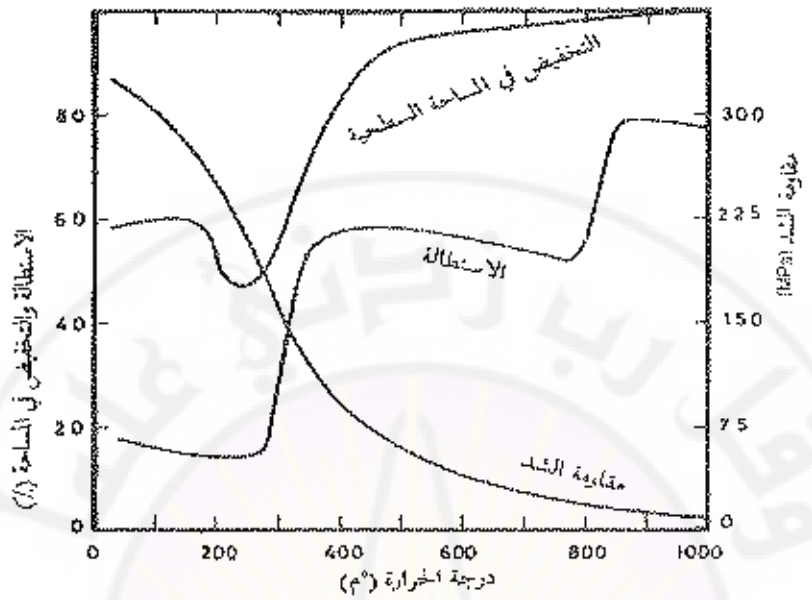
الأكسيد، وفي حال إضافة عنصر الألمنيوم أو السيليكون إلى النحاس يقل معدل الأكسدة كثيرا، نظرا لتكون طبقة رقيقة واقية من أكسيد الألمنيوم عند إضافة العنصر الأول أو خليط من أكسيدي النحاس و السيليكون عند إضافة عنصر السيليكون. ولكن يجب أن نتذكر أن إضافة هذه العناصر تقلل معامل التوصيل الكهربائي للنحاس كما أنها تجعل التشكيل على البارد أمرا صعبا للغاية. ويعد الكبريت أشد العناصر ضررا بالنحاس، وفي واقع الأمر فقد اشتق اسم الكبريت من الكلمة اليونانية (Sulvari) ومعناها (عدو النحاس)، ويفقد النحاس بريقه ولمعانه في وجود الكبريت أو في وجود أي من مركباته، نظرا لتكوين كبريتيدات النحاس سوداء اللون، وتزيد رطوبة الجو من سرعة تفاعل الكبريت.



الشكل (4-28): تأثير درجة الحرارة على خواص الشد للنحاس.

و إذا ترك النحاس معرضاً للجو الخارجي لفترات طويلة، كما في أسقف المنازل القديمة والأثرية، تتكون مركبات النحاس التي تميل إلى الخضرة بعد حوالي عشر سنوات، وهذه الطبقة واقية من استمرار التفاعل و تحمي النحاس الموجود أسفلها. ولقد وجدت طرق صناعية للإسراع في تكوين هذه الطبقة الخضراء على سطح النحاس لمساعدته في مقاومة التآكل. واللون الأخضر المتكون على سطح النحاس هو نتيجة تكون خليط من كربونات النحاس المائية وكبريتات النحاس الأصلية في الأجواء الصناعية، وهذه المركبات عبارة عن

مسحوق كثيف، ولكنها مرتبطة بالطريقات السطحية للفلز.



الشكل (4-29): تأثير رفع درجات الحرارة على الخواص الميكانيكية للنحاس.

4-6-4: استخدامات النحاس:

النحاس هو أكثر الفلزات غير الحديدية استخداماً، ويحتل المرتبة الثانية بعد عنصر الألمنيوم سواء قدرت الكمية المستخدمة منه بالطن أو بعدد التطبيقات والأغراض المستخدمة فيها، ولهذا يعد النحاس واحدا من أهم العناصر غير الحديدية في الاستخدام. وترجع الزيادة الكبيرة في استخدام النحاس وكثرة استعماله لخواصه المميزة، وأهم الخواص التي ساعدت على زيادة استخدام النحاس ما يلي:

- معامل التوصيل الكهربائي العالي النحاس فهو الثاني بعد الفضة
- مقاومته الجيدة للتآكل والأكسدة ويرجع ذلك لتكوين طبقة الأكسيد الرقيقة التي تمنع استمرار الأكسدة أو التآكل أو طبقة الكربونات الخضراء في الأجواء الصناعية.
- ارتفاع معامل التوصيل الحراري الجيد لهذا العنصر مقارنة بالعناصر الفلزية الأخرى، ولقد ساعدت هذه الخاصية على كثرة استعماله في الأوساط التي تتطلب انتقال الحرارة.
- يكون سبائك متنوعة وكثيرة ومهمة مع العديد من العناصر الأخرى وتتمتع تلك السبائك

أيضا بخواص متميزة تساعد على انتشارها و كثرة استعمالها. فمثلا يكوّن النحاس مع الزنك سبائك النحاس الأصفر، وهي سبائك ذات مقاومة جيدة للتآكل إضافة إلى مقاومتها الميكانيكية المقبولة ومطيليتها المناسبة، كما يكون النحاس مع القصدير سبائك البرونز وهي سبائك ذات خواص جيدة وهناك العديد من سبائك النحاس الأخرى كما سيأتي ذكره فيما بعد. وأساس صناعة سبائك النحاس هو زيادة المقاومة وتحسين التشغيلية بالمكنات، بشرط ألا يؤثر ذلك على معامل توصيل النحاس.

- خردة النحاس مفيدة ويمكن إعادة استخدام مخلفات الفلز (الخردة) مرات عديدة.
- معامل مطيلية عالٍ مع قدرة كافية من المقاومة، فالنحاس ذو مقاومة شد متوسطة، ويمكن تشكيله بسهولة لقابليته العالية جدا للطرق على البارد والساخن.
- ألوان النحاس جذابة و جميلة.
- ليس للنحاس أي خواص مغناطيسية.
- يمكن التحكم في خواص النحاس منفردا، أو في صورة سبائكية.
- إمكانية وسهولة توصيله و لحامه.
- يسهل تشطيب سطحه الخارجي، حيث يمكن تغطية السطح أو طليه بالورنيش، وبعض هذه الخواص يمكن تحسينها باستخدام عناصر سبائكية مناسبة.

تقدر نسبة النحاس المستخدم في التطبيقات الكهربائية بحوالي 55% من مجموع النحاس المنتج، و تستخدم نسبة 15% منه في تشييد المباني مشتملة الأنابيب والأدوات الصحية وعمل الأسطح والمجاري....الخ، وتستهلك صناعة السيارات حوالي 12% من إنتاج النحاس دون أن تدخل هذه النسبة في الأجزاء الكهربائية.

وتستهلك الآلات والمعدات الصناعية حوالي 9%، وتشمل تلك النسب النحاس الموجود في النحاس الأصفر والسبائك الأخرى إضافة إلى النحاس الصافي.

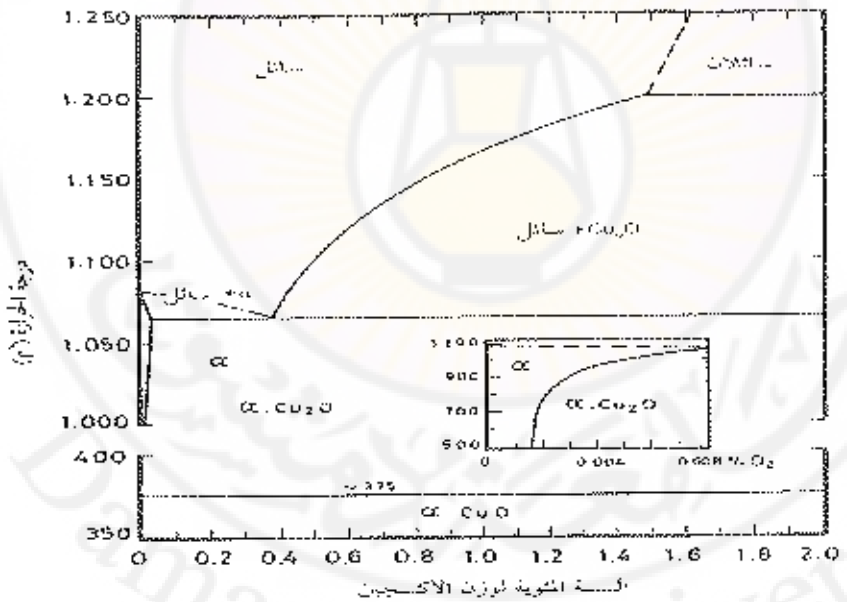
4-6-5: سبائك النحاس:

إن من أهم ميزات النحاس كثرة سبائكه وتنوعها وفوائدها، والنحاس أب لعائلة كبيرة من السبائك، وتتمتع سبائك النحاس العديدة بخواص كثيرة مشابهة لخواص الفلز نفسه، وسبائك النحاس مهمة للغاية ومستخدمة في مدى واسع من التطبيقات والاستخدامات العملية في مختلف الصناعات والإنشاءات الهندسية. وقبل الدخول في تفاصيل هذه السبائك يلزم التعرف على بعض منحنيات

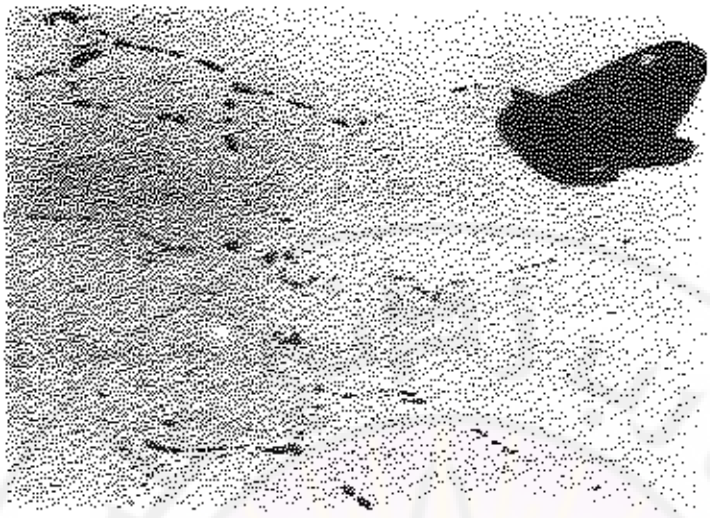
الاتزان الحراري لسبائك النحاس الثنائية وكذلك الثلاثية.

4-6-5-1: منحنيات الاتزان الحراري: يتناول هذا الجزء أهم العناصر السبائكية أو الشوائب التي تكون في سبائك النحاس وهي على النحو التالي:

1- النحاس - أكسجين: يكون الأكسجين مع النحاس أكسيد النحاس CuO ويوضح منحنى الاتزان الحراري المبين في الشكل (4-30) العلاقة بين النحاس حتى 2% نسبة وزنية من الأكسجين (حوالي 7.7%) نسبة ذرية. وتوجد نقطة أيوتكتيك عند درجة الحرارة 1.065 °C ونسبة وزنية من الأكسجين قدرها 0.39% أي ما يعادل Cu_2O 3.5%، ولا تذوب أكاسيد النحاس المتكونة في النحاس الجامد، وتصل أقصى قيمة ذوبانية لأكسيد النحاس في قلز النحاس إلى أقل من Cu_2O 5.3% وتقل ذائبية الأكسجين في النحاس بانخفاض درجة الحرارة حيث تصل أقصى ذوبانية من الأكسجين في النحاس إلى أقل من 0.002% عند درجة حرارة 600 °C، والتركيب البنائي الميكروسكوبي للأكسيد المترسب في النحاس هي في الشكل (4-31) والذي يظهر بأن ترسب أكسيد النحاس يكون على حدود الحبيبات.



الشكل (4-30): منحنى الاتزان الحراري للنحاس - أكسجين.



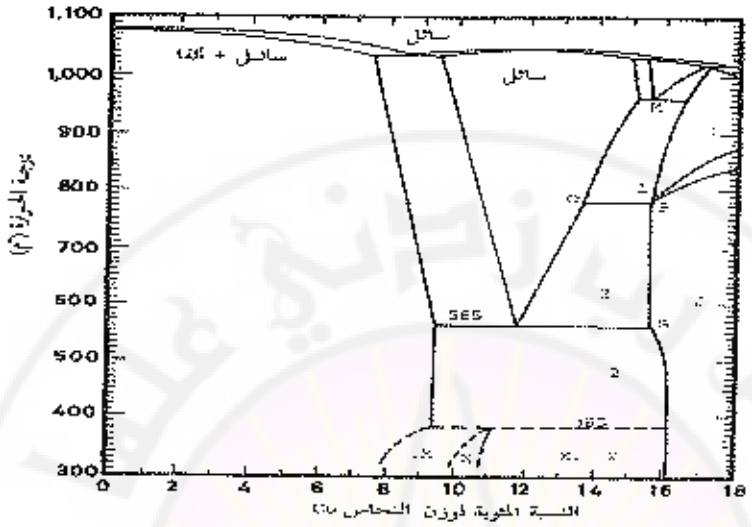
الشكل (4-31): يبين التركيب الميكروسكوبي للأكسيد المترسب في النحاس.

2- النحاس - ألمنيوم: منحني الاتزان الحراري لسلسلة من سبائك النحاس - ألمنيوم (الجزء الغني بالنحاس) موضح في شكل (4-32) وهو الجزء الخاص بالمحلول الجامد من الألمنيوم في النحاس، ويمتد هذا الجزء إلى حوالي 9.4% ألمنيوم عند درجة الحرارة 565 °C وتزيد كثيراً ذائبية الألمنيوم بانخفاض درجة الحرارة على حدود منطقة ألفا (ألفا + بيتا) كما يتحلل الوجه بيتا في التفاعل اليكوتكتويدي عند درجة الحرارة 565 °C و11.8% ألمنيوم إلى وجهين، هما ألفا وجاما الثانية (γ_2).

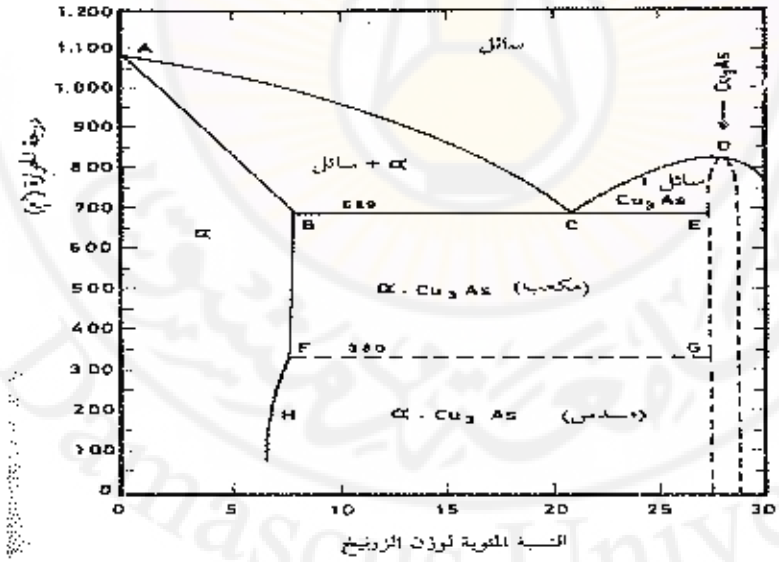
3- النحاس - زرنيخ: يوضح الشكل (4-33) الجزء الغني بالنحاس من منحني الاتزان الحراري للنحاس - زرنيخ، ويتبين من الشكل وجود قابلية ملموسة لتكوين محلول جامد بين النحاس والزرنيخ، ومستوى 0.5% زرنيخ في سبائك النحاس التجارية يزيد من مقاومة السبيكة عند درجات الحرارة العالية، لكن نسبة الزرنيخ المذكورة أعلى من المستوى المسموح به في سبائك النحاس، نظراً لتأثير الزرنيخ السيّئ على معامل التوصيل الكهربائي.

4- نحاس - زركونيوم: يكون النحاس مركباً أيوتكتيكياً مع المركب الفلزي المتداخل الذي يحتوي على نسبة من الزركونيوم تبلغ $ZrCu_5$ 32.8%، وتقع نقطة الأيوتكتيك عند 12.9% زركونيوم ودرجة الحرارة 965 °C وإن كان هناك عدم اتفاق حول التركيب المضبوط للمركب الفلزي المتداخل وكذا موقعه. والذائبية التي لجامدة للمركب $ZrCu_5$ في النحاس قليلة وتنخفض من

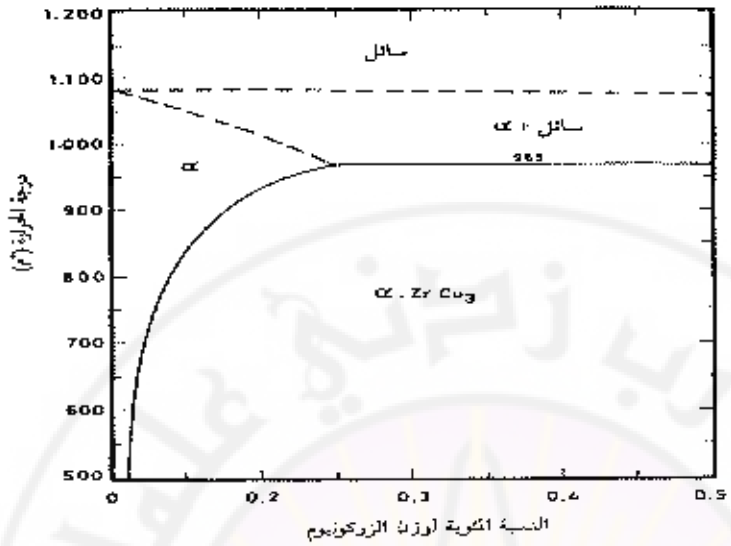
0.15% زركونيوم عند درجة الحرارة 900 °C وإلى أقل من 0.01% عند درجة الحرارة العادية، الشكل(4-34).



الشكل (4-32): منحنى الاتزان الحراري للنحاس - ألمنيوم.



الشكل (4-33): منحنى الاتزان الحراري للنحاس - زرنيخ.



الشكل (4-34): منحني الاتزان الحراري للنحاس - زركونيوم.

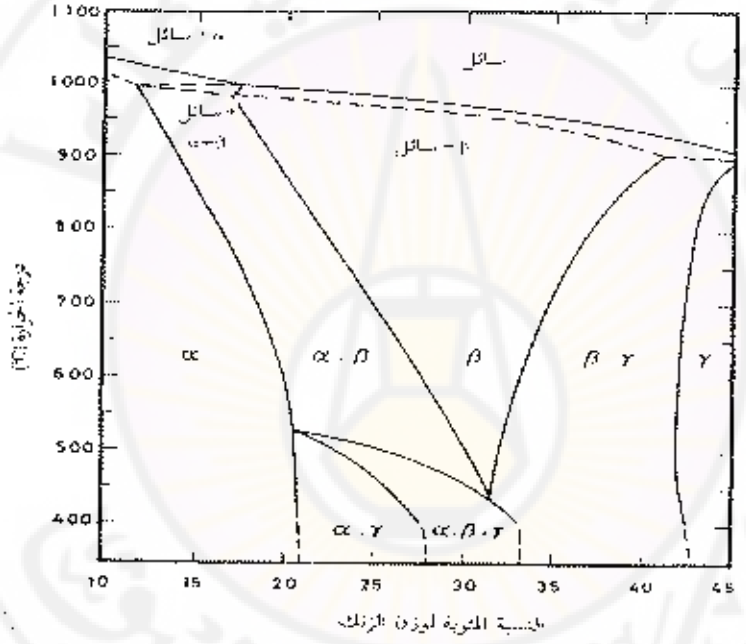
5- نحاس – زنك: يبين شكل (4-35) منحني الاتزان الحراري بين النحاس والزنك ـ الجزء الغني بالنحاس حتى 60% زنك، ويتضح من الشكل أن هناك مدى ضيقاً بين خط السيولة وخط التجمد، كما يوجد اثنان من نظائم البريتكتيك الأفقية، مع وجود كميات كبيرة من المحلول الجامد مكوناً الوجه ألفا حتى نسبة زنك تبلغ 39% والأوجه المتكونة في منحني الاتزان الحراري هي على النحو التالي:

الوجه ألفا: محلول جامد من النحاس والزنك البلوري مكعب متمركز الوجه، وأعلى نسبة زنك فيه هي 39% عند درجة الحرارة 454 °C تنخفض إلى 32.5% عند درجة الحرارة 902 °C وهي درجة حرارة البريتكتيك. وتصل نسبة الزنك في النحاس إلى حوالي 33% عند درجة الحرارة 150°C وهذه السبائك قابلة للطرق، كما أنها مطيلة، يتراوح لونها ما بين الأحمر واللون الذهبي وتحتوي السبيكة على حوالي 20% زنك ويتحول لون السبيكة ذات الوجه ألفا إلى اللون الأصفر الباهت مع قليل من اللون الأخضر عند حوالي 30% زنك.

الوجه بيتا: البناء البلوري لهذا الوجه هو مكعب متمركز الجسم، ينتج من تفاعل البريتكتيك بين الوجه ألفا والسائل، وهذا الوجه إما منتظم أو غير منتظم اعتماداً على درجة الحرارة، فهو

غير منتظم عند درجة حرارة أعلى من 400 °C ومنتظم عند درجة الحرارة أقل من ذلك. وهذا الوجه صلد حتى درجة الحرارة 600 °C حيث يفقد بعد ذلك صلادته، ويتراوح لون السبائك المكونة من الوجهين (ألفا + بيتا) ما بين الأحمر والأصفر واللون الذهبي.

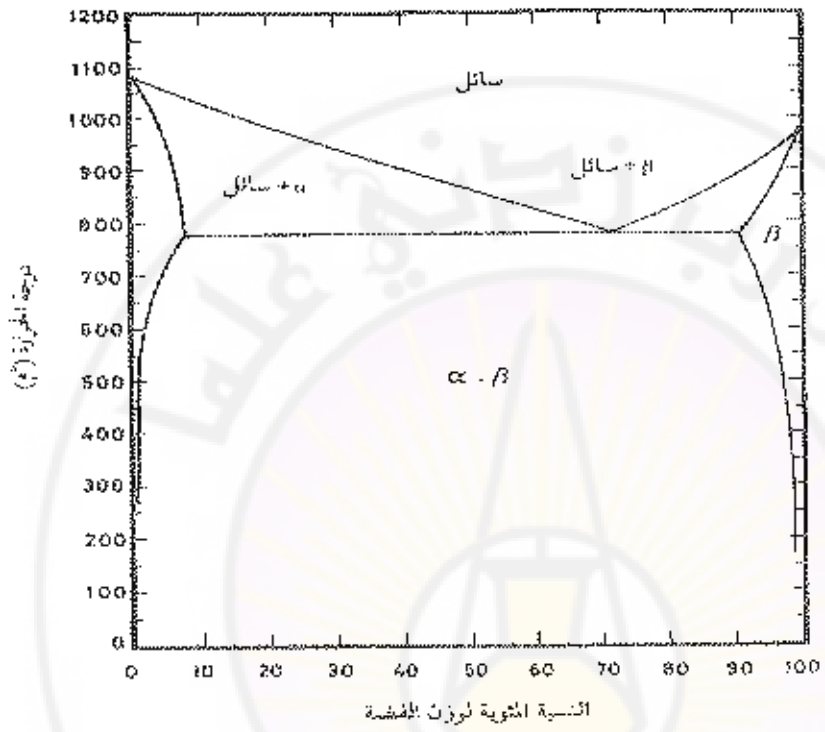
الوجه جاما: يتكون هذا الوجه عند خط البريتكتيك الثاني عند درجة الحرارة 834 °C بين الطور بيتا الجامد وبقايا مصهور السيكة، وبناؤه معقد، وأساس هذا الوجه هو المركب Cu_9Sn_4، ويعرف باسم النموذج المبدئي (أو الطراز الأصلي primary form) والوجه جاما صلد ولكنه قصيف، ويوجد الوجه جاما في قليل من سبائك النحاس العملية، ومنها سبائك اللحام المحتوية على أقل من 50% نحاس.



الشكل (4-35): منحني الاتزان الحراري للنحاس - زنك.

6- النحاس – فضة: يكون النحاس مع الفضة نظاماً أيوتكتيكياً بسيطاً، كما هو موضح في شكل (4-36) مع محدودية ذائبية الفضة في النحاس. ويقع الأيوتكتيك عند درجة الحرارة °C 779 ونسبة من الفضة تبلغ 72% ويتكون المحول الجامد عند 8% فضة عند درجة حرارة

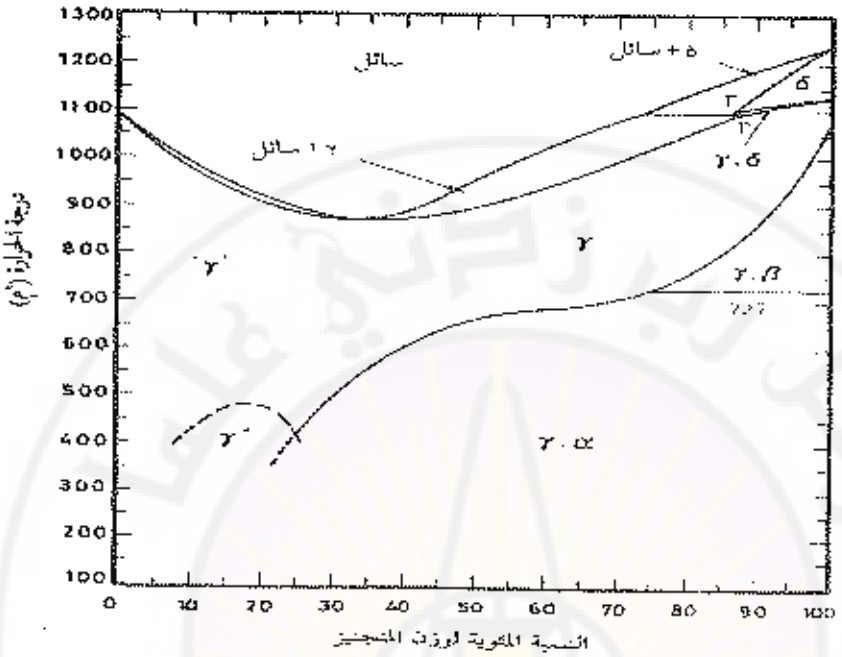
الأيوتكتيك، وتنخفض ذائبية الفضة في النحاس سريعاً لتصل إلى أقل من 1% عند درجة الحرارة 450 °C ولا تخفض الفضة من معامل التوصيل الكهربائي للنحاس، ولكن إضافة 1% فضة إلى النحاس تقلل من مقاومة الزحف للنحاس المشكل على البارد.



الشكل (4-36): منحني الاتزان الحراري للنحاس - فضة.

وهناك العديد من أشكال الاتزان الحراري لنظام النحاس– قصدير، النحاس– كادميوم، النحاس– كبريت حيث يضاف الكبريت أحياناً إلى النحاس بنسب صغيرة لتحسين خاصية التشغيل على الماكنات نظراً لعدم ذائبية كبريتيد النحاس، النحاس – كروم الذي يظهر انخفاض الذوبانية الجامدة بين النحاس والكروم بانخفاض درجة الحرارة، والنحاس – منجنيز حيث منحني الاتزان الحراري للنحاس – منجنيز معقد نظراً لوجود تغيرات تأصلية كثيرة، كما هو موضح في شكل (4-37)، ويتضح من الشكل أن النحاس والمنجنيز يكونان سلسلة مستمرة من المحاليل الجامدة عند درجة الحرارة 870 °C ونسبة 35% منجنيز، حيث يتقابل كل من خطي السيولة والتجمد.

والتركيب البلوري للمحلول الجامد جاما (γ) هو مكعب متمركز الوجه، وتظهر فيه نسبة قليلة من ذائبية النحاس الجامد في كل من الوجهين ألفا أو بيتا منجنيز.



الشكل (4-37): منحني الاتزان الحراري للنحاس - منجنيز.

ومنحني الاتزان الحراري للنحاس – سليكون وأيضا منحني معقد؛ نظراً لتكوين الكثير من الأوجه المختلفة بين النحاس والسليكون. ومنحني الاتزان للنحاس – نيكل: حيث يذوب النحاس والنيكل في بعضهما ذوباناً كاملاً بجميع النسب في الحالة الجامدة. ومنحني النحاس – بيريليوم والتي عادة تحوي الكوبالت إضافة للبريليوم.

4-6-5-2: تأثير الشوائب على عملية استخلاص النحاس:

سيتم في هذا الجزء استعراض تأثير الشوائب المتخلفة من عمليات الاستخلاص، أو بعد عملية التنقية، ولابد من التأكد من مطابقة النحاس المستعمل في تصنيع سبائك النحاس للمواصفات، نظراً لما تحدثه الشوائب المختلفة المتخلفة في النحاس من تأثيرات خطيرة على خواصه. فمثلاً

تتجمع عناصر الرصاص والبزموث والأنتيمون وتتركز على حدود الحبيبات مسببة تقصف المادة، وخاصة عند درجات الحرارة العالية، ويحدث ذلك خاصة في السبائك الخالية من أكسيد النحاس، ولهذا يجب أن تظل نسب هذه العناصر في حدود المواصفات العالمية، وهي: الرصاص في حدود 0.02% أما الأنتيمون فلا تزيد نسبته على 0.01% ولا تزيد نسبة البزموث على 0.003%. كما أن النسب القليلة من عناصر السبائكية المضافة للسبائك الثنائية فإنها ذات تأثيرات مهمة على خواص النحاس أو السبائك المنتجة، وفيما يلي نلقي الضوء على تأثيرات كل عنصر على حدة على خواص النحاس:

1- **الأكسجين:** الأكسجين ذو تأثير حسن، حيث يكوّن أكسيدي النحاس (Cu_2O) و(CuO) وإن كان أكثرها انتشاراً هو (Cu_2O) التي لا تذوب في عنصر النحاس، وتساعد أكاسيد النحاس المتكونة على تجمع العناصر الأخرى في صورة أكاسيد مركبة مثل: ($Cu_2O.PhO_2$), ($Cu_2O.Bi_2O$), ($Cu_2O.Sb_5O_5$) وتجمع الأكاسيد المركبة بهذه الصورة يقلل من خطورة تقصف المادة نظراً لأن الأكاسيد المتكونة من عناصر الشوائب أقل تأثيراً على المطيلية من العناصر نفسها. وفي حالة إزالة الأكسجين من النحاس بصورة تامة فلابد عندئذ من تخفيض نسبة الشوائب كذلك، حيث يصبح مقدار البزموث المسموح به في حدود (0.009%) مقارنة بقيمة (0.003%) في حالة وجود الأكسجين. وتؤدي إزالة الأكسجين من النحاس بصورة تامة إلى تجمع الشوائب مثل: البزموث والأنتيمون والرصاص، وتمركزها على حدود الحبيبات مسببة استحالة تشكيل النحاس على الساخن عند درجات حرارة تتراوح ما بين °C (600 – 500) ولكن عند رفع درجة الحرارة إلى °C 700 يختفي تقصف المادة، ويمكن التشكيل على الساخن عندئذ؛ نظراً لزيادة ذائبية عنصر البزموث في النحاس، حيث يذيب النحاس حوالي (0.01%) بزموث عند درجة حرارة °C 800.

2- **البزموث:** كما ذكر مع تأثير الأكسجين، فإن وجود البزموث مع النحاس يقلل من مطيليته، ويحول دون تشكيله على الساخن؛ نظراً لتمركز البزموث على حدود الحبيبات، ولهذا تحدد المواصفات القياسية العالمية للنحاس أعلى نسبة من البزموث في النحاس بمقدار (0.003%) وفي حالة وجود الأكسجين في النحاس . مكوناً أكسيد النحاس . فتحدد نسبة البزموث بمقدار (0.5%) أما في حالة التخلص التام من الأكسجين، فإن أقصى قيمة للبزموث في النحاس يجب ألا تزيد على (0.001%). وإضافة إلى تأثير البزموث الضار بالخواص الميكانيكية، فإنه يخفض التوصيل الكهربائي للنحاس. ويمكن التغلب على مشكلة تخفيض التوصيل الكهربائي

وضعف الخواص الميكانيكية الناتجة عن وجود البزموث في النحاس بإضافة كمية صغيرة من الليثيوم التي تكوّن مركباً تصل درجة حرارة انصهاره إلى (1145 °C).

3- البزموث والأنتيمون: إن وجود البزموث والأنتيمون معاً في سبائك النحاس الأصفر، والبرونز الألزميني له تأثيرات ضارة على التي لخواص الميكانيكية نظراً لتكوين طبقة رقيقة قصيفة منهما على حدود الحبيبات.

4- الزرنيخ: إن وجود الزرنيخ في النحاس بنسبة حوالي (0.5%) يحسن خواص النحاس عند درجات الحرارة العالية، كما أن إضافة الزرنيخ إلى سبائك النحاس الأصفر ترفع من مقاومتها للتآكل.

5- الفوسفور: يضاف الفوسفور غالباً كمادة لإزالة الأكسجين (Deoxidizing) من النحاس، وليس للفوسفور تأثيرات على خواص النحاس أو سبائكه إذا كانت نسبته في السبيكة في حدود (0.009%) أما إذا زادت نسبته على (0.009%) فيؤدي ذلك لتقليل التوصيل الكهربائي للنحاس.

6- البورون والليثيوم: يضاف عنصراً البورون والليثيوم كعاملي اختزال (إزالة الأكسجين)، مثلهما في ذلك مثل الفوسفور، وليس لعنصري البورون والليثيوم أي تأثير على الخواص التي للنحاس أو سبائكه.

7- الألومنيوم: إن وجود كمية ولو قليلة جداً من الألمنيوم حتى في حدود (0.005%) تسبب كثيراً من المشاكل في سبائك النحاس؛ نظراً لسهولة تكوين أكسيد الألمنيوم الذي يتكون في صورة طبقات على حدود الحبيبات، وتسبب طبقات أكسيد الألمنيوم المتكونة على حدود الحبيبات العديد من العيوب في عمليات الصب، وتكون النتيجة هي الحصول دائماً على صبات غير سليمة (unsoundness castings).

8- المنجنيز: المنجنيز في العادة عامل إزالة للأكسجين، وتتراوح النسبة المضافة منه في بعض السبائك ما بين (1%) أو (2%) وليس للمنجنيز أي أثر يذكر على خواص النحاس.

9- الحديد: يضاف الحديد للنحاس بنسب تتراوح ما بين (1%) أو (2%)، وإضافة الحديد للنحاس تزيد من مقاومته للتآكل، وخاصة عند تعرض النحاس أو سبائكه لظروف الاصطدام أو الارتطام مع مياه البحر سريعة الحركة، ويتوزع الحديد بانتظام في السبيكة عند التبريد المفاجئ من درجة الحرارة (900 °م) وليس له تأثير سيئ على عمليات تشكيل النحاس أو سبائكه.

10- القصدير: يساعد إضافة القصدير بنسبة (2%) إلى بعض سبائك النحاس الخاصة التي تحتوي على (9%) نيكل، على زيادة مقاومتها للتآكل، كما تساعد وتسهل عمليات لحام هذه السبائك، وأما إضافة القصدير لسبائك النحاس ذي الوجهين ألفا وبيتا بنسبة (1%) فإنه يمنع التآكل التفضيلي في هذه السبائك، وخاصة في وجود الكلور أو عند زيادة درجة الحرارة أو في حالة نسب الأكسجين المخفضة.

11- الرصاص: يساعد الرصاص ويحسن من قابلية النحاس وسبائكه للتشغيل بالمكنات، ولكنه يقلل من مقاومة التآكل في ماء البحر، كما يمنع تشكيل النحاس أو سبائكه على الساخن نظراً لعدم ذائبية الرصاص في النحاس ولما كان الرصاص ينصهر ويتحول إلى الحالة السائلة عند درجات حرارة تشكيل النحاس على الساخن، فإن هذا بلا شك يسبب العديد من المشاكل، النحاس على الساخن بل إنه في كثير من الأحيان يحول دون تشكيل النحاس على الساخن.

12- الفضة: تضاف الفضة غالباً إلى النحاس بنسبة تتراوح ما بين (200) أو (850) جم للطن، حيث ترفع الفضة درجة حرارة إعادة بلورة النحاس وسبائكه، وهذا يمنع تليينه أو طراوته أثناء اللحام، ويفضل النحاس المحتوي على الفضة في صناعة المولدات الكهربائية المستخدمة في السكك الحديدية والطائرات.

13- السلنيوم والتيلورويوم: إن وجود عنصري السلنيوم والتيلورويوم كشوائب في فلز النحاس أو سبائكه يصعب من عمليات لحامها إضافة إلى تخفيض معامل التوصيل الكهربائي وتشويه نواتج التشكيل على البارد.

4-6-5-3: تقسيم وتسمية النحاس وسبائكه:

يتراوح عدد سبائك النحاس المعروفة وذات التركيبات الكيميائية المحدودة والمستخدمة تجارياً ما بين (150) أو (200) سبيكة، هذا بالإضافة إلى النحاس السبيك. وبعض هذه السبائك ذات أسماء تجارية معروفة ومتداولة منذ فترة طويلة منها: فلز مونتز (Munter metal) ونحاس البحرية الأصفر (Admiralty brass)، وهناك عدد كبير من سبائك النحاس الأخرى غير معروفة باسم معين، كما يتوافر عدد كبير من السبائك الذي طور حديثاً، ولهذا فإنه من الضروري إيجاد طريقة موحدة لتسمية سبائك النحاس منعاً للخلط بينها، ولكي يكون الاسم عالمياً ومتفقاً عليه. وتوجد عدة طرق مختلفة لتقسيم سبائك النحاس، وهذه الطرق على النحو التالي:

1- مستوى الأكسجين في النحاس:

توجد ثلاثة أنواع من سبائك النحاس طبقاً لمحتوى النحاس من الأكسجين، أو كمية الأكسجين المذابة في النحاس، والأنواع الثلاثة هي:

أ- نحاس سميك: يطلق اسم النحاس السميكة على النحاس الناتج مباشرة من المحولات دون إجراء أي عملية من عمليات التنقية المختلفة عليه، ويحتوي النحاس في هذه الحالة على كمية من الشوائب إضافة إلى كمية من الأكسجين الذائب، ويبلغ تركيز النحاس فيه 99.5%).

ب- نحاس خال من الأكسجين (Copper free of oxygen): ينتج النحاس الخالي من الأكسجين بإضافة العناصر المختزلة مثل المنجنيز أو الفوسفور أو غيرهما من العناصر إلى أفران التنقية أثناء عملية التنقية.

ج- نحاس لا يحتوي على أي أكسجين مطلقاً: ويحصل على ذلك النحاس بإضافة العناصر المختزلة إلى أفران التنقية، ويعرف هذا النوع من النحاس أحياناً باسم نحاس منزوع الأكسجين (deoxidized copper). وكما هو واضح فإن طريقة التقسيم المذكورة لا تدخل فيها عناصر السبائكية المضافة للنحاس، وتعتمد فقط على نسبة الأكسجين التي في النحاس، ولهذا فإن هذه الطريقة تصلح فقط لتقسيم النحاس إلى درجات (grades) أو رتب مختلفة طبقاً لمحتواها من الأكسجين وبعض الإضافات القليلة المستخدمة لإزالة الأكسجين وانتزاعه، كما يعيب هذه الطريقة أيضاً صعوبة وضع الحدود بدقة بين الأنواع الثلاثة.

2- سبائك طروقة وأخرى مصبوبة:

تنقسم سبائك النحاس إلى مجموعتين أساسيتين تبعاً لطريقة التشكيل، الأولى مجموعة سبائك النحاس الطروقة، والمجموعة الأخرى هي سبائك النحاس المصبوبة. وليس هناك أي تقسيمات داخلية في سبائك النحاس المصبوبة، أما سبائك النحاس الطروقة، ونظراً لأن النحاس ومعظم سبائكه عبارة عن وجه واحد متجانس، فهي لا تتأثر بالمعالجة الحرارية، ويمكن فقط التحكم في مقاومتها عن طريق التشكيل على البارد. وتقسم سبائك النحاس الطروقة عندئذ إلى نوعين أو فئتين، هما سبائك النحاس الطروق المطبع (temper wrought copper allows) وسبائك النحاس المشكلة على البارد (cold rolled copper alloys) يستخدم تطبيع التلدين التشكيل عند درجة الحرارة العالية ويوصف بمدى حجم الحبيبات، ويعبر عنه بمتوسط حجم الحبيبات بالمليمتر ويعتمد أفضل حجم للحبيبات المناسبة لتطبيق معين على سمك المادة المراد تشكيلها

وعمق السحب ونوعية السطح المطلوب بعد السحب، ويعتمد هذا النوع من التقسيم فقط على نوع التشكيل، ولم يدخل فيه الأنواع المختلفة من السبائك طبقاً لتركيبها الكيميائي أو الاستخدامات. ولهذا فإن هذا التقسيم قاصر وغير مفيد.

3- التقسيم طبقاً للتركيب الكيميائي والاستخدام:

يمكن تقسيم سبائك النحاس الأكثر شيوعاً واستخداماً إلى المجموعات التالية:

<u>أولاً- سبائك النحاس الأصفر (Brass)</u>: هذه هي سبائك النحاس – زنك؛ وتقسم سبائك النحاس الأصفر إلى المجموعات الفرعية التالية:

1- النحاس الأصفر المكون من الوجه ألفا: تحتوي السبائك في هذه الحالة على نسبة من الزنك تصل إلى (36%) وتنقسم سبائك النحاس الأصفر ألفا إلى نوعين طبقاً لكمية الزنك المضاف:

آ- الوجه ألفا الأصفر للنحاس الأصفر (yellow alpha brass) تتراوح نسبة الزنك في هذه المجموعة من السبائك ما بين (20%) أو(36%).

ب- الوجه ألفا الأحمر للنحاس الأصفر (red alpha brass) تتراوح نسبة الزنك في مجموعة السبائك هذه ما بين (5%) أو (20%).

2 – النحاس الأصفر ذو الوجهين: ألفا وبيتا: تحتوي السبائك في هذه الحالة على نسبة من الزنك تتراوح ما بين (54%) أو (62%).

<u>ثانياً: سبائك البرونز (Bronze alloys)</u>: تتكون هذه السبائك من النحاس بالإضافة إلى عنصر سبائكي تصل نسبته إلى (12%) وتنقسم سبائك هذه الفئة إلى أربع مجموعات طبقاً لعنصر السبائكية المضاف:

1 – برونز قصديري (Tin bronze): يسمى أحياناً فقط باسم البرونز (bronze) نظراً لأن هذه السبيكة هي أساس جميع أنواع سبائك البرونز المعروفة والتي عرفت واستخدمت في الماضي، ومنها أطلق اسم عصر البرونز (Bronze Age) على إحدى حقب التاريخ القديم. وتصل نسبة القصدير في برونز القصدير إلى حوالي (12%) وأحياناً تضاف إليها عناصر أخرى مثل الفوسفور، وأحياناً أخرى يضاف النيكل.

2 – برونز سليكوني (Silicon bronze): تصل نسبة السليكون المضاف إلى النحاس إلى حوالي (3%) مع إضافة الحديد أو المنجنيز.

3 – *برونز ألومنيي (Aluminum bronze)*: تصل نسبة الألمنيوم المضاف إلى النحاس إلى حوالي (12%)، وفي بعض الأحيان توجد إضافات قليلة من بعض العناصر الأخرى: حديد أو منجنيز أو نيكل.

4 – *برونز بيريليومي (Beryllium bronze)*: هو سبيكة من النحاس مضافاً إليها حوالي (2%) بيريليوم.

ثالثاً: سبائك الكوبرونيكل (Cupro-nickel alloys): هي سبائك النحاس مضافاً إليها حوالي (30%) نيكل، ويضاف إليها في بعض الأحيان عنصر الحديد.

رابعاً: سبائك النيكل – فضة (Nickel – sliver): هي سبائك من النحاس والنيكل والزنك، وبالرغم من أن اسمها يظهر فيه الفضة، إلا أنها لا تحتوي على أية كمية من الفضة.

خامساً: النحاس منخفضة السبائكية (Low alloyed copper) تقسم هذه المجموعة إلى:

1- *النحاس السميك*: وهو النحاس المحتوي على كمية من الشوائب (أي لم تجر عليه عملية التنقية).

2 – *النحاس عالي النقاوة*: نحاس أجريت عليه واحدة أو أكثر من عمليات التنقية مع إضافة كميات قليلة من بعض العناصر لتحسين خواص معينة فيه، مع ملاحظة عدم تخفيض معامل التوصيل الكهربائي للنحاس بدرجة ملحوظة.

سادساً: سبائك متنوعة: تدخل تحت هذه المجموعة سبائك النحاس التي لم يتم ذكرها، وذلك إما بسبب أنها جديدة، أو أنها قليلة الاستخدام، أو أنها قيد التطوير وأهم هذه السبائك ما يلي:

1 – *نحاس – كروم*: نحاس مضاف إليه حوالي (1%) كروم.

2 – *نحاس- زركونيوم*: سبيكة من النحاس المحتوية على (1%) زركونيوم.

3 – *نحاس . منجنيز*: نحاس مضاف إليه حوالي (50%) منجنيز.

يظهر من هذا الاستعراض السريع لسبائك النحاس أن طريقة التقسيم هذه أفضل من الطرق السابقة لتقسيم سبائك النحاس، إلا أنه يعيبها عدم تفريقها بين السبائك المصبوبة والسبائك الطروقة. وبوجه عام، تضاف عناصر أخرى إلى النحاس أو بعض سبائكه للوصول إلى خواص معينة، وسيأتي ذكر الإضافات المختلفة إلى سبائك النحاس الثنائية عند الحديث عن سبائك النحاس التجارية.

4- التقسيم العالمي وترقيم سبائك النحاس:

يقسم النحاس وسبائكه طبقاً للنظام الذي وضعته وأشرفت عليه جمعية تطوير النحاس (Copper Development Association) (CDA)، ويقوم هذا النظام على وضع أرقام لكل سبيكة. وفي النظام العالمي لتقسيم وترقيم سبائك النحاس خصصت الأرقام من (C100) إلى (C799) لسبائك النحاس المطروقة (copper wrought alloys)، أما الأرقام التالية من (C800) إلى (C999) فقد خصصت لسبائك النحاس المصبوبة، وفي هذين النظامين هناك مجموعات فردية أو تقسيمات داخلية، كما هو مبين في الجدول (4-20) وتقوم التقسيمات الفرعية طبقاً لنوع عنصر السبائك، فالرقم (200) هو لسبائك النحاس - زنك، أما رقم (300) فقد خصص لسبائك

النحاس- زنك - رصاص وهكذا... وبهذا فإن هذه الطريقة تجمع بين مميزات التقسيم حسب التركيب الكيميائي وكذا ظروف تشكيل السبيكة، وهي المتبعة عالمياً.

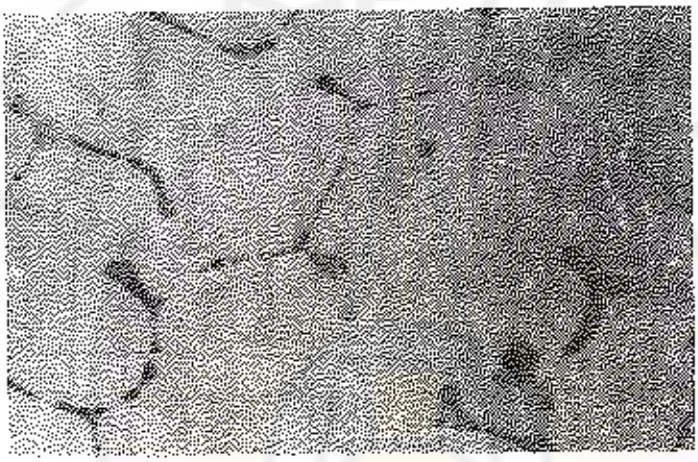
4-6-5-4: النحاس غير السبائكي Unalloyed copper: هناك ثلاثة أنواع من هذا النحاس:

- النحاس السبيكي (أو السبيك) ويطلق أحياناً عليه النحاس العسير.
- النحاس الخالي من الأكسجين.
- النحاس المختزل بالفوسفور.

وفيما يلي نناقش هذه الأنواع الثلاثة وسبائك النحاس، ويبين جدول (4-21) عدداً من التركيبات الكيميائية لهذه السبائك وأهم تطبيقاتها.

1- النحاس عالي النقاوة electrolyte tough- pitch copper: يرمز لهذا النوع من النحاس بالرمز (ETP) ورقم السبيكة هذه هو (CDA110)، وفي بعض الأحيان يطلق عليه اسم آخر هو (Oxygen-Free High - Conductivity Copper) (OFHC) وتحتوي هذه المادة على نسبة من النحاس تصل إلى (99.9%) وتتراوح نسبة الأكسجين به ما بين (0.02%) أو (0.05%) ويتحد الأكسجين مع النحاس مكوناً ثاني أكسيد النحاس (Cu_2O) وعند صب هذا النحاس، فإنه يكون مع أكسيد النحاس خليط أيوتكتيكياً من التركيب الشجري المتداخل المبين في شكل (4-38) وبعد التشكيل والتلدين يتحطم التركيب الشجري المتداخل وتتكر أوصاله كما هو مبين في شكل (4-39) ونتيجة لتكسر التركيب الشجري تتحسن مقاومة

المادة. ويساعد وجود الأكسجين على تحويل بعض عناصر الشوائب إلى أكاسيدها كما سبق شرحه عند الحديث عن تأثير الأكسجين كأحد الشوائب، ويساعد وجود الأكسجين في الصب على منع تكون أنابيب الفجوات (pipe cavities) بداخل الصبة، ويتكون بدلاً عنها الفراغات الصغيرة (blowholes) وعند تشكيل النحاس السبيك على الساخن تلتحم الفتحات أو الفراغات الصغرة معاً وتختفي، وهذا يشبه إلى حد كبير ما يحدث في سبائك الفولاذ. ووجود الأكسجين بنسبة (0.04%) في النحاس السبيك يزيد من توصيله الكهربائي؛ نظراً لأنه يزيل بعض الشوائب ذات التوصيل الكهربائي المنخفض، حيث يكون معها أكاسيد مركبة كما سبق شرحه.



الشكل (4-38): النحاس عالي النقاوة المحتوي 99.95 % نحاس و 0.03 % أوكسجين ويتضح فيه تكوين ثاني أكسيد النحاس الشجري Cu2O. النقط السوداء عبارة عن مساحات غازية تكونت أثناء الصب.

يعد النحاس السبيك أرخص أنواع النحاس التجاري، ويستخدم في إنتاج الأسلاك والقضبان والألواح والشرائح النحاسية؛ كما يستعمل هذا النحاس في تغطية الأسطح كما في المباني القديمة وصناعة مجاري المياه ومبردات السيارات والحاشيات وأوعية الشاي، وأوعية الضغط وأجهزة التقطير.

جدول (4-20): نظام ترقيم النحاس وسبائكه (Smith, 1995).

الرقم	الدلالة
	سبائك النحاس المطروقة
C1 xx	النحاس[1] وسبائك النحاس المحتوية على نسبة عالية من النحاس[2]
C2 xx	سبائك النحاس- زنك (سبائك النحاس الأصفر)
C3 xx	سبائك النحاس- زنك- قصدير (النحاس الأصفر المرصص)
C4 xx	سبائك النحاس- زنك . قصدير (النحاس الأصفر المقصدر)
C5 xx	سبائك النحاس- قصدير (البرونز)
C6 xx	سبائك النحاس- ألمنيوم (برونز التي لومينيي)
C7 xx	سبائك النحاس- سليكون (برونز سليكوني) وأي سبائك أخرى من النحاس والزنك. سبائك النحاس- نيكل، والنحاس- نيكل- زنك (فضيات النيكل، أو سبائك النيكل- فضة).
	سبائك النحاس المصبوبة
C8 xx	النحاس المصبوب، والسبائك المصبوبة العالية القيمة في النحاس، وسبائك النحاس الأصفر المختلفة الأنواع المصبوبة، وسبائك برونز المنجنيز المصبوبة، وسبائك النحاس . زنك . سليكون المصبوبة .
C9 xx	سبائك النحاس . قصدير المصبوبة، وسبائك النحاس . قصدير . الرصاص المصبوبة، وسبائك النحاس . قصدير . نيكل المصبوبة، وسبائك النحاس . ألمنيوم . حديد المصبوبة وسبائك النحاس - نيكل - حديد المصبوبة وسبائك النحاس . نيكل . زنك المصبوبة.

(1): أقل نسبة نحاس في هذا الفلز (99.3%).

(2): تحتوي هذه السبيكة على أقل من (99.3%) نحاس، ولكن النحاس المحتوي على (96%) لا تدخل تحت أي مجموعة أخرى من سبائك النحاس.

جدول (4-21): التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية واستخدامات بعض سبائك النحاس المطروقة (ASM Dalabook, 1975)

الرقم والاسم	التركيب الكيميائي الاسمي %	المصطلح التجاري	الخواص الميكانيكية: مقاومة الشد (ksi (MPa)	الخواص الميكانيكية: إجهاد الخضوع (ksi (MPa)	الخواص الميكانيكية: النسبة المئوية للاستطالة	مقاومة التآكل	مقاومة التشغيل بالمكائن	طرق التشكيل والاستخدامات
101 النحاس الالكتروليتي الخالي من الأكسجين	99.99% Cu	م.ف.أ.ب و.ش (1)	66.32 (462.224)	53.49 (371.70)	554	جيد – ممتاز	20	ممتاز في التشكيل على الساخن وعلى البارد جيد في الطرق والطرق الساخن، قليل للطرق والضغط والعزل، ويستخدم في قضبان التوصيل الكهربائي وفي الموصلات الكهربائية المتنوعة، والحوائل بين الفلز والزجاج والكابلات المحورية وأنابيب الموكروويف ومقاومات التيار.
102 النحاس الخالي من الأكسجين	99.95% Cu	م.ف.أ.ب و.ش (1)	66.32 (462.224)	53.49 (371.70)	554	جيد – ممتاز	20	التشكيل كما في سبيكة 101 الاستخدامات: قضبان التوصيل الكهربائية وموجهات الموجات.
103 نحاس خالٍ من الأكسجين ونسبة الفوسفور قليلة جداً	99.99% Cu	م.ف.أ.ب و.ش (1)	66.32 (462.224)	53.49 (371.70)	554	جيد – ممتاز	20	التشكيل كما في سبيكة 101 يستخدم في قضبان التوصيل وأية استخدامات تتطلب توصيلاً جيداً للتيار الكهربائي إضافة إلى سهولة التوصيل واللحام.

104, 105, 107 نحاس خالٍ من الأكسجين محتوٍ على الفضة	99.99% Cu	مرقق بارد وطري (1)	66.32 (462.224)	53.49 (371.70)	554	جيد - ممتاز	20	التشكيل كما في سبيكة 101 وتستخدم في الأنبوبات الأتومانيكية، وأجهزة التسخين، والموصلات الكهربائية وأسلاك التوصيل وأجزاء الراديو ومفتاح التيار والثنايات، وأجهزة التشغيل الكهربائية ودلافين الطباعة ومغلفات الغازات وألواح دوائر الطباعة.
108 نحاس خالٍ من الأكسجين قليل الفوسفور	99.99% Cu	مرقق بارد وطري (1)	66.32 (462.224)	53.49 (371.70)	554	جيد - ممتاز	20	التشكيل كما في سبيكة 101 وتستخدم في الثلاجات ومكيفات الهواء وخطوط الغاز والتسخين وأنابيب احتراق الزيت، وأنابيب الأحمال الصحية والمنزلية، وأنابيب المكثفات، والمبادلات الحرارية، وأنابيب الحاوب ومياه التحلية، وخطوط صناعة النسيج والورق.

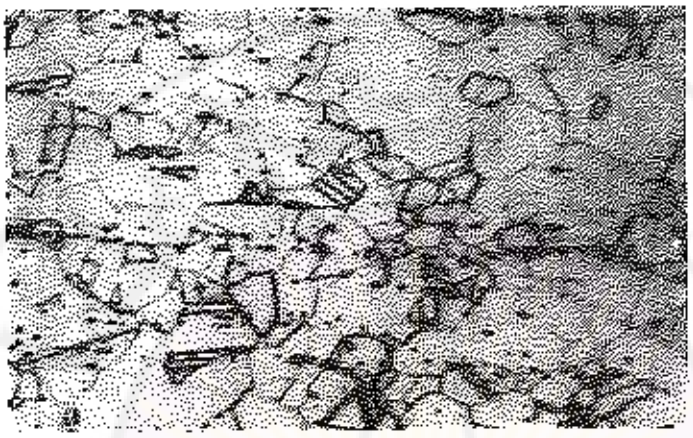
110 النحاس الالكتروليتي المنسي المزقت	99.99% Cu	م-ق-أ-ب و-ق-ل	66.32 (462.224)	53.49 (371.70)	554	جيد – ممتاز	20	التشكيل كما في سبيكة 101 يستخدم في أسطح العازل والحشوات، والموصلات الكهربائية والمسامير والدفايات والغلايات الساخنة، وذرافين الطباعة والموصلات وأجزاء الراديو، والبالوعات والمزاريب.
122 النحاس الفسفوري المختزل ونسبة الفسفور فيه عالية	99.99% Cu	م-ق-أ-ب و-ق-ل	66.32 (462.224)	53.49 (371.70)	554	جيد – ممتاز	20	التشكيل كما في سبيكة 101 يستخدم في خطوط الغازات، والسخانات، والأنابيب التي تحرق الزيت، وأنابيب وموسير الأعمال الصحية، والمكثفات، والمبادلات الحرارية، وأعمال الطبب، وخطوط الماء والبخار، وخطوط الهواء والمجاري.
125, 127, 129, 130 نحاس معالج بالحرارة يحتوي على فضة	99.99% Cu	م-ق-أ-ب و-ق-ل	66.32 (462.224)	53.49 (371.70)	554	جيد – ممتاز	20	التشكيل كما في السبيكة 101 الاستخدامات كما في سبيكة 110
142 نحاس معاد اختزاله محتوي على فسفور وزرنيخ	99.99% Cu	م-ق-ب	55.32 (385.224)	50.10 (350.70)	45.8	جيد – ممتاز	20	التشكيل كما في سبيكة 101 يستخدم في صناعة الأنواع المستخدمة في صندوق احتراق القطارات والمحولات والمبادلات الحرارية وأنابيب المكثفات.

143 نحاس معدّ اختزاله محتوي على كادميوم	99.99% Cu 0.07 Cu	م	65.32 (455.224)	62.10 (434.70)	45.2	جيد - ممتاز	20	التشكيل كما في سبيكة 101 يستخدم زعانف التبريد في القاطرات والمبردات المستخدمة في الأغراض الثقيلة، ومكيفات الهواء، وعاكسات التيار في الموتورات والدبابات والموصلات الكهربائية، ويقلل التلدين من استخداماتها الكهربائية.
145 نحاس معدّ اختزاله محتوي على فسفور وعنصر التيلوريوم	99.5% Cu 0.5 Te 0.08P	مرفوض	56.32 (392.224)	51.10 (357.70)	50.3	جيد - ممتاز	20	التشكيل كما في سبيكة 101 يستخدم في المنتجات التي تحتاج لحدادة، والمنتجات التي تحتاج لمقاومة جيدة للتآكل والدين النحاس أو مجموع ذلك الخواص. ومن الاستخدامات الموصلات الكهربائية، والأغراض المنزلية وخاصة الأعمال الصحية، وقواعد الترانزستور.

ويختزل النحاس السبيك عند درجة الحرارة 400 °C بالغازات المختزلة وبالذات الغازات المحتوية على الهيدروجين. ولما كان حجم ذرات الهيدروجين صغيرة فيمكنها أن تتخلل إلى النحاس مكونة معه محلولاً جامداً بالفرجات، ونظراً لأن ذائبية الهيدروجين في النحاس صغيرة، كما هو واضح في شكل (4-40) كما أن العناصر الأخرى الذائبة في النحاس من عمليات الاستخلاص أو المضافة إليه لا تساعد على زيادة ذائبية الهيدروجين في النحاس، فيما عدا النيكل، كما هو

مبين في شكل (4-41) لذا فإن الهيدروجين المذاب يتفاعل مع أكسيد النحاس (Cu_2O) المنتشر والمتشتت داخلياً بالمادة ليكون بخار الماء طبقاً للتفاعل المبين في المعادلة التالية:

$$Cu_2O + H_2(g) \text{ (المتحلل إلى النحاس)} \longrightarrow 2Cu + H_2O\ (g)$$



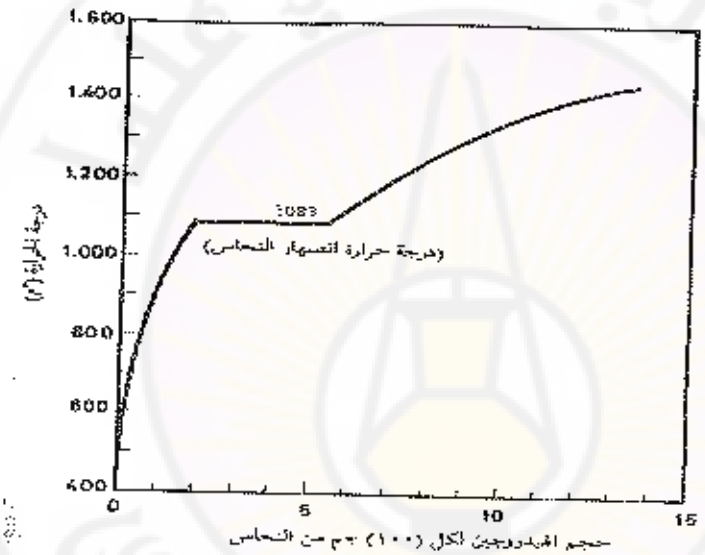
شكل (4-39): قطاع ميكروسكوبي في النحاس السبيك المبين بالشكل (4-38) بعد تشكيله على الساخن. والتركيب البنائي في هذه الحالة عبارة عن ركائز طولية من أكاسيد النحاس مع حدوث إعادة بلورة كاملة للنحاس.

ويستمر الاختزال، نظراً لأن تركيز الهيدروجين الذائب أعلى من كمية أكسيد النحاس، ولهذا يسير التفاعل في الاتجاه إلى اليمين. ونظراً لأن بخار الماء الناتج من هذا التفاعل لا يذوب في النحاس فإنه يترسب على حدود البلورات، ومن ثم فإن بخار الماء يعمل على دفع البلورات بعيداً عن بعضها، ويقلل مطيلية النحاس بنسبة كبيرة جداً، وقد تصل نسبة التخفيض في بعض الأحيان إلى (85%) من القيمة الأصلية، كما أن بخار الماء المتكون يخفض كثيراً من مقاومة النحاس للشد، وتتراوح نسبة التخفيض في مقاومة الشد بين (30%) أو(40%) كما ينشأ عن وجود بخار الماء على حدود الحبيبات ضغط عال يسبب كسر النحاس، ويكون الكسر في هذه الحالة على حدود الحبيبات. لكل هذه الأسباب لا يمكن توصيل النحاس السبيك أو لحامه عند درجات حرارة أعلى من 400 °C ويوضح شكل (4-42) الفراغات الداخلية المتكونة في

النحاس السبيك ـ الحدود السميكة للحبيبات ـ بعد تعرضه للهيدروجين لمدة نصف ساعة عند درجة الحرارة 850 °C.

2- النحاس الخالي من الأكسجين (OFC) (oxygen- free copper):

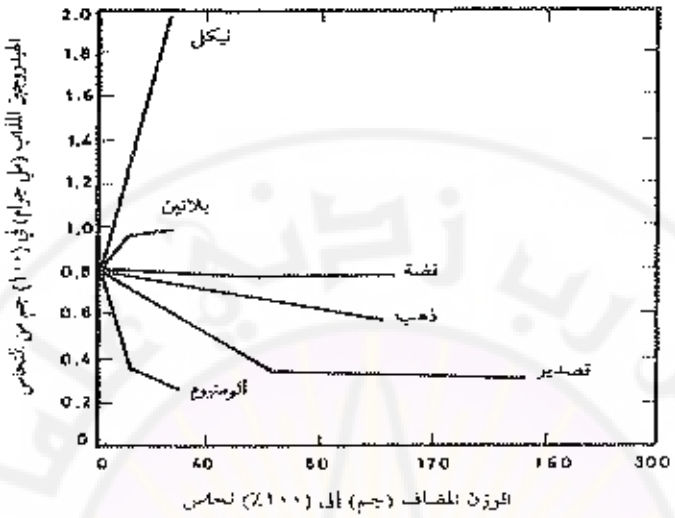
يحصل على النحاس الخالي من الأكسجين بصهر وصب نحاس الكاثود (Cathode Copper) الناتج من عمليات التنقية الكهروكيميائية ـ في جو مختزل من أول أكسيد الكربون والنيتروجين حتى يمنع الأكسجين من دخول النحاس ويوضح شكل (33، 5) التركيب الميكروسكوبي للنحاس الخالي من الأكسجين في درجة النقاوة (99.95%) وبمقارنة الأشكال (4-38) أو (4-39) أو (4-43)



الشكل (4-40): تأثير درجة الحرارة على ذائبية الهيدروجين في النحاس المنصهر الجامد عند درجة حرارة واحدة.

يتضح الفرق في التركيب الميكروسكوبي بين النحاس الخالي من الأكسجين والنحاس المحتوي على الأكسجين. ولا يحتوي النحاس الخالي من الأكسجين سواء في حالته المصبوبة، أو بعد التشكيل على البارد على أي قدر من أكاسيد النحاس الشجرية أو الفجوات الغازية، كما هو مبين في شكل (4-44) الذي يوضح التركيب المجهري للنحاس الخالي من الأكسجين. ويمتاز

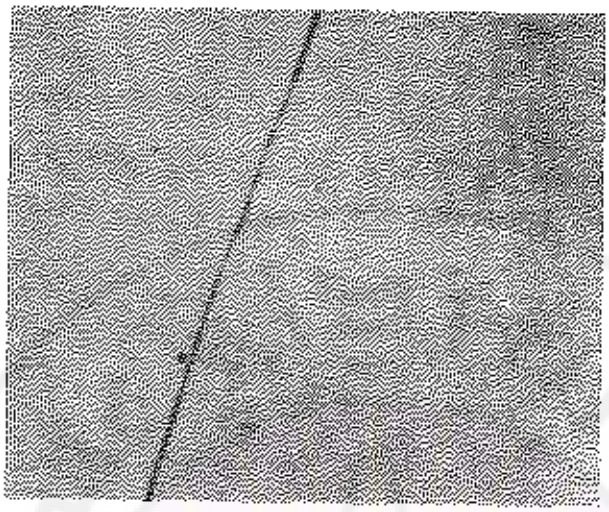
النحاس الخالي من الأكسجين بأنه غير قابل للتقصف بالهيدروجين عند درجات الحرارة العالية، نظراً لخلوه من أكاسيد النحاس كما هو واضح في شكل (4-45).



الشكل (4-41): تأثير العناصر المضافة على ذائبية الهيدروجين في النحاس.



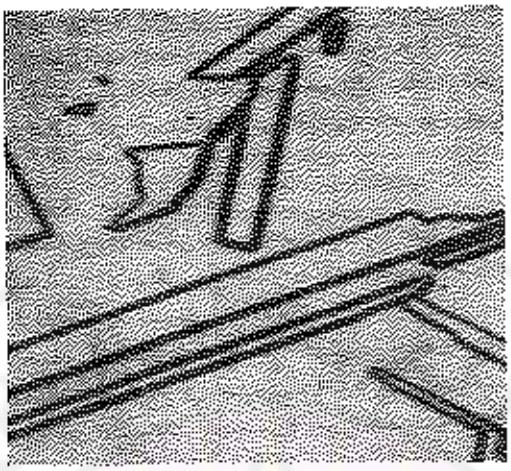
شكل (4-42): قطاع ميكروسكوبي في النحاس السبيك بعد تعريضه لغاز الهيدروجين لمدة نصف ساعة عند درجة الحرارة (850 °C). ويتضح من الشكل تكون الثقوب الداخلية الناشئة عن تكوين بخار الماء، ونتيجة لذلك يصبح النحاس هشا ينكسر عند أقل حمل خارجي.



الشكل (4-43): قطاع ميكروسكوبي في النحاس الخالي من الأكسجين. ويبين الشكل حدود الحبيبات وقليلا من المسامية الدقيقة، لاحظ غياب أكسيد النحاس و التركيب الشجري.



الشكل (4-44): قطاع في البناء الميكروسكوبي للنحاس الخالي من الأكسجين بعد تشكيله على الساخن، ويلاحظ نظافة البنيان وخلوه من أذرع أكاسيد النحاس.



الشكل (4-45): قطاع ميكروسكوبي يوضح النحاس الخالي من الأكسجين بعد تعريضه لغاز الهيدروجين لمدة نصف ساعة عند درجة الحرارة (°C 850). لاحظ عدم وجود أية مسام في المادة، ويعني ذلك عدم تقصفها.

إن التوصيل الكهربائي للنحاس الخالي من الأكسجين ذي النقاوة (99.95%) يعادل توصيل النحاس السبيك، وتبلغ درجة توصيلهما (102%) من درجة توصيل النحاس الملدن القياسي (IACS). وزيادة التوصيل الكهربائي بإزالة الأكسجين تنخفض بزيادة كمية الشوائب المذابة، مثل الحديد. وعندما يتم صهر وصب النحاس المنقى بالتحليل الكهربوكيميائي. تبلغ نقاوة النحاس في هذه الحالة (99.99%) بمعزل عن الأكسجين أي في وسط مختزل، فنحصل بذلك على النحاس الخالي تماماً من الأكسجين، ويطلق عليه سبيكة (CDA-101). ويفضل استخدام النحاس الخالي من الأكسجين في كثير من التطبيقات الإلكترونية، ويعد النحاس الخالي من الأكسجين أغلى سعراً وأكثر تكلفة من النحاس السبيك؛ نظراً لما يتطلبه من عمليات خاصة في الصهر والصب.

3- النحاس المنزوع الأكسجين (Deoxidized Copper):

نحصل على النحاس المنزوع الأكسجين بإضافة كمية كافية من الفوسفور قبل الصب حيث يتحد الفوسفور مع جميع الأكسجين في النحاس مكوناً خامس أكسيد الفوسفور (P_2O_5)، وعمل الفوسفور في هذه الحالة شبيه بأثر المنجنيز في عمليات إزالة الأكسجين من التي للفولاذ

والنحاس المنتج بهذه الطريقة عالي التوصيل الكهربائي عندما يحتفظ في بنائه بنسبة أقل من (0.009%) فوسفور ، أما إذا استخدمت نسب أعلى من الفوسفور في إزالة الأكسجين، ليحتفظ النحاس في بنيته على (0.04%) فوسفور ، وهو ما يطلق عليه سبيكة (CDA122)، فإن ذلك يؤدي إلى انخفاض التوصيل الكهربائي للنحاس بنسبة (25%) ولا يصلح هذا النحاس للاستخدامات الكهربائية. والكمية الزائدة من الفوسفور في النحاس تمنع امتصاص الأكسجين أثناء عمليات التشكيل على الساخن والتلدين، وبهذا تسمح، بل وتساعد على توصيل النحاس ولحامه. ولكن يعيب النحاس المنزوع أكسجينه تكوين فجوات أنبوبية أثناء التجمد، ولما كان الجزء المحتوي على عيوب التجمد (فجوات أنبوبية) سيتم إزالته، فإنها تفصل في النهاية على فلز النحاس الخالي من العيوب.

يضاف الزرنيخ أيضاً إلى النحاس المنزوع أكسجينه بنسبة تبلغ حوالي (0.5%) وذلك للنحاس المستخدم في غلايات قطارات البخار، حيث إن الزرنيخ المضاف يزيد من مقاومة النحاس عند درجات الحرارة العالية، ويرفع من درجة حرارة التليين (Softening Temperature) لترتفع درجة حرارة التليين من درجة الحرارة (190) للفلز النقي إلى درجة الحرارة (550) مئوية للنحاس المحتوي على الزرنيخ.

وقد ساعدت إضافة الزرنيخ إلى النحاس على استخدامه في صناعة غلاية البخار في القطارات الحرارية، وأنابيب الغلايات ومسامير البرشام؛ نظراً لاحتفاظ السبيكة بمعامل توصيل حراري عالٍ مع احتفاظها بمقاومتها عند درجات الحرارة العالية.

4-6-5-5: النحاس الأصفر (Brasses):

تسمى سبائك النحاس الأصفر هذه أحياناً باسم سبائك النحاس – زنك، والنحاس الأصفر هو مجموعة أو سلسلة واسعة ومتنوعة من سبائك النحاس عند إضافة الزنك إليه بنسب مختلفة تصل إلى حوالي (40%) وتتجمع في سبائك النحاس الأصفر أفضل خصائص الفلزين معاً، وتأثير إضافة الزنك على الخواص الميكانيكية للنحاس موضح في جدول (4-22)، وتعد مجموعة سبائك النحاس الأصفر هذه أهم مجموعة من السبائك الهندسية غير الحديدية. وفي معظم الحالات فإن إضافة عناصر المحلول الجامد تقلل المطيلية مع زيادة المقاومة، ولكن كما هو موضح في جدول (4-22) فإن إضافة الزنك إلى النحاس تزيد كلاً من المقاومة والمطيلية لسبائك النحاس (30%) زنك. وتحتوي بعض سبائك النحاس . زنك على عناصر سبائكية أخرى

بنسب قليلة، مثل القصدير والألمنيوم والسليكون والمنجنيز والنيكل والرصاص، وتعرف المادة عندئذ باسم سبائك النحاس الأصفر (alloy brasses) وتضاف عناصر السبائكية المذكورة . والتي لا تتعدى نسبة إضافتها (4%) للأسباب التالية:

1 – إعطاء اللون المطلوب والمرغوب فيه للسبيكة.

2 – تحسين الخواص الميكانيكية: المقاومة والمطيلية والتشغيل بالمكنات.

3 – رفع مقاومة السبائك للتآكل.

ويبين جدول (4- 23) التركيب الكيميائي للنحاس الأصفر وسبائك النحاس الأصفر وكذلك أهم تطبيقات هذه السبائك.

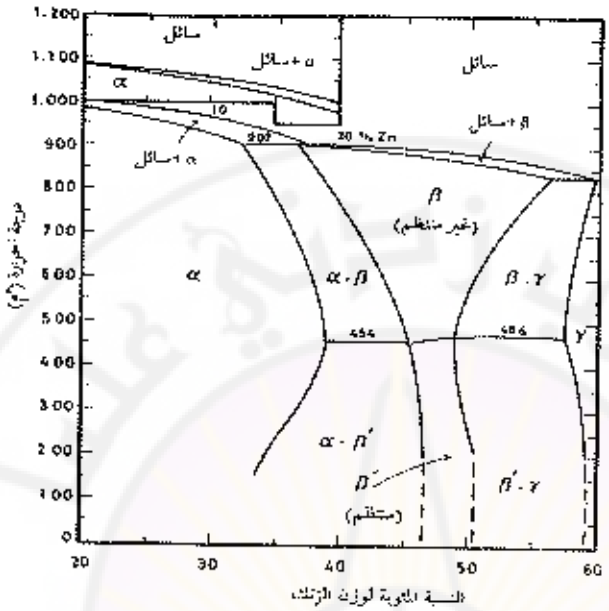
جدول (4-22): إضافات الزنك على خواص سبائك النحاس Smith, 1992

النسبة المئوية للزنك المضاف	الخواص الميكانيكية			
	مقاومة الشد		النسبة المئوية للاستطالة(1)	رقم برنل للصلادة(2)
	MPz	ksi		
0	224	32	46	38
5	252	36	49	49
10	287	41	52	54
15	294	42	56	58
20	301	43	59	56
25	315	45	62	54
30	322	46	65	55
35	322	46	60	55
4(B)	378	54	45	75

(1): الطول القياسي (5) سم. (2): كرة قطرها (10) مم، وحمل (500) كجم.

ويظهر من منحني الاتزان الحراري للنحاس . زنك الموضح في شكل (4-46) أن ذائبية الزنك في الوجه ألفا تزيد من (32.5%) عند درجة الحرارة (902 °C) لتصل إلى (39%) عند درجة الحرارة (454 °C) وعند تبريد هذه السبائك بمعدلات بطيئة جداً . والتي تسمح للسبيكة بالوصول إلى حالة الاتزان . فإن ذائبية الزنك في النحاس تقل مرة أخرى لتصل إلى (35.2%) عند درجة الحرارة (250 °C). ونظراً لأن انتشار الزنك في النحاس بطيء جداً عند درجات الحرارة الأقل

من (450 °C) فيستفاد من هذه الظاهرة المهمة في المعالجات المحلولية الحرارية لسبائك النحاس الأصفر لزيادة مقاومتها بالتصليد بالترسيب.



الشكل (4-46): الجزء الغني بالنحاس في منحني الاتزان الحراري للنحاس – زنك.

جدول (4-23): تأثير اضافات الزنك على خواص سبائك النحاس

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي الإسمي (%)	ظروف التشكيل والاستخدامات
210 سبيكة تذهيب 95% Gilding (طلاء بالذهب)	95.0 Cu 5.0 Zn	النحاس الأصفر غير السبانكي: ممتازة في التشكيل على البارد، وجيدة التشكيل على الساخن والسحب والختم وصناعة العملات، كما أنها جيدة في القص، والغزل والعصر ووضع العلامات عليها. تستخدم في صناعة العملات، والميداليات، والطلقات النارية، وأغطية المنصهرات،

		وقاعدة للأشغال الذهبية، والدروع التذكارية.
220 برونز تجاري 90% 90% Commercial bronze	90.0 Cu 5.0 Zn	التشكيل كما في حالة السبيكة (210) إضافة إلى إمكانية عمل القلاووظ والعقد والليات وكذلك الطرق على الساخن والضغط. تستخدم في إنتاج أغلفة أدوات الزينة، وأجزاء القطع البحرية، والمسامير والمفصلات، وأجزاء الشبكات المصبعة وقاعدة للمشغولات الذهبية.
220 برونز الحلي 87.5% 87.5% Jewelry bronze	87.5 Cu 12.5 Zn	التشكيل مثل سبائك (210) إضافة إلى إمكانية القلوظة وكذلك العقد. تستعمل للزوايا والقنوات والسلاسل، وبعض الحلي، وعلب أدوات التجميل، وقاعدة للمشغولات الذهبية.
230 نحاس أصفر أحمر 85% Low brase	85.0 Cu 15.0 Zn	ممتازة في التشكيل على البارد، وجيدة في التشكيل على الساخن: تستخدم في شرائح التعرية الجوية، وأنابيب وقاية الأسلاك الكهربائية، ومقبض طفايات الحرائق، وأنابيب المكثفات والمبادلات الحرارية، وأنابيب الأعمال الصحية، وقلب الدفايات.
240 نحاس أصفر منخفض 80% Low brass	80.0 Cu 20.0 Zn	ممتازة في التشكيل على البارد والتشكيل كما في السبيكة (230)، تستعمل في غطاء البطاريات، والأجهزة الموسيقية، وعقارب الساعات، وخطوط المضخات، والخراطيم القابلة للثني.
260 نحاس أصفر للخراطيش 70% Cartridge brass	70.0 Cu 30.0 Zn	ممتازة في التشكيل على البارد وتشكل بالطريقة نفسها في السبيكة (230) تستخدم في قلب السخانات والدفايات والخزانات، وأغلفة الأضواء الكاشفة، وحامل اللمبات،

		والأقفال والمفصلات، ومكونات الأغلفة للطلقات، وأجزاء أنابيب الصرف الصحي.
170.268 نحاس أصفر أصفر Yellow brass	65.0 Cu 35.0 Zn	ممتازة في التشكيل على البارد وتشكل بالطريقة نفسها في السبيكة (230) الاستخدامات كما في سبائك (260) عدا أنها لا تستخدم لأغلفة الطلقات النارية.
280 فلز مونتز Muntz metal	60.0 Cu 40.0 Zn	ممتازة في التشكيل والطرق على البارد لتكوين الخرطوشة والانحناءات، تسمح بالحدادة والضغط على الساخن وتسمح بالقص. تستخدم في المسامير والصواميل الكبيرة في الأعمال المعمارية، وقضبان التوصيلات، وألواح المكثفات، وأنابيب المبادلات والمكثفات الحرارية.
445,444,443 سبيكة نحاس البحرية الأصفر Inhibited admiralty	71.0 Cu 28.0 Zn	النحاس الأصفر المحتوي على عناصر سبائكية: ممتازة في التشكيل على البارد ويسهل عمل الانحناءات فيها. تستخدم في أنابيب وألواح المكثفات والمبخرات والمبادلات الحرارية، وأنابيب جهاز التقطير، والحلقات المعدنية أو التوصيلات بين المواد بطريقة محكمة.
467,464 سبيكة النحاس البحري Naval brass 0.755	60.0 Cu 30.25 Zn	ممتازة في القابلية للتشكيل على الشي لساخن والحداقة الساخنة، تشكل بالسحب في صورة ألواح وهي سهلة السحب والانحناء، والطرق الساخن والضغط. تستخدم في صناعة أجزاء مختلفة من الطائرات: الكور والمسامير والشدات بين الأجزاء، وأجزاء المنشآت البحرية، والصواميل، والمفصلات، وقلب المحابس،

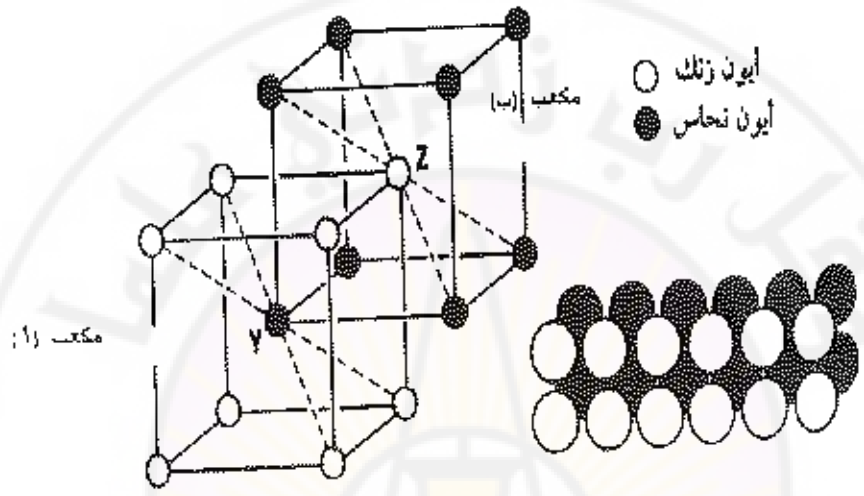
		وألواح المكثفات، وقضبان اللحام، وأعمدة المراوح.
667 نحاس أصفر منجنيزي Manganese brass	70.0 Cu 28.8 Zn 1.2 Mn	ممتاز في التشكيل على البارد، تتشكل بالأغفال (blanking) ويمكن عمل الانحناءات والتجميع، يسهل وضع الأختام واللحام. المنتجات الناتجة تقاوم اللحام الموضعي وخطوط اللحام.
674	58.5 Cu 36.5 Zn 1.2 Al 2.8 Mn 1.0 Sn	ممتازة في التشكيل على الساخن، تصنع بالطرق الساخن والضغط والتشغيل بالمكنات. يستخدم في أجهزة التروس السننية، وقضبان التوصيل، والأعمدة، والألواح المعرضة للتحات الميكانيكي.
675 برونز منجنيزي (أ) Manganese brass (A)	58.5 Cu 1.4 Fe 39.0 Zn 1.0 Sn 0.1 Mn	ممتاز في التشكيل على الساخن يصنع بالطرق على الساخن والضغط. يستخدم في تصنيع جهاز تعشيق التروس في السيارة، وقضبان المنحنيات، والأعمدة، والكرويات، وجسم المحابس، ومقدمة السفينة.
687 نحاس أصفر ألومنيومي زرنيخي Aluminium brass, arsenical	77.5 Cu 20.5 Zn 2.0 Al 0.1 As	ذو قابلية ممتازة التشكيل على البارد للتشكيل الشديد والانحناءات. يستخدم في صناعة أنابيب المكثفات، والمبخرات والمبادلات الحرارية، وألواح المكثفات، وأنابيب أجهزة التقطير والحلقات المعدنية.
688	73.5 Cu 22.7 Zn 3.4 Al 0.40 Cu	ممتازة في التشكيل على الساخن والبارد. تصنع بالأغفال والسحب والتجميع والانحناءات والقسر.

		تستخدم في صناعات الزنبرك، ومفاتيح الكهرباء وتوصيلاتها.
694 نحاس أصفر أحمر سليكوني Silicon red brass	81.5 Cu 14.5 Zn 4.0 Si	ممتاز في التشكيل على الساخن، يصنع بالحدادة ومن خلال القلوظة في المكنات. يستخدم في أجسام المحابس، حيث تتطلب مقاومة عالية للتآكل مقاومة ميكانيكية مرتفعة.

إن البناء البلوري للنحاس هو مكعب متمركز الوجه، كما أن الوجه ألفا لسبيكة النحاس الأصفر المتكون من النحاس والزنك له البناء البلوري نفسه، أي أن التركيب البلوري للوجه ألفا هو مكعب متمركز الوجه، والوجه ألفا هو نوع من المحلول الجامد غير المرتب. أما البناء البلوري للوجه بيتا فهو مكعب متمركز الجسم. وبزيادة نسبة الزنك على (39%) يظهر وجه جديد هو الوجه (β')، وتركيبه (CuZn) ويظهر عنه التبريد البطيء للنحاس الأصفر. والوجه (β') صلد ومقاومته لصدمات، عند درجة حرارة الغرفة، عالية، وعندما يتحول إلى الوجه الآخر بيتا عند درجة حرارة أعلى من (454 °C) يصبح لدناً. والبناء البلوري للوجه (β') مكعب متمركز الجسم، أي أن البناء البلوري للوجه (β') يختلف عن البناء البلوري لكل من النحاس والزنك. ووصف البناء البلوري للوجه (β') بأنه مكعب متمركز الجسم تعبير غير دقيق، فالبناء البلوري للوجه (β') في واقع الأمر مثل كلوريد السيزيوم (Caesium Chloricle) وفيه يرتبط مكعبان بسيطان معاً، كما هو موضح في شكل (4-47) وكل ذرة داخل جسم المكعب محاطة بأربع ذرات من الفلز الآخر. ولقد أثبتت الدراسات الحديثة أنه عند تبريد الوجه (β') بمعدل بطيء جداً فإنه يتحول إلى الإيوتكتويد عند درجة الحرارة (440 °C) معطياً الوجهين (ألفا + جاما) ولكن إذا تم التبريد بالمعدلات الصناعية المعروفة فلا يتغير الوجه (β') ويظل على وضعه. أي يحتفظ ببنائه البلوري نفسه، عند درجة الحرارة العادية ومحتوياً على مقدار من النحاس يتراوح ما بين (48%) أو (50%).

تؤدي زيادة نسبة الزنك في السبيكة إلى أكثر من (50%) إلى ظهور الوجه جاما، والوجه جاما قصيف للغاية، وأي سبيكة محتوية على هذا الوجه غير مناسبة لأي تطبيق أو استخدام هندسي. ونظراً لحدوث ظاهرة القلبية (CONNG) الناتجة من تقارب خطي السيولة والتجمد. فيمكن أن تظهر في السبائك المحتوية على الوجه ألفا كذلك الوجه (β') على حدود حبيبات البلورة، وتعتمد

ظاهرة القلبية على معدل التبريد وتركيب السبيكة، أي مدى قربها من الحدود بين الوجهين ألفا أو(ألفا + بيتا). ويمتص الوجه (β') بسرعة أثناء التشكيل على الساخن ويتكون بنيان (ودمانستاتن) (Widmanstatten) ، المبين في شكل (4-48) عند صب السبائك المكونة من الوجهين ($\alpha + \beta'$) وتبريدها.



الشكل (4-47): التركيب البلوري للنحاس الأصفر (β'): ذرة (Y) تحتل مركز مكعب متمركز الجسم (أ)، بينما الذرة (Z) تحتل موقعا في المكعب المتمركز الجسم (ب)، وهذا ليس مكعبا متمركز الوجه، كما يبدو من الوهلة الأولى، ولكنه من نوع كلوريد السيزيوم.

وأساس تكوين هذا البنيان هو تكوين بلورات الوجه ألفا شبه الأبرية في داخل بلورات الوجه بيتا أثناء التبريد من منطقة الوجه بيتا.

يمكن تقسيم النحاس الأصفر إلى مجموعتين: النحاس الأصفر الذي يشكل على البارد، وهو النحاس الأصفر المكون من الوجه ألفا، والنحاس الأصفر الذي يشكل على الساخن، وهو النحاس الأصفر المكون من الوجهين (ألفا + بيتا).



الشكل (4-48): التركيب البلوري لسبيكة النحاس الأصفر (60%) نحاس -- (40%) زنك ويظهر فيها تركيب "ودمانستاتن" الوجه ألفا ذو اللون الفاتح بينما الوجه (β) فهو اللون الداكن.

1: النحاس الأصفر ألفا (α-Brasses):

تحتوي سبائك النحاس الأصفر ألفا على نسبة من التي لزنك تصل إلى (35%)، والوجه ألفا وجه طري ولين ومطيل عند درجات الحرارة العادية، ولهذا تمتاز سبائك النحاس الأصفر ألفا بالخواص التالية:

1 – معامل مطيلية عالٍ مع قدر كافٍ من المقاومة.

2 – مقاومة جيدة للتآكل.

3 – ألوان جذابة وجميلة، ويختلف اللون على حسب نسبة النحاس في السبيكة، فهي ذات لون أحمر عند النسب المنخفضة من الزنك، وتتحول إلى اللون الأصفر عند تخفيض نسبة النحاس في السبيكة إلى (62%) وزيادة نسبة الزنك إلى (38%).

4 – قابلية جيدة للحام (Solderability) حيث يمكن توصيلها بأسهل وأبسط طرق اللحام المعروفة.

5 – يمكن تغطية سطحها الخارجي بطبقة من النيكل والكروم.

6 – ذات معاملي توصيل كهربائي وحراري عاليين، وبهذا يمكن استخدامها في أوساط انتقال الحرارة، وأفضل سبيكة لذلك هي السبيكة المكونة من (70%) نحاس – (30%) زنك، حيث تتمتع تلك السبيكة كذلك بالمطيلية والمقاومة.

7 – ذات قابلية ممتازة للسحب العميق (deep-drawing).

لكن يعيب هذه السبائك عدم إمكانية تشكيلها على الساخن، حيث إنها تفشل وتنهار عندئذ، وهو ما يطلق عليه (لا يقبل التشكيل على الساخن) (hot-short) وأكثر السبائك تأثراً بذلك وأكثرها فشلاً هي السبيكة المحتوية على (30%) زنك، عندما يتم تشكيلها في مدى من درجات الحرارة يتراوح بين (300 °C) أو (750 °C). ويعد هذا العيب من أكبر عيوب هذه السبيكة.

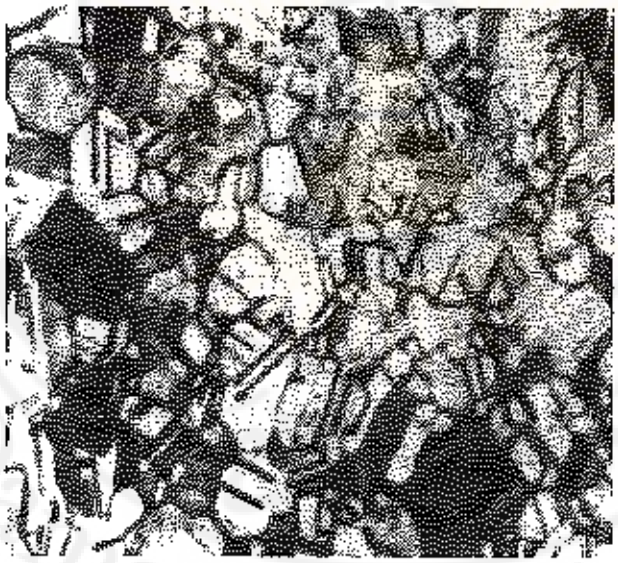
ويطلق على النحاس الأصفر ألفا، في بعض الأحيان، اسم نحاس الطلقات الأصفر (cartridge brass)، ولقد استخدم هذا الاسم؛ نظراً لأن أول استعمال لتلك السبائك كان في صناعة غلاف (ظرف) الطلقات النارية، ولكنها تستخدم الآن في أغراض أخرى كثيرة مثل شبكات أنابيب مياه التغذية المركزية والأحواض وغير ذلك.

والنحاس الأصفر ألفا هو محلول جامد، ويمكن توضيح بنائه الميكروسكوبي عند تركيزين مختلفين هما: نحاس – (10%) زنك الموضح في شكل (4–49) بعد التلدين، ويطلق على هذه السبيكة اسم البرونز التجاري، ونحاس – (30%) وتلك الموضحة في الشكل (4–50) والمعروفة باسم نحاس الطلقات الأصفر، ويتضح من مقارنة الشكلين أن زيادة نسبة الزنك تزيد من أعداد توأمية البلورات في حبيبات النحاس الأصفر ألفا.

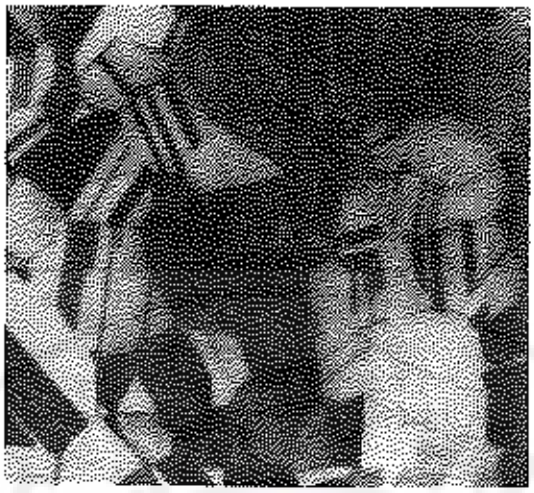
وزيادة إضافة الزنك إلى النحاس تزيد من المسافة بين خطوط الانزلاق (Sliping Lines) كما هو مبين في شكل (4–51) عند القيمة نفسها من التشكيل على البارد وتنتظم الانخلاعات وتصبح في شكل أشعة، وترجع زيادة المسافة بين خطوط الانزلاق إلى زيادة نسبة الزنك في سبائك النحاس الأصفر، والتي ، بالتالي ، تقلل منطاقة خطأ الترصيص (stacking - fault energy) (SFE) كما هو مبين في شكل (4–52) ففي حالة النحاس النقي تكون طاقة خطأ الترصيص به عالية وهذا يسهل عبور انخلاعات خط الانزلاق، وبالتالي يكون الانزلاق بكمية محدودة أثناء التشغيل والتشكيل، ولكن عند إضافة الزنك تقل طاقة خطأ الترصيص، وبهذا يصبح عبور خط الانزلاق أمراً صعباً وتتجمع مستويات الانزلاق المختلفة أمام شريط خطأ الترصيص. ويقسم النحاس الأصفر ألفا إلى مجموعتين: نحاس أصفر ألفا الأصفر، ونحاس أصفر ألفا الأحمر، ويقوم هذا التقسيم على أساس اللون، وبالتالي نسبة الزنك المضاف.

أولاً: النحاس الأصفر ألفا الأصفر (Yellow Alpha Brass)

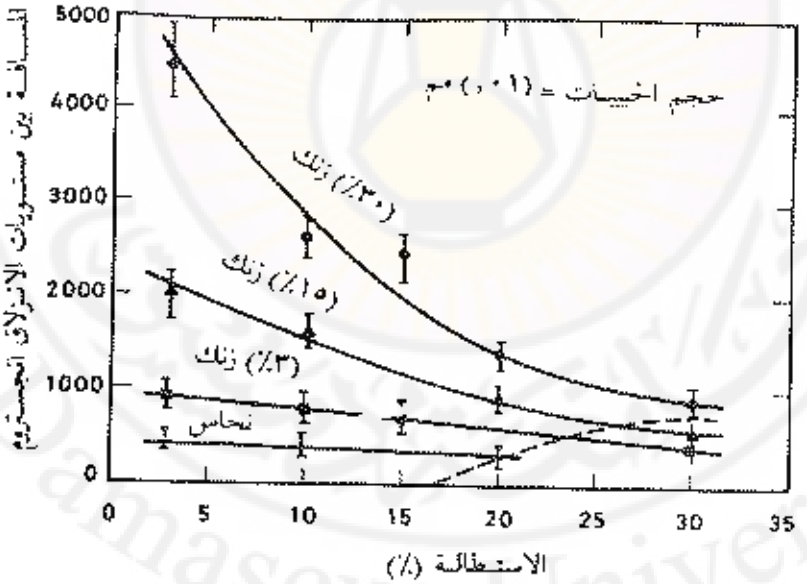
تحتوي مجموعة النحاس الأصفر ألفا الأصفر على نسبة من الزنك تتراوح ما بين (20%) أو (36%) وتمتاز هذه المواد بجمعها بين الخواص الميكانيكية الجيدة ومقاومة التآكل، حيث أن مقاومتها، وكذلك مطيلتها عالية لتصل إلى أفضل قيمة لخواصها عند (30%) زنك، ويبين جدول (4-24) عدداً من خواص الشد لعدد من سبائك النحاس – زنك، ويتضح من الجدول أن الخواص الميكانيكية بوجه عام لسبائك النحاس – زنك ترتبط إلى حد بعيد بالأوجه المتكونة في السبيكة. ويستخدم النحاس الأصفر ألفا الأصفر في التطبيقات التي تعمل وتحتاج إلى ظروف تشكيل على البارد عنيفة، وتؤدي زيادة نسبة الزنك في هذه السلسلة من السبائك على (36%) إلى نقص المطيلية بسرعة كبيرة، نظراً لتكون الوجه بيتا، ولكن تستمر كل من المقاومة والصلادة في الزيادة حتى تصل نسبة الزنك إلى (45%) وهذه العلاقة موضحة في شكل (4-53) وهناك عدة نقاط هامة عن سبائك هذه المجموعة وبالذات أشهر سبائكها: نحاس – (30%) زنك، ويمكن إيجاز هذه النقاط فيما يلي:



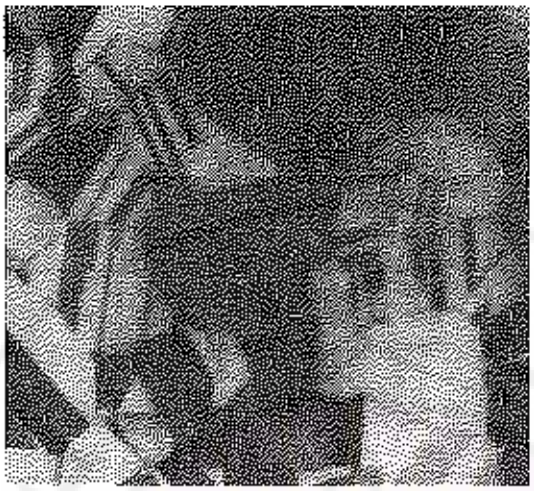
الشكل (4-49): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة النحاس – (10%) زنك بعد التلدين.



الشكل (4-50): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة النحاس – (30%) زنك بعد التلدين. لاحظ *الزيادة في البلورات التوأمية في هذه الحالة مقارنة بسبيكة نحاس – (10)% زنك* الموضحة بالشكل (4-49).



الشكل (4-51): تأثير إضافة الزنك على المسافة بين مستويات الانزلاق لسبائك النحاس .. زنك.



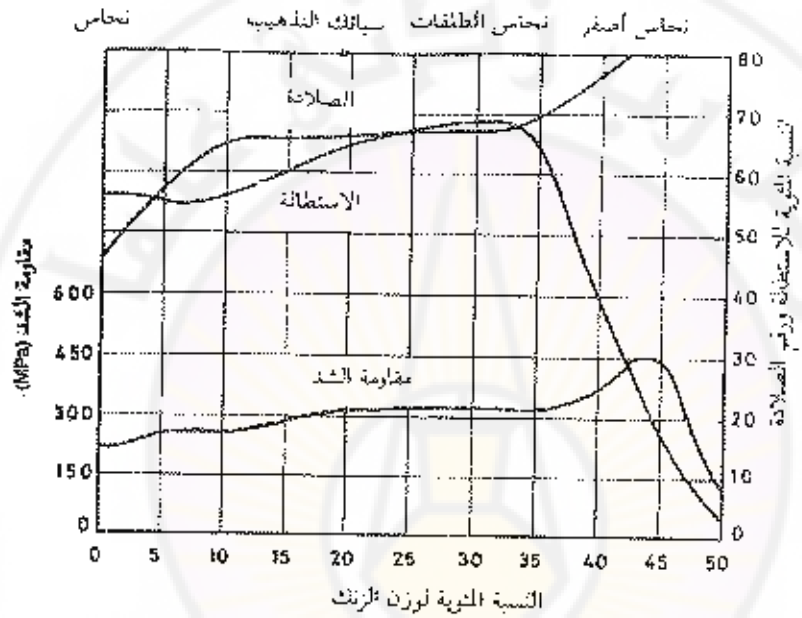
الشكل (4-52): تأثير إضافة الزنك على طاقة أخطاء الترصيص لسبائك النحاس – زنك.

1 – للحصول على الخواص المتميزة لهذه المجموعة من السبائك لا بد أن تكون مكوناتها ، أي عنصرا النحاس والزنك على درجة عالية جداً من النقاوة، نظراً لأن أية شوائب دخيلة بأقل كمية تؤدي إلى نقص مروع في المطيلية. وتبعاً لهذا الشرط فإن سبيكة نحاس – (30%) زنك تصبح مكلفة جدا وغالية الثمن، نظراً للحاجة إلى استخدام نحاس وزنك على درجة عالية من النقاوة، وبالتالي يرتفع سعرهما، و لهذا السبب دخل الفولاذ الطري منافسا قويا لهذه السبيكة في مسائل التصميم الهندسي نظرا لأن الفولاذ الطري عالي المطيلية وخاصة ذو نسبة النتروجين المنخفضة.

2– النحاس الأصفر ألفا الأصفر ضعيف في تشكيله على الساخن، و لا بد أن تحتوي هذه السبائك على أقل قدر ممكن من الرصاص (مجرد أثر traces)، لأن الرصاص– كما سبق ذكره – ينصهر عند درجة حرارة التشكيل على الساخن، وذلك بسبب انخفاض درجة حرارة انصهاره، ومن ثم يسبب الكثير من المتاعب أثناء التشكيل على الساخن.

3– النحاس الأصفر ألفا الأصفر ذو حساسية كبيرة لدرجات حرارة التلدين نظرا لنمو حبيباته بسرعة، عند درجة الحرارة العالية، و يمكن وبسهولة أن تحرق السبيكة. ويجب عدم الخلط بين تعبير (حرق السبيكة) المستعمل تجاريا وصناعيا والذي يعني التسخين عند درجات

حرارة أعلى أو لفترات زمنية أطول، وتعبير الأكسدة، والذي يعرف علميا بأنه تفاعل بين الأكسجين والسبيكة فإن حبيباتها تنمو نموا كبيرا جدا، وهذا يقلل من مقاومة السبيكة وصلادتها. و يمكن تلدين سبائك النحاس ألفا عند درجة الحرارة (600) مئوية دون مشاكل، وإذا تم تسخينها عند درجة حرارة (750) مئوية فإن نمو الحبيبات يكون سريعا، لدرجة أن أقل ضغط خارجي عليها يؤدي إلى تكوين قشرة برتقالية اللون تنفصل من سطح السبيكة بسهولة.



الشكل (4-53): العلاقة بين الخواص الميكانيكية في سبائك النحاس الأصفر الطروق والنسبة المئوية للزنك في السبيكة.

4- لا بد أن تجري عملية إزالة الإجهادات الداخلة لسبائك هذه المجموعة بالتلدين، عند درجة الحرارة الصحيحة، للأسباب التي سبق ذكرها في (3) بعد عمليات التشكيل على البارد الشديدة لمنع حدوث تآكل الإجهادات (stress corrosion cracking) الناتج عن أية إجهادات متخلفة داخل السبيكة أثناء عملية التشكيل. ومما يزيد من سرعة تآكل الإجهادات لهذه السبائك تعرضها للأمونيا ولو بنسبة صغيرة جدا في وجود الأكسجين والرطوبة. ولقد سميت ظاهرة التشققات أو التآكل الإجهادي في النحاس الأصفر ألفا الأصفر باسم

التشققات الموسمية (season cracking). وفي الغالب يحدق كسر التآكل الإجهادي في النحاس الأصفر ألفا الأصفر على حدود الحبيبات و يعرف باسم (التشدخ على حدود الحبيبات)، كما يمكن حدوث الكسر داخل الحبيبات و يعرف عندئذ باسم (التشدخ داخل الحبيبات) وذلك في حالة تشكيل السبيكة على البارد لدرجة عالية من تخفيض السمك، وهو ما يعرف باسم التشكيل القاسي. ويوضح الشكل (4–54) التشققات الحادثة على حدود حبيبات نحاس الطلقات الأصفر عند تعرضه لظروف جوية تآكلية في وجود الأمونيا.

جدول (4-24): الخواص الميكانيكية و معدلات تآكل النحاس الأصفر ألفا الأصفر (ASM (Daintmk,1975

رقم السبيكة و اسمها	التركيب الكيميائي الاسمي (%)	الخواص الميكانيكية					مقاومة التآكل	قابلية التشغيل بل مكنات
		مقاومة الشد		إجهاد الخضوع		النسبة المئوية للاستطالة(1)		
		MPa	ksi	MPa	ksi			
210 سبيكة تذهيب	Cu90.0 Zn 5.0	-238 448	-34 64	-70 406	-10 58	45-4	جيد- ممتاز	20
220 برونز تجاري(90%)	Cu90 Zn10.0	-529 434	-27 62	-70 434	-10 62	50-3	جيد- ممتاز	20
226 برونز العلي (87.5%)	Cu87.5 Zn12.5	-273 679	-39 97	-77 434	-11 62	64-3	جيد- ممتاز	20
230 نحاس أصفر (85%)	Cu85.5 Zn 15.0	-273 235	-39 105	-71 441	-10 63	55-3	جيد- ممتاز	20
240 نحاس اصفر منخفض (80%)	Cu80.0 Zn 20.0	-294 875	-42 125	-84 455	-12 65	55-3	مقبول- ممتاز	20
260 نحاس اصفر للخراطيش 70%	Cu70.0 Zn 30.0	-308 910	-44 130	-77 455	-11 65	66-3	مقبول- ممتاز	30
268,270 نحاس أصفر	Cu65.0 Zn35.0	-322 896	-46 128	-98 434	-14 62	65-3	مقبول - ممتاز	30
فلتر ((مونتز))	Cu60.0 Zn40.0	-378 518	-54 74	-147 385	-21 55	52-10	مقبول - ممتاز	40
445,444,443 نحاس البحرية الأصفر	Cu71.0 Zn 28.0	-308 854	-44 122	-126 154	-18 22	65-60	جيد- ممتاز	30

30	مقبول ممتاز	50-17	-25 66	-175 462	-55 88	-385 616	Cu60.0 Zn39.25 Sn0.75	467,464 سبيكة النحاس البحري
30	جيد - ممتاز	60-2	-12 93	-84 651	-45 100	-315 700	Cu70.0 Zn28.8 Mn1.2	667 نحاس أصفر منجنيزي
25	مقبول - ممتاز	28-20	-34 55	-238 385	-70 92	-560 644	Cu58.5 Zn36.5 Al1.2 2.8Mn 1.0Sn	674
40	مقبول - ممتاز	33-19	-30 60	-210 420	-65 84	-455 588	Cu58.5 Fe1.4 Zn39.0 Sn1.0 Mn0.1	675برونز منجنيزي(A)
30	جيد - ممتاز	55	27	189	60	420	Cu77.5 Zn20.5 Al2.0 As0.1	667 نحاس أصفر ألومينى منجنيزي
-	مقبول - ممتاز	63-2	-55 114	-385 798	-82 129	-574 903	Cu73.5 Zn22.7 Al3.4 Co0.40	688
30	جيد - ممتاز	25-20	-40 57	-280 399	-80 100	-560 700	Cu81.5 Zn14.5 Si4.0	694 نحاس أصفر سليكونى

لقد استخدم تعبير التشقق الموسمي في الأصل لوصف التشققات في الأخشاب، ولكنه استخدم بعد ذلك للتعبير وشرح التشققات والكسور التلقائية التي تحدث لخراطيش (cartridges) (جمع خرطوشة) الذخيرة من أسلحة الجيش البريطاني المصنوعة من النحاس الأصفر ألفا الأصفر في الهند أيام الاحتلال البريطاني لها. وكانت تشققات خراطيش الذخيرة تحدث فقط أثناء موسم الأمطار الشديدة والرياح العنيفة التي تقع في جنوب شرق آسيا في فترة معينة من العام والمعروفة باسم (موسم المنسون) (Monsoon season) ويكون الجو في تلك الفترة رطبا ومشبعا بغاز الأمونيا المنبعثة من إسطبلات الخيل المقامة في معسكرات الجيش حينذاك وأدت هذه الظروف مجتمعة في ذلك الوقت من العام لتشققات خراطيش الذخيرة. ولهذا استخدم تعبير التشققات الموسمية لأنه كان يحدث فقط في موسم الأمطار والرطوبة العالية، ثم أصبح ذلك

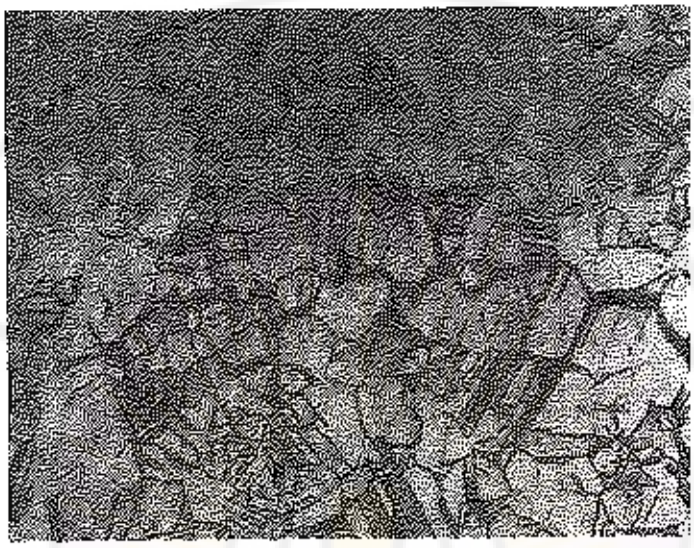
تعبيرا شائعا يطلق على أية تشققات تحدث في النحاس الأصفر ألفا الأصفر أو غيره من المواد الأخرى والذي يكون سببه غاز الأمونيا أو مركباتها.

تحدث التشققات والتشققات الموسمية في سبائك النحاس الأصفر ألفا الأصفر نتيجة تجمع الانخلاعات (dislocations) الناتجة من التشكيل على البارد على حدود البلورة، وتزيد تجمعات الانخلاعات من طاقة حدود الحبيبات، وبهذا تصبح منطقة حدود الحبيبات ذات الطاقة العالية هي الأنود والمنطقة المحيطة بحدود الحبيبات هي الكاثود ولهذا يحدث التآكل على حدود الحبيبات. ونتيجة لتآكل حدود الحبيبات فإنها تصبح منطقة الضعف في السبيكة، ولهذا يحدث عنها الكسر. وهكذا يظهر بوضوح أن التآكل الإجهادي ثم التشققات، وبعد ذلك فشل المادة مرتبط بالإجهادات الداخلية الناتجة عن التشكيل على البارد.

إن أهم وسيلة للتغلب على تشققات المادة سواء كانت على حدود الحبيبات أم بداخل الحبيبات نتيجة التآكل الموسمي أو خلافه هي إزالة الإجهادات الداخلية (internal stresses)، التي يطلق عليها أحيانا اسم الإجهادات المتخلفة (residual stresses) الناتجة من التشكيل على البارد. وتتم إزالة الإجهادات الداخلية بتسخين السبيكة (التلدين) في منطقة الإفاقة (recovery) عند درجات حرارة منخفضة لا تزيد على (260) مئوية، ويتم التلدين بعد التصنيع والوصول إلى الأبعاد المطلوبة.

5- يتعرض النحاس الأصفر ألفا الأصفر إلى نوع آخر من التآكل هو نزع (أو إزالة) الزنك (dezincification) وفي هذا التآكل الانتقائي (selective corrosion) نوع من أنواع النقر (pitting)، حيث ينتزع أو يتآكل الزنك بصورة خاصة تاركا فضلات مسامية من النحاس كما هو مبين في شكل (4-55)، ويحدث هذا التآكل بعد تعرض تلك السبائك لماء البحر أو الماء العذب المشبع بالأوكسجين، وفي وجود ثاني أكسيد الكربون المذاب بتركيز عالي. وليس مفهوما بالضبط حتى الآن كيفية حدوث هذا التآكل، ولكن يعتقد أن الزنك الداخلي (داخل التركيب البنائي للسبيكة) يتخلل إلى سطح النحاس الأصفر ويتفاعل عندئذ تفضيليا مع الأوكسجين أو ثاني أوكسيد الكربون، ونتيجة لتخلل الزنك يظل النحاس في موقعه مكوناً مادة مسامية غير مرتبطة معاً، وتصبح المادة المتبقية بعد هذه العملية هشة وضعيفة للغاية، ويمكن كسرها تحت تأثير أقل حمل. ويؤدي تركيز التآكل الانتقائي في نقطة صغيرة إلى تسرب السوائل خلال طبقة النحاس المسامية. أما عند حدوث التآكل الانتقائي في

منطقة محددة، فيعرف عندئذ باسم (نزع السدادة removal of the plug)، وذلك دلالة على فتح منفذ لخروج السوائل، ويمكن معالجة مشكلة التآكل الانتقائي والتغلب على نزع الزنك من النحاس الأصفر ألفا الأصفر بإضافة كمية صغيرة من القصدير أو الأنتيمون، ويعمل هذان العنصران على الحد من نزع زنك النحاس الأصفر ألفا الأصفر وإزالته من المادة.



الشكل (4-54): تشقق التآكل الإجهادي في النحاس الأصفر ألفا – الأصفر بعد تعريض السبيكة لظروف جوية تآكلية.

6- أكثر أنواع النحاس الأصفر ألفا الأصفر استعمالا هما: سبيكة نحاس-(30%)زنك، ويصنع منها أغلفة طلقات الأسلحة، وسبيكة نحاس -(35%) زنك،المستعملة بكثرة في صناعة قلب أجهزة التكييف والأوعية وعاكسات الضوء الرئيسة ومركبات الأسلحة وأغلفة الأضواء الكهربائية وقواعد اللمبات الكهربائية وغلاف مفاتيح الكهرباء.

7- تضاف بعض العناصر السبائكية المختلفة لتحسين كل من الخواص الكيميائية – مقاومة التآكل– والخواص الميكانيكية، ويعرف النحاس الأصفر ألفا الأصفر في حالة إضافة عناصر

سبائكية إليه باسم سبائك النحاس الأصفر ألفا الأصفر، وأهم الإضافات وتأثيراتها المختلفة هي على النحو التالي:



الشكل (4-55): نزع الزنك من سبيكة النحاس الأصفر – ألفا – الأصفر أثناء عملية التآكل التفضيلية (دون نمش لسطح المادة).

(أ) الرصاص: يضاف الرصاص بنسبة تتراوح ما بين (0.5%) و(3%) وذلك لتحسين قابلية التشغيل بالمكنات ولهذا تستخدم سبائك النحاس الأصفر ألفا الأصفر المحتوية على الرصاص في صناعة الأجزاء المقلوظة في المكنات، والألواح التي يكتب أو يحفر عليها والمفاتيح وأجزاء الأقفال والأقراص المسننة وأجزاء الساعات والبراميل الدوارة، ويطلق على سبائك النحاس– زنك – رصاص اسم سبائك النحاس الأصفر سهل القطع (free culting brasses).

(ب) القصدير : إن إضافة القصدير بنسبة (1%) تحسن من مقاومة السبيكة وتزيد من مقاومتها للتآكل. وأشهر سبيكتين تم تطويرهما بإضافة القصدير هما سبيكة النحاس البحرية الأصفر (Admiralty brass) وسبيكة النحاس البحري (Naval brass) المستخدمتان في أنابيب التكييف والمبادلات الحرارية وفي أجهزة محطات القوى الكهربائية البخارية. وتتفوق سبيكة النحاس الأصفر ألفا الأصفر المحتوية على (1%) قصدير على سبيكة النحاس الأصفر ألفا الأصفر المحتوية على الألومنيوم، وتركيبها : نحاس – (22%) زنك – (2%)

ألومنيوم، في مقاومة التآكل ويعود تفوق سبيكة النحاس الأصفر ألفا الأصفر المحتوية على القصدير في مقاومة التآكل لتكوين طبقة أكسيد رقيقة ومتماسكة وخالية من العيوب، تعيد تكوين نفسها إذا تعرضت لظروف تسبب كسرها أو فشلها، وبهذا تحافظ طبقة الأكسيد على حماية الأنابيب من تأثير السرعة العالية لمياه التبريد وذلك في الأوساط البحرية وفي محطات القوى الأرضية. كما يدخل القصدير المضاف بنسبة (1%) في تركيب المحلول الجامد، مما يزيد كذلك – إلى حد ما – من مقاومة السبيكة.

(ج) الزرنيخ: تتم إضافة الزرنيخ بنسبة صغيرة بحدود تتراوح ما بين (0.01%) و(0.05%) إلى سبيكة النحاس– (30%) زنك المستخدمة في تصنيع أنابيب المكثفات، وهذه الإضافة تحسن مقاومة التآكل وتثبط إزالة الزنك وتمنع انتزاعه من السبيكة.

(د) الألومنيوم: يضاف الألومنيوم لبعض سبائك النحاس الأصفر ألفا الأصفر بنسبة تصل إلى (2%) وذلك لتصنيع أنابيب التكثيف في السفن والأعمال البحرية،نظرا لأن إضافة الألومنيوم تحسن جدا من مقاومة التآكل وخاصة في الوسط المتحرك أو عند حدوث الارتطامات (impingment) مع سطح السبيكة، وربما يرجع تحسن مقاومة التآكل تحت هذه الظروف إلى تكوين أكسيد الألومنيوم المقاوم للتآكل، أو يعمل الألومنيوم على تقوية طبقة الأكسيد المتكون على سطح النحاس الأصفر ألفا الأصفر والتي قد تنهار بتأثير الارتطامات في حالة عدم إضافة الألومنيوم.

(هـ) النيكل: يدخل النيكل المضاف في تكوين المحلول الجامد، وتضاف كميات صغيرة منه إلى سبائك النحاس الأصفر لتحسين مقاومة التآكل.

ثانيا : النحاس الأصفر ألفا الأحمر (Red Alpha Brasses):

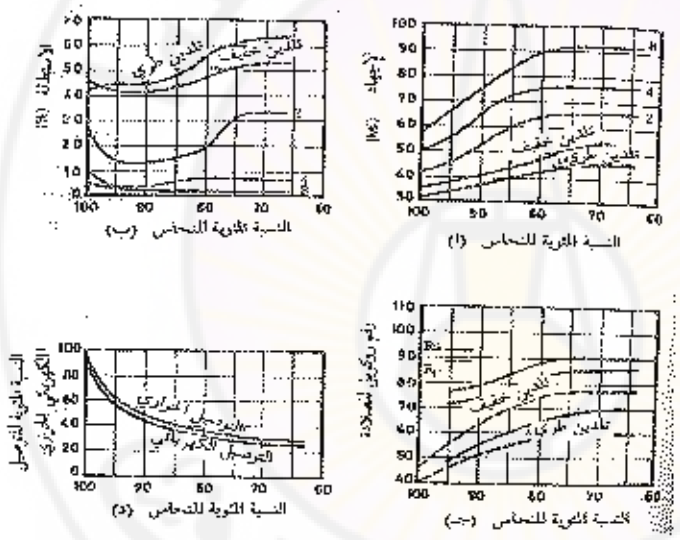
تحتوي سبائك النحاس الأصفر ألفا الأحمر على نسب من الزنك تتراوح بين (5%) و(20%)، وزيادة نسبة الزنك في هذه السبائك يزيد من مقاومتها وصلادتها، وكذلك مطيليتها كما هو موضح في شكل(4–56) ويتغير لون هذه السبائك بزيادة نسبة الزنك فلونها يتراوح بين الأحمر والذهبي إلى الأصفر المائل للخضرة. وتمتاز هذه السبائك بعدة صفات أهمها ما يلي:

1– مقاومة للتآكل أفضل من مقاومة النحاس الأصفر ألفا الأصفر.

2– لا تتأثر هذه المجموعة بالتشققات الموسمية، كما لا تحدث فيها ظاهرة نزع الزنك.

3- يمكن تشكيلها على الساخن في مدى من درجات الحرارة بين (730 °C) و (900) مئوية، وهي تشبه في ذلك النحاس التجاري.

4- تصبح مطيلتها بعد التلدين عالية جدا، وتقبل الطرق عند درجات الحرارة العادية. ولكن يجب أن يظل مستوى الرصاص في هذه السبائك عند أقل من (1%) حتى لا تحدث مشاكل أثناء التشكيل على الساخن، نظرا لعدم ذائبية الرصاص في سبائك هذه المجموعة، ويظل الرصاص في صورة كريات على حدود الحبيبات.وتوجد عدة سبائك مهمة في هذه المجموعة، وهي مستخدمة بكثرة، وأهم هذه السبائك: فلز التذهيب، والبرونز التجاري، والنحاس الأحمر والنحاس الأصفر المنخفض. وفيما يلي عرض لبعض المعلومات عن بعض سبائك النحاس الأصفر ألفا الأحمر:



الشكل (4-36): تأثير الزنك على الخواص الميكانيكية والكهربائية والحرارية للنحاس ألفا الأصفر. (أ) مقاومة الشد، (ب) الاستطالة، (ج) صلادة روكويل، (د) التوصيل الكهربائي والحراري. (الأرقام على المنحنيات تدل على درجة الصلادة في السبيكة).

(أ) فلز التذهيب (Golding Metal) : تتركب هذه السبيكة من نحاس- (5%) زنك وهي ذات مقاومة أعلى من النحاس. ويستخدم فلز التذهيب في صناعة العملات المعدنية، والدروع والميداليات وأغلفة وأغطية الصهرات والأنواع التذكارية والشعارات والجسم الأساسي للأشياء المطلية بالذهب أو الأجزاء عالية الصقل.

(ب) البرونز التجاري (commercial bronze): تتركب سبيكة البرونز التجاري من نحاس-(10%) زنك، وهي سبيكة ذات خواص ممتازة في التشكيل على البارد وعلى الساخن. ويصنع من سبيكة البرونز التجاري الحلي التقليدية وحافظات وعلب التحف وأدوات الزينة وأجزاء المكنات المستعملة في الظروف البحرية والمسامير القلاووظ والمفصلات. وتوجد سبيكة خاصة من البرونز التجاري هي سبيكة البرونز التجاري الرصاصي، وتتركب سبيكة البرونز التجاري الرصاصي من النحاس- (10%) زنك - (1.75%) رصاص، وتستخدم هذه السبيكة في صناعة مسامير القلاووظ والأجزاء المصنعة أتوماتيكيا بالمكنات.

(ج) النحاس الأصفر الأحمر (Red Brass): يتركب النحاس الأصفر الأحمر من النحاس- (15%) زنك، ويستخدم في صناعة الوصلات الكهربائية وأغلفة مسامير القلاووظ وقطع الغيار ومقابس الكهرباء (sockets) وأنابيب المكثفات والمبادلات الحرارية ومواسير الأعمال الصحية وقلب أجهزة التكييف ومبردات السيارات.

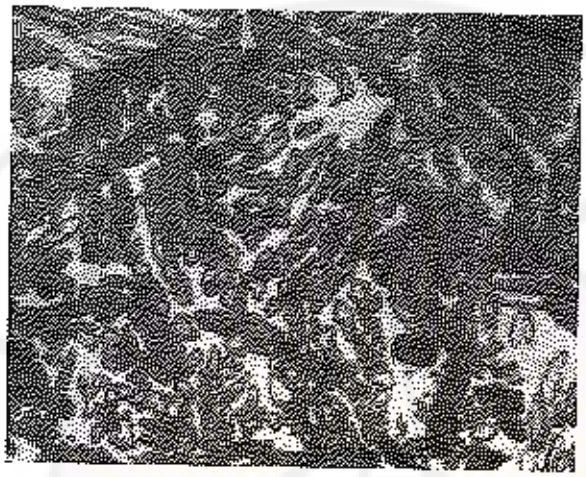
(د) النحاس الأصفر المنخفض (low brass) : يتركب النحاس الأصفر المنخفض من النحاس – (20%) زنك، ويستخدم في صناعة الهدايا التذكارية والتحف والميداليات والدروع والأوسمة وقواعد الثرموستات الحرارية والآلات الموسيقية والأنابيب القابلة للانثناء والأغراض الأخرى التي تتطلب السحب العميق.

2: النحاس الأصفر ألفا وبيتا (Alpha Plus Beta Brasses):

تحتوي مجموعة سبائك النحاس الأصفر ألفا وبيتا على نسب من النحاس تتراوح ما بين (54%) و(64%)، وبالنظر في منحني الاتزان الحراري النحاس – زنك المبين في شكل (4–46) يتضح أن هذه السبائك تحتوي على وجهين هما، (α) و (β') والوجه أعلى صلادة وأكثر تقصفا عند درجات الحرارة العادية مقارنة بالوجه ألفا، ولكن عند درجات الحرارة العالية يصبح الوجه (β') عالي المطيلية ويمكن عندئذ تشكيل هذه السبائك على الساخن.

يوضح الشكل (4–57) التركيب الميكروسكوبي للنحاس الأصفر ألفا و بيتا المحتوي (40%) زنك وذلك في حالته المصبوبة (as cast)، ويظهر من الشكل بوضوح وجود

الوجهين ألفا وبيتا. والبناء الميكروسكوبي في هذه الحالة من النوع المتفرع (dendrites) (أو الشجري) للوجه ألفا كان الوجه بيتا. ويمكن تصغير حجم حبيبات النحاس الأصفر ألفا وبيتا من خلال عمليات التشكيل على الساخن، كما هو موضح في شكل (4-58)، حيث دافئت السبيكة الموضحة في شكل (4-57) على الساخن للحصول على حبيبات دقيقة وأقل حجما. و تمتاز سبائك النحاس الأصفر ألفا و بيتا بما يلي:

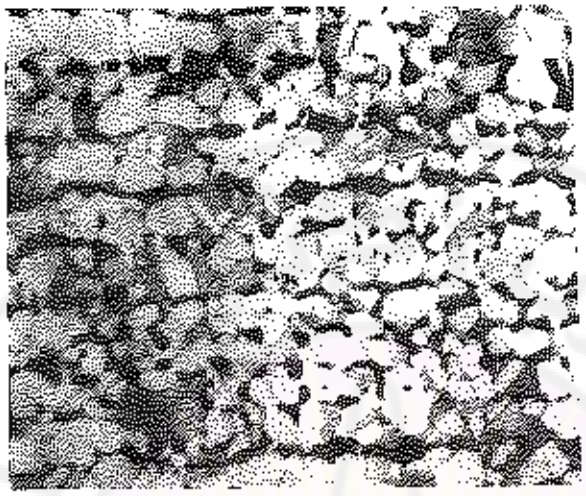


الشكل (4-57): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة النحاس – (40%) زنك المصبوبة، ويتكون البناء الميكروسكوبي في هذه الحالة من الوجه ألفا الشجري في كنان الوجه بيتا.

1- خواص ممتازة في التشكيل على الساخن

2- وجود الوجه بيتا في هذه السبيكة يجعلها قابلة للمعالجة المحلولية الحرارية لزيادة المقاومة،و المعالجة الحرارية تقلل من مطيلية السبائك. فإذا سخنت سبيكة النحاس الأصفر ألفا و بيتا المحتوية على نسب من الزنك تتراوح بين (40%) و(45%) إلى درجة حرارة (830) درجة مئوية، ثم بردت فجائيا إلى درجة حرارة تتراوح بين (700) و(710) مئوية فإن الوجه غير الثابت (α) أو (β') سيتحول إلى الوجه ألفاء كما هو موضح في الشكل (4-59) ويتغير البناء الميكروسكوبي الموضح في شكل (4-57) إلى البناء الميكروسكوبي الموضح في الشكل (4-60)، ويظهر الشكل (4-60) التركيب الصفائحي للوجه ألفا الناتج من التحول الحراري الأيزوترمي للوجه (β').

يشمل النحاس الأصفر ألفا و بيتا مجموعة كبيرة من السبائك ذات أهمية تجارية كبيرة، و في ما يلي استعراض لأهم سبائك هذه المجموعة:

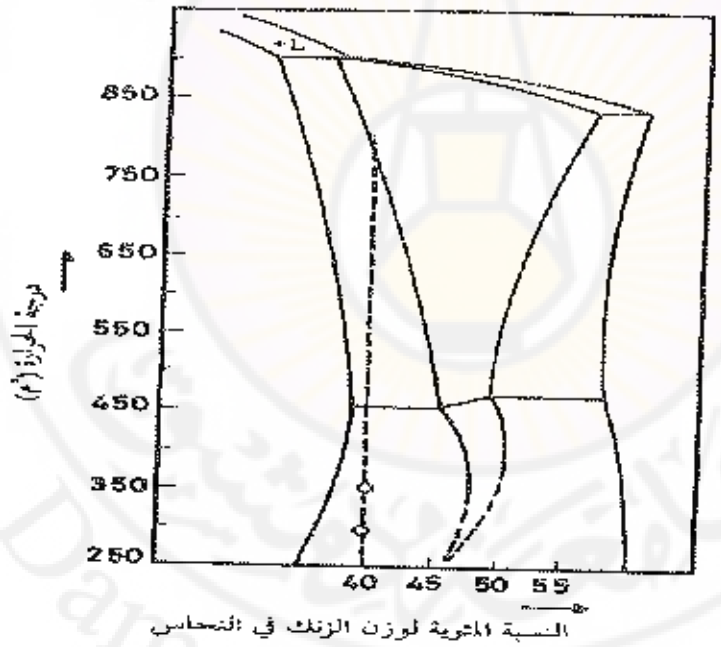


الشكل (4-58): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة النحاس – (40%) زنك بعد الدلفنة على الساخن. والتركيب البنائي لهذه السبيكة عبارة عن وجهين: الوجه بيتا (داكن اللون) والوجه ألفا (فاتح اللون). لاحظ التوأمة البلورية في الوجه ألفا الناتجة عن إجهادات التشكيل.

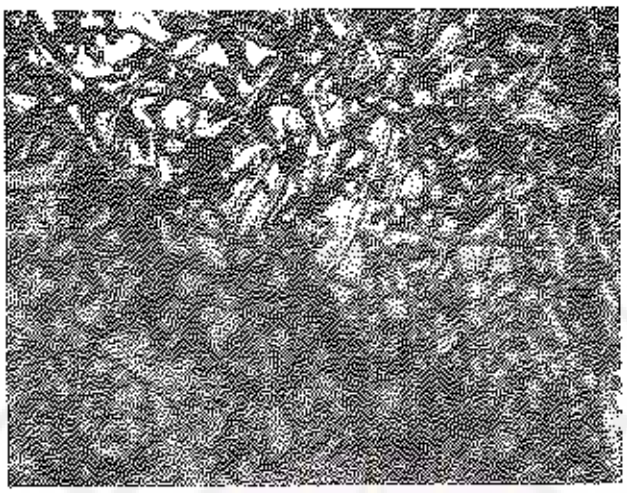
(أ) فلز مونتز (Muntz metal): إن التركيب الكيميائي لسبيكة فلز مونتز هو نحاس (40%) زنك، و تمتاز هذه السبيكة بإمكانية التشكيل على الساخن إضافة إلى مقاومتها العالية، ويوضح شكل (4-61) البنيان الميكروسكوبي لسبيكة فلز مونتز بعد تلدينها، و يظهر من الشكل بصورة واضحة وجود الوجهين ألفا وبيتا، ويعد التبريد الفجائي لهذه السبيكة من منطقة بيتا، الموضحة في شكل (4-46) من ترسيب الوجه ألفا، كما هو موضح في شكل (4-62) الذي يبين التركيب الميكروسكوبي لفلز مونتز بعد تبريدها فجائيا من درجة الحرارة (825) مئوية، ويتضح من الشكل احتفاظ السبيكة بمعظم الوجه بيتا و جزء صغير من الوجه ألفا الذي يترسب على حدود الحبيبات. وإذا تم تسخين سبيكة فلز مونتز مرة أخرى لدرجة حرارة منخفضة، فإن ذلك يساعد على ترسيب كمية أكبر من الوجه ألفا من المحلول الجامد فوق المشبع، و على هذا فإن هذه السبيكة قابلة للمعالجة المحلولية الحرارية. وتستخدم هذه السبيكة في صورة ألواح لأغلفة السفن وفي صناعة رأس المكثف

والفلز المثقب وبعض الإنشاءات المعمارية، كما تستخدم في صناعة المعادن وأنابيب المكثفات. ويضاف أحياناً الرصاص بنسبة تتراوح ما بين (0.4 %) و (0.8) لتحسين خاصة التشغيل بالمكنات.

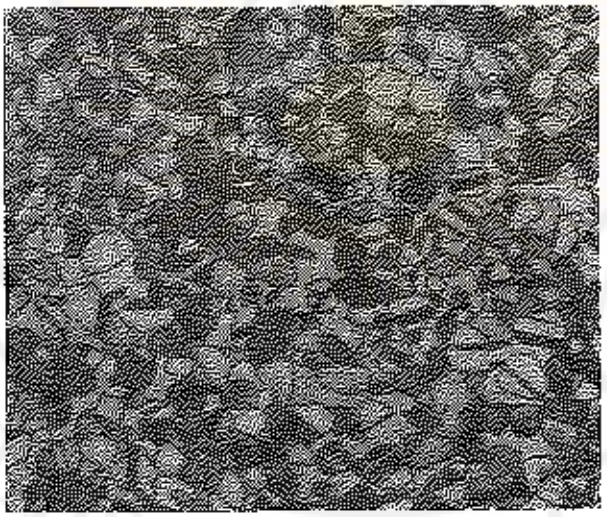
(ب) سبائك النحاس الأصفر ألفا وبيتا: يطلق تعبير سبائك النحاس الأصفر ألفا وبيتا على النحاس الأصفر ألفا وبيتا عندما تضاف إلى السبيكة المكونة (40%) زنك عناصر سبائكية مختلفة والغرض من إضافة عناصر السبائكية للنحاس الأصفر ألفا وبيتا هو زيادة مقاومتها وتحسين بعض خواصها الميكانيكية الأخرى مثل التشغيل بالمكنات وتسهيل عمليات القطع والتشكيل، بالإضافة إلى تحسين مقاومة التآكل، وكميات العناصر السبائكية المضافة للنحاس الأصفر ألفا وبيتا موضح في الجدول (4-25). ومن أهم سبائك هذه المجموعة: النحاس الأصفر سهل القطع والنحاس الأصفر القابل للطرق والبرونز المعماري وسبيكة النحاس البحري، تفاصيلها على النحو التالي:



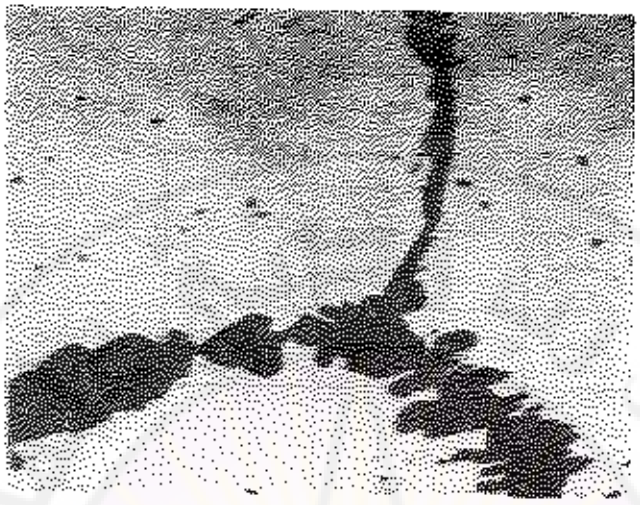
الشكل (4-59): قطاع منحني الاتزان الحراري للنحاس – زنك يوضح مسار التبريد لسبيكة نحاس – (40%) زنك ويوضح التغير من بيتا إلى (ألفا & بيتا).



الشكل (4-60): سبيكة النحاس – (41.6%) زنك بعد تسخينها عند درجة الحرارة (830) مئوية ثم التبريد المفاجئ للدرجة (250) درجة مئوية وتم حفظها عند هذه الدرجة لمدة (20) ساعة، ويتضح في الصورة تكوين ألواح الوجه ألفا المتحولة من كتان الوجه بيتا.



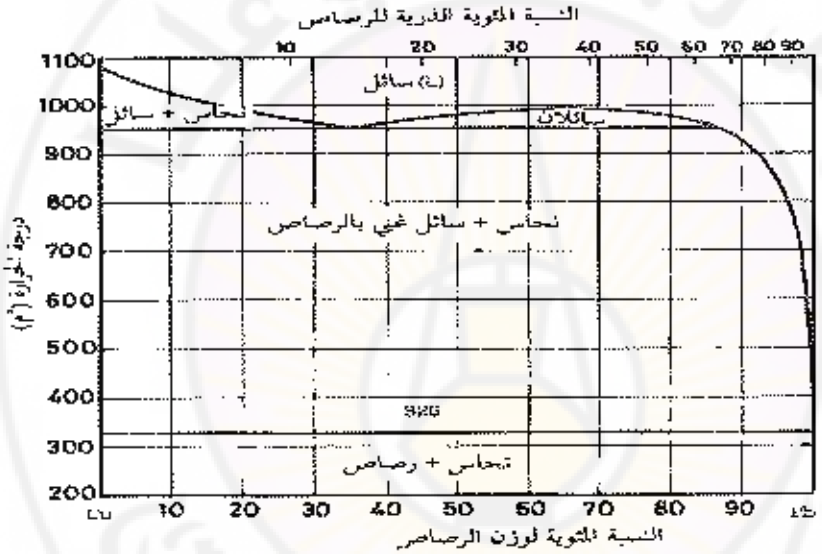
الشكل (4-61): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة فلز مونتز بعد التلدين، يتضح في القطاع تكوين الوجهين: الوجه ألفا (داكن اللون) والوجه (β') فاتح اللون.



الشكل (4-62): سبيكة فلز مونتز بعد تبريدها فجائيا بسرعة في الماء من درجة الحرارة (825) مئوية. والبناء الأصلي للسبيكة هو الأبيض اللون (الوجه β) بينما يترسب الوجه ألفا (داكن اللون) على حدود الحبيبات.

- النحاس الأصفر سهل القطع (free-cutting brass) تتركب سبيكة النحاس الأصفر سهل القطع من نحاس (35.5%) زنك – (3%) رصاص. وهذه السبيكة هي أفضل سبائك النحاس الأصفر تشغيلاً بالمكنات إضافة إلى جمعها بين خواص ميكانيكية جيدة ومقاومة جيدة للتآكل. ويذوب الرصاص في النحاس عند درجات الحرارة العالية، كما هو موضح في منحني الاتزان الحراري للنحاس – رصاص المبين في شكل (4–63)، ولكن عند درجات الحرارة العادية لا يذوب الفلزان معاً على الإطلاق، وتحتوي سبائك النحاس الأصفر سهل القطع المحتوية على (3%) رصاص عند درجة الحرارة العادية على وجه أيوتكتيكي من الرصاص والنحاس، ويكون النحاس فيه بصورة شجرية موزعة في كريات صغيرة من الرصاص. وأثناء عملية التشكيل تنشق هذه الكريات ليخرج منها الرصاص، وينتشر في كتان المادة كما هو موضح في شكل (4–64(أ&ب)). وتستخدم هذه السبيكة لصناعة الأدوات الفلزية على اختلافها والتروس المسننة والأجزاء المصنعة ميكانيكياً ذات السرعة العالية.

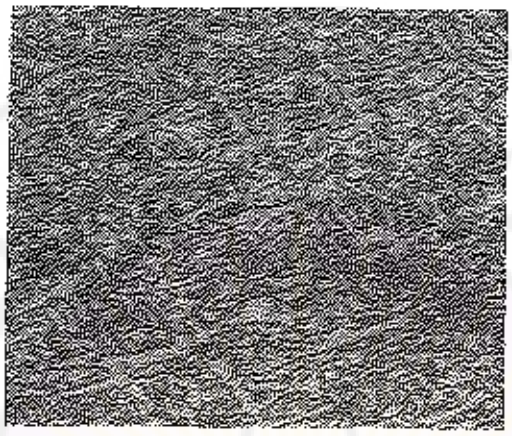
- النحاس الأصفر القابل للطرق (forgeable brass): تتركب سبيكة النحاس الأصفر القابل للطرق من: نحاس – (38%) زنك – (2%) رصاص وهذه السبيكة تعتبر من أفضل سبائك النحاس الأصفر جميعها في التشكيل على الساخن. وتستخدم للأغراض التي تتطلب الطرق على الساخن والأدوات الفلزية وأجزاء الأعمال الصحية.
- البرونز المعماري (architectural bronze) : تتركب سبيكة البرونز المعماري من نحاس – (40%) زنك – (3%) رصاص، وهي ذات خواص ممتازة في الطرق بالحدادة. وتستخدم في صناعة المقابض ونماذج أغراض الديكور، فلزات التذهيب وواجهات المحلات والتعليقات والأقفال.



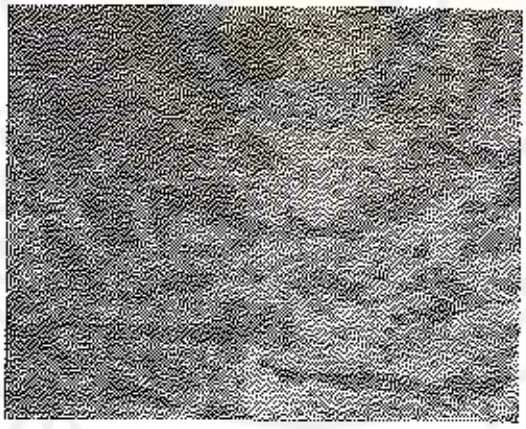
الشكل (4-63): منحني الاتزان الحراري للنحاس – رصاص.

- سبيكة النحاس البحري (Naval brass) : إن التركيب الكيميائي لسبيكة النحاس البحري هو: نحاس – (39.25%) – زنك (0.75%) قصدير، وتعرف باسم (برونز توبين) (Tobin bronze). وتمتاز هذه السبيكة بمقاومة عالية للتآكل في مياه البحر، وتستخدم لصناعة ألواح المكثفات وقضبان وأسلاك اللحام ورفاص السفن وأعمدة الكباس وجذوع المحابس، بإضافة (1.75%) رصاص لهذه السبيكة تتحسن كثيراً خاصية التشغيل بالمكنات وتستخدم السبيكة بعد إضافة الرصاص إليها في الأجزاء

الفلزية المطلوبة والمستخدمة في التطبيقات البحرية، ويوضح الشكل (4-65(أ&ب)) التركيب الميكروسكوبي لسبيكة النحاس البحري بعد سحبها على الساخن، ويتكون البناء الميكروسكوبي من وجهين هما، ألفا وبيتا، والوجه بيتا داكن اللون، بينما ألفا فاتح اللون.



شكل (4-64(أ)): مقطع ميكروسكوبي في سبيكة النحاس الأصفر سهل القطع بعد إضافة الرصاص إليها قبل التشكيل. ويتضح من الشكل التوزيع المنتظم لحبيبات الرصاص (النقط السوداء).



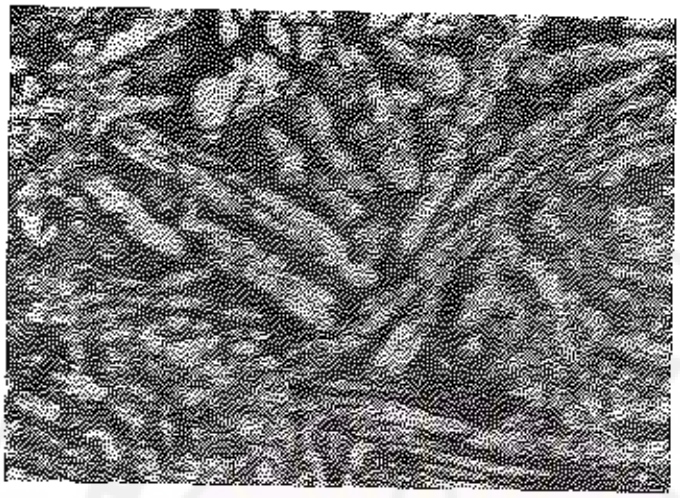
شكل (4-64(ب)): مقطع في سبيكة النحاس الأصفر سهل القطع المضاف إليه عنصر الرصاص بعد عملية التشكيل وتتضح في الصورة كريبات الرصاص الممتدة في اتجاه التشكيل (سوداء اللون). وبقية البناء الميكروسكوبي هو عبارة عن الوجه ألفا.

جدول (4-25): بعض الإضافات الفلزية للنحاس الأصفر ألفا وبيتا.

العنصر المضاف	كمية الإضافة (%)	الزنك (%)	النحاس (%)	نوع السبيكة
قصدير	1	29	70	سبيكة النحاس البحري
ألومنيوم	2		76	نحاس أصفر ألومينى
زرنيخ	0.05		70	نحاس أصفر زرنيخي
منجنيز + حديد + قصدير	1.5 0.75 0.75		58	نحاس أصفر عالي المقاومة (برونز منجنيزي)
منجنيز + حديد + ألمونيوم	1.5 0.75 4.5	39	66	نحاس أصفر عالي المقاومة (برونز منجنيزي)



الشكل (4-63)(أ): مقطع ميكروسكوبي في سبيكة النحاس الأصفر البحري بعد التشكيل على الساخن، ويتكون البناء في هذه الحالة من الوجهين الفا وبيتا، الوجه الفا (فاتح اللون) والوجه بيتا (داكن اللون).



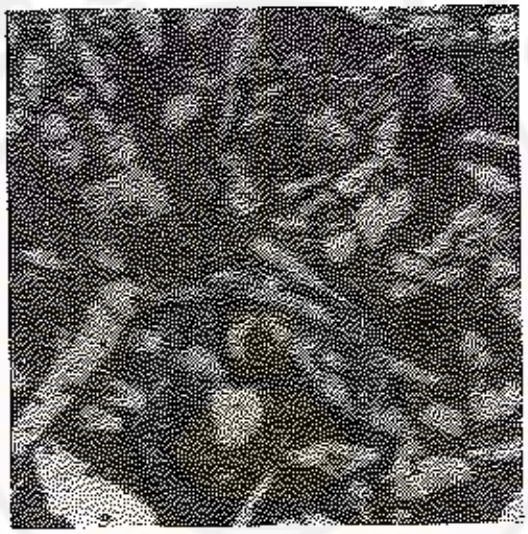
الشكل (4-65(ب)): السبيكة نفسها المبينة بالشكل (4-65(أ)) عند تكبير أعلى.

- البرونز المنجنيزي (manganese bronze): تتركب سبيكة البرونز المنجنيزي من النحاس – (39%) زنك – (1.4) حديد – (1%) قصدير – (0.1) منجنيز، وتجمع هذه السبيكة بين المقاومة العالية والمقاومة الممتازة للبلى، ونظراً لزيادة المقاومة سبيكة البرونز المنجنيزي، فإن أفضل طريقة لتشكيلها هي التشكيل على الساخن. وتعد سبيكة البرونز المنجنيزي أفضل سبائك النحاس الأصفر ألفا وبيتا جميعاً من حيث قابليتها للتشكيل على الساخن. وتستخدم هذه السبيكة في صناعة المجامع والأشكال المبثوقة والمطروحة وقضبان المضخات والقضبان الدوارة وجذوع المحابس وقضبان اللحام. ويوضح شكل (4-66) البنيان الميكروسكوبي لسبيكة البرونز المنجنيزي المصبوبة في الرمل، ويتضح في المقطع وجود إبر بيضاء مكان الوجه ألفا – المحلول الجامد – مغروسة في كنان الوجه بيتا.

4-6-5-6: سبائك النحاس قصدير (سبائك البرونز):

- قد استخدم في البداية مصطلح برونز للتعبير عن سبائك النحاس – قصدير، ولكن هذا المصطلح أصبح يستخدم الآن لأي من سبائك النحاس مع أي عنصر سبائكي

مضاف إليه فيما عدا سبائك النحاس – زنك المحتوية على (12%) زنك، أو أكثر كعنصر سبائكي أساسي فيطلق عليها النحاس الأصفر، ولقد اعتبر في الماضي أن البرونز ذا المستوى أعلى وأفضل من سبائك النحاس الأصفر، ولقد بني هذا الاعتقاد على أساس خاطئ وذلك بسبب إطلاق تعبير برونز على سبائك حقيقية وخاصة من النحاس الأصفر ولهذا حدث الخلط، والبرونز التجاري هو عبارة عن سبائك من النحاس المحتوية على أي من العناصر التالية : القصدير أو الألمنيوم أو السليكون أو البيريليوم. بالإضافة إلى ذلك فإن هناك بعض سبائك البرونز التي يمكن أن تحتوي على الفوسفور أو الرصاص أو الزنك أو النيكل.



الشكل (4-66): قطاع ميكروسكوبي في عينة من سبيكة البرونز المنجنيزي، كما هي في حالة الصب، ويتضح معها أن البرونز يتكون من الوجه ألفا (الأبيض اللون) المتكون في بنان الوجه بيتا (الداكن اللون).

ويحتمل أن يكون البرونز القصديري – النحاس المحتوي على حوالي (10%) قصدير – أول سبيكة استخدمها الإنسان، فلقد عثر في المملكة المتحدة على بعض السبائك البرونزية هو نحاس – (10%) قصدير، وهناك احتمال أن يكون الرومان عند غزوهم لانجلترا قد استخدموها وصنعوها من مناجم النحاس في منطقة كمبرلاند في مقاطعة ويلز، حيث كان إنتاج النحاس بها غزيراً في ذلك الوقت، وقبل حصول الرومان على النحاس والقصدير، قد ذهب الفينيقيون من

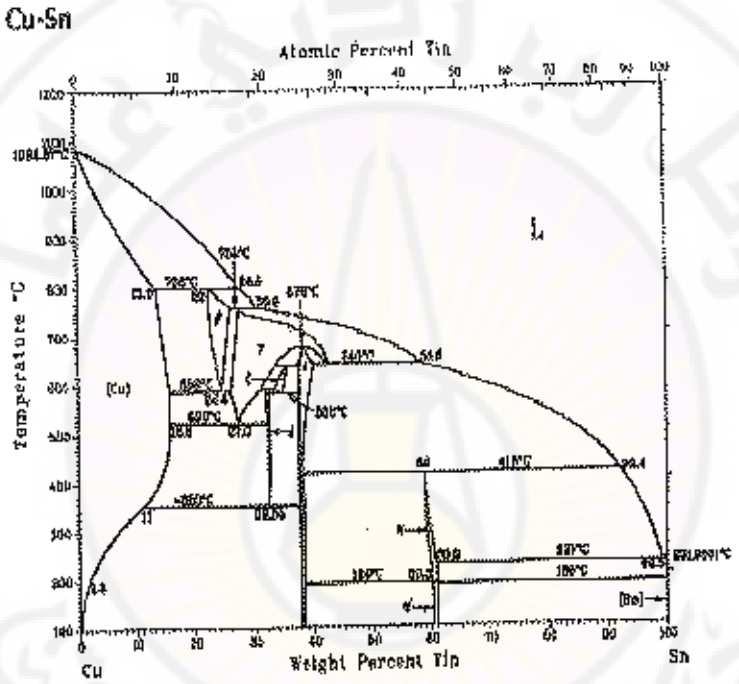
صيدا في مراكبهم للبحث عن التصدير في منطقة ويلز أيضاً، وذلك قبل الغزو الروماني بزمن طويل، أي أن الفينيقيين قد صنعوا البرونز قبل الرومان بزمن بعيد وإن لم توجد آثار تدل على ذلك، وربما يأتي اليوم الذي يتم فيه اكتشاف الدليل على صحة هذا القول. ولقد كان من أبرز المظاهر في الغزو الروماني لبريطانيا في ذلك الوقت بلا شك سيف البرونز الذي ساعدهم على احتلال البلاد، ويعتقد أنه في وقت سابق على ذلك وفي مصر القديمة قد وجد الصناع أن إضافة نسبة (10%) قصدير أنتجت مادة – برونز – صلدة، بينما عند إضافة كمية أقل من ذلك كانت المادة الناتجة طرية وليّنة. ونظراً لتكلفة النحاس العالية مقارنة بعناصر أخرى وخاصة القصدير الشديدة مع العناصر الفلزية الأخرى ذات الخواص المميزة فلقد أدى ذلك إلى تدهور وانخفاض كمية المنتج والمستخدم من البرونز القصديري في العصور الحديثة، ولكن رغم ذلك فما زالت تنتج كمية من البرونز القصديري في العصور الحديثة، لاستخدامات عدة.

1- منحني الاتزان الحراري للنحاس – قصدير:

يوضح الشكل (4-67) منحني الاتزان الحراري للنحاس – قصدير، هذا المنحني شديد التعقيد مقارنة بمنحني اتزان النحاس – وزنك. كما أن معدل انتشار القصدير في النحاس أو انتشار النحاس في القصدير أقل بكثير من معدل الانتشار في نظام الزنك والنحاس، ويستدل على صحة ذلك من المدى الواسع في التركيب عند أي درجة حرارة بين خطي السيولة والتجمد، ويؤدي هذا إلى درجة أعلى من القابلية أثناء عملية التجمد الفعلية وإضافة إلى ذلك فإن التغييرات في التركيب البنائي عند درجة حرارة أقل من (400 °C) تحدث ببطء شديد في سبائك النحاس – قصدير، وهذا يعني أن البرونز المصبوب المبرد إلى درجة حرارة عادية تحت ظروف صناعية عادية لن يعطي التركيب البنائي المتوقع من منحني الاتزان الحراري.

ويمكن باختصار القول إن التفاعل البريتكتيكي (تحول ألفا إلى بيتا) عند درجة الحرارة (789°C) وتحول الوجه جاما إلى الوجهين (دلتا+ ألفا) عند درجة الحرارة (530 °C) سوف يحدث طبقاً لما هو في منحني الاتزان الحراري أثناء التبريد بالمعدل العادل، ولكن التحول الأيوتكتيودي (تحول دلتا إلى خليط الوجهين أيسلن + ألفا) عند درجة الحرارة (350 °C) سيحدث فقط تحت ظروف تبريد بطيئة جداً جداً، أي أنه يستحيل حدوث هذا التحول في الظروف الصناعية، ولقد ثبت ذلك نظراً لأن الوجه أيسلن (ε) المكون من (Cu,Sn) لم ير على الإطلاق في بنيان البرونز المصبوب المحتوي على أكثر من (11%) قصدير، وثبت ذلك نظرياً من دراسة معدل الانتشار البطيء لذرات النحاس والقصدير عند درجة الحرارة (350 °C) وهذا

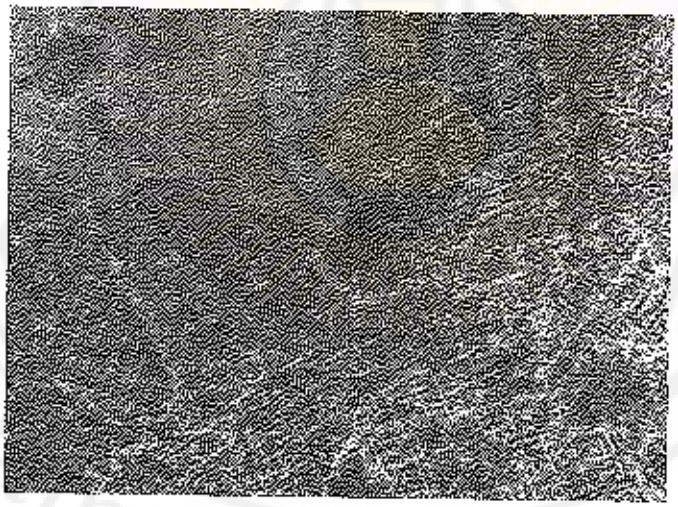
يجعل من المستحيل ترسيب الوجه أيسلن من الوجه أبسلن من الوجه ألفا في السبائك المحتوية على أقل من (11%) قصدير . وللأغراض العلمية يمكن إهمال الجزء السفلي من منحني الاتزان الحراري بين النحاس والقصدير عند درجة حرارة أقل من (400 °C)، ويفترض أن المركبات والتركيبات الموجودة عن درجة الحرارة (400 °C) سوف تظل في صورتها حتى درجة الحرارة العادية في حالة التبريد بالمعدلات العادية، أي معدلات التبريد المستخدمة في الصناعة والحياة العملية.



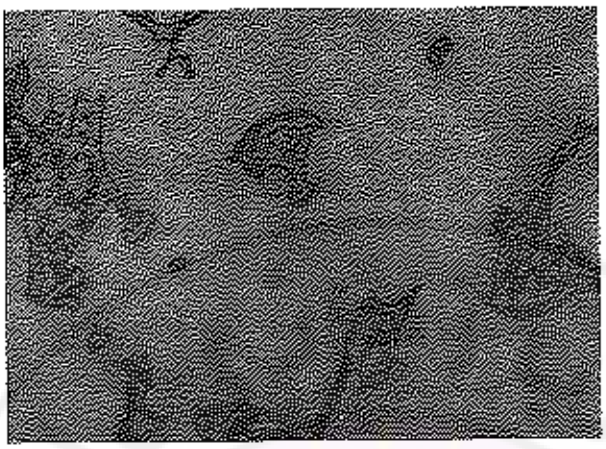
الشكل(4-67): يبين منحني الاتزان الحراري للنحاس – قصدير.

الوجه ألفا هو عبارة عن محلول جامد من النحاس والقصدير، بناؤه البلوري مكعب متمركز الوجه – وهذا الوجه شبيه بالوجه ألفا في سبائك النحاس الأصفر – وهو وجه صلب (مقاوم الصدمات) ومطيل، وبهذا يمكن تشكيل السبائك المحتوية على هذا الوجه على البارد. أما الوجه دلتا (δ) فإنه مركب فلزي متداخل من النحاس والقصدير وتركيبه (Cu_3Sn)، وهذا المركب الفلزي صلد وقصيف أزرق اللون، ووجوده يعني أن السبيكة المكونة من الوجهين (ألفا + دلتا) (α +δ)

قصيفة على حد ما؛ وعلى هذا إذا كانت النية منهجية لتشكيل السبيكة على البارد، ولو إلى درجة صغيرة، فلابد أن يختفي المركب دلتا ولا يظهر في التركيب البنائي للسبيكة، وأفضل وسيلة للتخلص من الوجه دلتا عن طريق إذابته في السبيكة من خلال التلدين لمدة تتراوح ما بين ساعة وست ساعات عند درجة حرارة تتراوح ما بين (600 °C) و (700 °C) – اعتماداً على التركيب وحجم ونوع الصبة – ثم تبرد الصبة بعد ذلك في الهواء، وبهذه الطريقة يتم الوصول إلى حالة الاتزان الموضحة في منحنى الاتزان الحراري، ويكون كنان السبيكة عبارة عم الوجه ألفا المنتظم، وفي بعض الأحيان لا يصاحب وجود الوجه دلتا أي ضرر في عدد كبير من سبائك برونز القصدير، وبالتالي فلا يوجد أي داع لأية معالجة حرارية، وتجري المعالجة الحرارية فقط في حالة ما إذا كان الوجه دلتا موزعاً في صورة طبقة رقيقة أو غشاء منتظم على حدود الحبيبات، نظراً لأن وجود الوجه دلتا في هذه الصورة يؤدي إلى تقصف المادة، ويبين الشكل (4-68(أ)) التركيب البنائي لسبيكة محتوية على (10%) قصدير تم تبريدها بسرعة، ويتضح من الشكل أن حبيبات الوجه دلتا موزعة في كنان الوجه ألفا الشجري، وتفاصيل ذلك بصورة أوضح مبينة بدرجة تكبير أعلى في شكل (4-68(ب)).



الشكل(4-68(أ)): قطاع ميكروسكوبي في إحدى سبائك برونز - قصدير المحتوية على (10%) قصدير المبردة سريعاً، ويظهر فيها حبيبات الوجه دلتا في كنان الوجه ألفا الشجري.



الشكل(4-68(ب)): تفاصيل الوجه دلتا المتكون في سبيكة برونز القصدير نحاس (10%) قصدير بعد تبريدها سريعا كما في حالة الشكل (4-68(أ)).

2- سبائك برونز القصدير (Tin bronzes):

يقصد بسبائك برونز القصدير السبائك المكونة من النحاس والقصدير، ويشاد إلى هذه السبائك تجاريا باسم البرونز الفوسفوري (phosphor bronze) نظراً لأن الفوسفور يضاف غالباً إلى هذه السبائك لإزالة الأكسجين أثناء عملية السباكة، وتتراوح نسبة الفوسفور في هذه السبائك بين (0.01%) و(0.05%)، أما نسبة القصدير فتتراوح بين (1%) و(11%) وتسمية برونز القصدير هذا باسم (البرونز الفوسفوري) خطأ لأن البرونز الفوسفوري الحقيقي هو ذلك الذي يحتوي على الفوسفور المضاف كعنصر سبائكي بنسب تتراوح (0.1%) و (1.0%) دون وجود أي قصدير في السبيكة.

تمتاز مجموعة سبائك البرونز القصديري بالعديد والخواص المهمة، ومن هذه الخواص ما يلي:

1. خواص ميكانيكية – المقاومة والمطيلية – جيدة عند درجات الحرارة العالية إضافة إلى الصلادة المرتفعة عند الظروف نفسها.
2. درجة توصيل كهربائية مقبولة.
3. خواص جيدة في السباكة والتشكيل.
4. مقاومة للتآكل جيدة وخاصة في ماء البحر، كما أنه لا يعاني على الإطلاق من التشققات الموسمية.

5. خواص تحميل ممتازة ؛ نظراً لصغر معامل احتكاكه.
6. سهولة في اللحام والتوصيل.
7. مقاومة جيدة للبلى.

وسبائك البرونز التجارية المستخدمة في الأغراض الهندسية تكون في أربع صور مختلفة هي سبائك البرونز القصديري المطروقة، وبرونز القصدير المصبوب، وبرونز القصدير المحتوي على الزنك، وبرونز القصدير المحتوي على الرصاص، تفاصيل ذلك على النحو التالي:

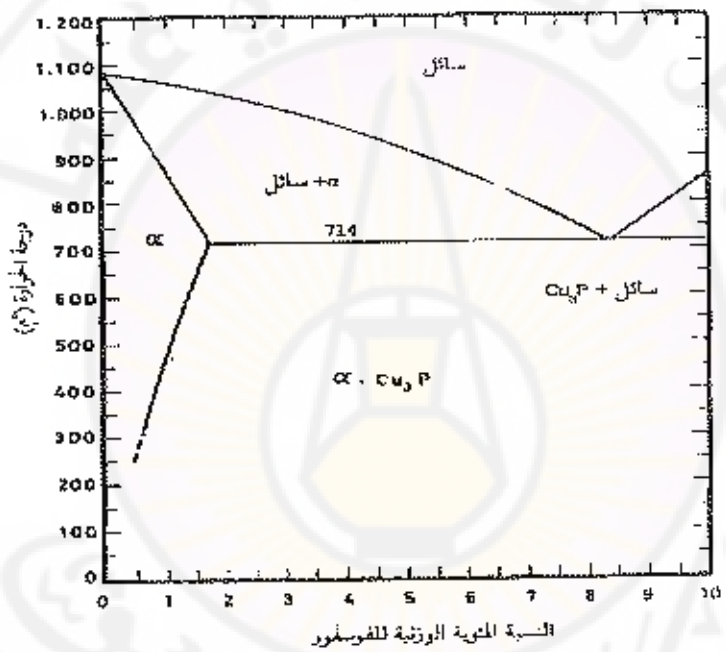
أولاً: <u>سبائك البرونز القصديري المطروقة (wrought copper – tin bronze):</u>

تحتوي سبائك برونز القصدير المطروقة على نسبة من القصدير تتراوح ما بين (1.25%) و (10%) بالإضافة إلى نسبة من الفوسفور تصل إلى (1%)، وتعرف هذه السبيكة عندئذ باسم البرونز الفوسفوري (phosphor bronze)، ويضاف الفوسفور إلى سبائك برونز القصدير المطروقة لتحسين خواص السبكية (castability)، إضافة إلى أن عنصر الفوسفور يساعد في إزالة الأكسجين، ولقد سبق توضيح تأثير كل من الفوسفور والأكسجين على سبائك النحاس.

وإذا احتفظت السبيكة بأي كمية من الفوسفور المضاف بعد إزالة الأكسجين يتكون المركب الصلد (Cu_3P)، ويرجع ذلك لذائبية الفوسفور في النحاس، كما هو مبين في منحني الاتزان الحراري لسلسلة من سبائك النحاس والفوسفور الموضحة في الشكل (4–69)، يزيد المركب (Cu_3P) من مقاومة وصلادة البرونز القصديري وبرونز القصدير الطروق أعلى مقاومة من النحاس الأصفر، وخاصة بعد عمليات التشكيل على البارد، كما أن مقاومته للتآكل أفضل. ويبين جدول (4–26) التركيب الكيميائي الأسمى والخواص الميكانيكية واستخدامات بعض سبائك برونز القصدير المطروقة، ويوضح شكل (4–70) التركيب البنائي لسبيكة نحاس – (8%) قصدير المحتوية على اثار من الفوسفور بعد التلدين، ويتكون البناء الميكروسكوبي من بلورات أعيد بلورتها، وهذه البلورات متساوية تقريباً في الأبعاد، وهي مكونة من محلول ألفا الجامد.

يتميز البرونز الفوسفوري (أو برونز القصدير الطروق) بمقاومة وصلابة عاليتين إضافة إلى مقاومة جيدة ضد التآكل مع معامل احتكاك صغير وعدم التعرض للتشققات الموسمية، وتستخدم سبائك هذه المجموعة بكثرة وبتوسع في صنع الأغشية الرقيقة الحاجزة والنوابض (زنبركات) وأجهزة تعشيق التروس والبطانات الفلزية، لتخفيف البلى، والمسامير الخابورية.

يحل الزنك أحياناً محل جزء من القصدير في سبائك برونز القصدير الطروقة، وتؤدي إضافة الزنك لتحسين خواص السباكة وزيادة الصلابة ورفع مقاومة الصدمات مع تأثير محدود على مقاومة البلى، وفي أحيان كثيرة يضاف الرصاص للبرونز القصديري لتحسين خواص التشغيل بالمكنات وكذلك تحسين مقاومة البلى، وتصل نسبة الرصاص في البرونز عالي الرصاص إلى حوالي (25.0%). وتستخدم السبائك المحتوية على الرصاص في تغليف و تبطين المواد الفلزية لتقلل من البلل و تخفف منه، وكذلك تستخدم في صناعة المحامل المستعملة تحت تأثير أحمال خفيفة ومتوسطة.



الشكل(4-69): الجزء الغني بالنحاس من منحني الإتزان الحراري للنحاس ـ فوسفور.

ثانياً : برونز القصدير المصبوب:

إن سبائك النحاس – قصدير (برونز القصدير) هي التي يزيد نسبة القصدير فيها على (10%)، و هذه السبائك غير قابلة للتشكيل بالمكنات أو التشكيل بالطرق أو السحب أو غير ذلك، ولكن يمكن تشكيلها بالصب و السباكة، و لهذا تعرف هذه السبائك باسم برونز القصدير

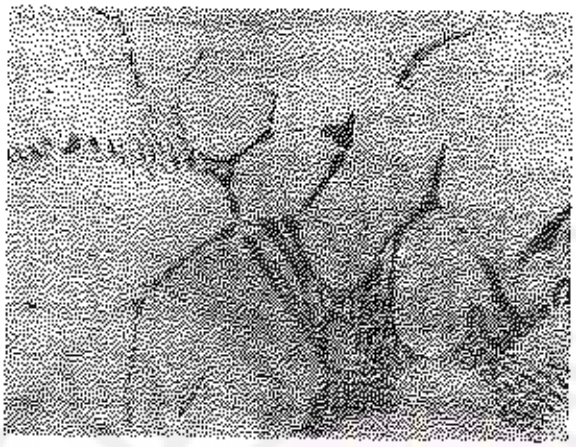
المصبوب. وتستخدم هذه السبائك كمواد للمحامل العاملة تحت أحمال كبيرة و كذلك في مجموعة قواعد التروس المسننة.وتصب مجموعة التروس المسننة بقوة الطرد المركزي للتأكد من سلامة الصب.و سبائك النحاس – (10%) قصدير هي السبائك القياسية المستخدمة في المحامل مع إضافة كمية من الرصاص لتحسين اللدونة لسطوح المحامل. ويتركب البرونز الفوسفوري المصبوب من نحاس –(13%) قصدير – (1%) فوسفور، وتستخدم هذه السبائك لصناعة فلزات المحامل و أجزاء آلية مركبات أخرى تتطلب معامل احتكاك صغيراً مع مقاومة عالية بعد إزالة الأكسجين في تلك السبائك المركب Cu_3P وهو مركب صلد، كما أنه عبارة عن خليط من الأيوتكتيود مع الوجهين ألفا و دلتا. ويبين الشكل (4–71) الشكل الميكروسكوبي لهذا المركب.



الشكل(4-70): التركيب الميكروسكوبي لسبيكة البرونز الفوسفوري، وهي سبيكة تركيبها الكيميائي نحاس – (8%) قصدير - آثار من الفوسفور، ويتضح في الصورة ظهور توأمة التلدين في بلورات ألفا بعد إجراء التلدين على السبيكة.

جدول (4-26): التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية لبعض سبائك البرونز الفوسفوري (البرونز القصديري)

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي (%)	الصورة المتوافرة تجاريا	الخواص الميكانيكية			مقاومة التآكل	قابلية التشغيل بالماكنات	طرق التشكيل وأهم الاستخدامات
			مقاومة الشد Ksi(MPa)	اجهاد الخضوع Ksi(MPa)	النسبة المئوية للاستطالة			
505 برونز فوسفوري 1.25%E	Cu 98.75 Sn 1.25 ناتج من الفوسفور	ألواح مسلحة، وأسلاك	79-40 (553-280)	50-14 (350-98)	4-48	جيدة- ممتازة	20	ممتازة في التشكيل على البارد جيدة في التشكيل على الساخن تستعمل في التطبيقات التي تحتاج لتشكيل الأغلاف، والقمي والقصر تستخدم في التوصيلات الكهربائية القابلة للثني، وخطوط الضغط العالي.
510 برونز فوسفوري 5%A	Cu 95.0 Sn 5.0 ناتج من الفوسفور	ألواح مسلحة، وأسلاك وأنابيب وقضبان	140-47 (980-329)	80-47 (560-133)	2-64	جيدة- ممتازة	20	بتشكيل الأغلاف، والقمي، والدافعة، والقصر، والأغطية تستخدم في الأنابيب وأجزاء المجامع، وتبلة مثقوبة و المثبتات وعكانات النسيج وصمامات الحدم و أجزاء الصناعات الكيميائية



الشكل(4-71): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة البرونز الفوسفوري (نحاس – 13% قصدير – 1% فوسفور) المصبوبة – دون نمش، يتضح في الصورة تفاصيل الوجه الفا الشجري إضافة إلى التركيب الأيوتكتويدي (الرمادي الخفيف) ذي التركيب الشجري مع فوسفور النحاس Cu_3P (الرمادي الداكن).

ثالثاً : برونز القصدير المحتوي على الزنك.

تشمل سبائك برونز القصدير المحتوي على زنك كلا" من سبائك البرونز الطروق و البرونز المصبوب، و تستخدم السبائك الطروقة المحتوية على (3%) لتصل إلى نسبة (0,05) وحل محله الزنك رخيص الثمن – حيث إن ثمن وحدة القصدير عشرة أمثال ثمن الوحدة المناظرة من الزنك – بالإضافة إلى فاعلية الزنك في إزالة الأكسجين مثله في ذلك مثل الفوسفور، حيث يتكون أكسيد الزنك الذي يطفو على الصبة المنصهرة،ومن ثم تتم إزالته.

و تتركب سبائك البرونز الطروقة المحتوية على الزنك من الوجه ألفا، و تشبه في تركيبها المكروسكوبي سبائك البرونز العادية المحتوية على النسب نفسها من النحاس و القصدير.

إن أفضل السبائك المعروفة من السبائك المصبوبة من هذه السلسلة هي سبيكة برونز المدافع أو سبيكة نحاس البحرية ويرمز لها بالأرقام (88-100-2)، نظراً لأن تركيبها: نحاس (88%) – قصدير (10%) – زنك (2%). و لقد توقف الآن استخدام هذه السبيكة في المعدات البحرية الحربية، و لكنها ما زالت مستخدمة في المعدات أو الإنشاءات البحرية المدنية التي تحتاج إلى مقاومة تآكل عالية. وبنيان هذه السبيكة مشابهة لبنيان سبيكة البرونز القصديري المحتوية

على(11%) قصدير، ويخفض الزنك المضاف من سعر السبيكة، كما يعمل كعنصر مزيل للأكسجين، وإضافة إلى ذلك يزيد من انسيابية السبيكة، مما يساعد على عمليات الصب.

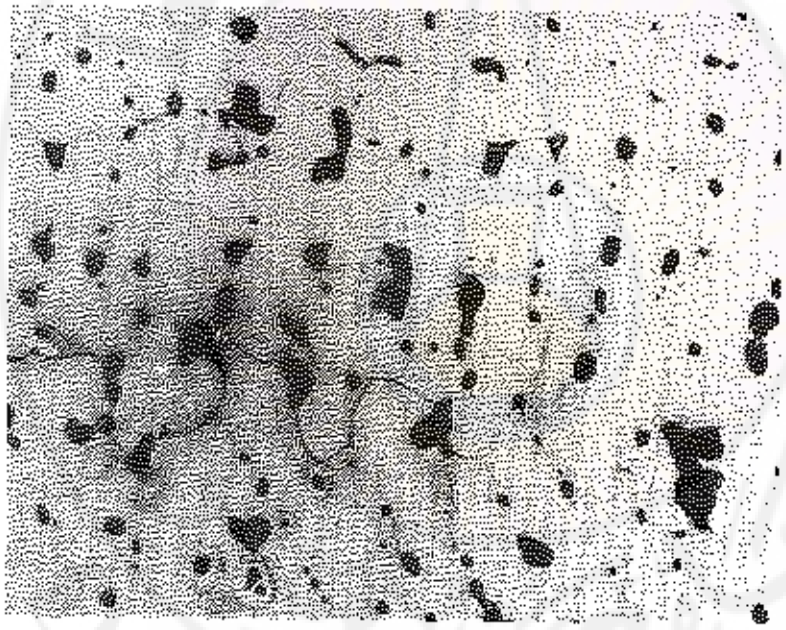
رابعاً: برونز القصدير المحتوي على الرصاص:

إن تركيب سبائك برونز القصدير المحتوية هو تركيب سبائك برونز القصدير نفسها المحتوي على الزنك مضافاً إليه كمية من الرصاص، ويضاف الرصاص لهذه السبائك – كما أضيف لسبائك النحاس الأصفر – وأشهر سبائك برونز القصدير المحتوي على الرصاص هي السبيكة المعروفة (85-5-5-5)، حيث إنها تتركب من (85%) نحاس – (5%) قصدير – (5%) زنك – (5%) رصاص (أي يضاف للنحاس 5% من كل من عناصر القصدير و الزنك و الرصاص) ولا يدخل الرصاص المضاف في المحلول الجامد، فلهذا فإنه يوجد في صورة كريات متقرعة أو شجرية، كما هو موضح في البناء الميكروسكوبي شكل (4-72)، ويلاحظ من الشكل وجود مسام داخلية والتي يرجع تكونها بهذه الصورة إلى المدى الواسع من التجمد – الاختلاف بين خطي السيولة والتجمد – ويساعد الرصاص المضاف على ملء هذه المسام الدقيقة الداخلية. ويضاف إلى سبائك برونز المدافع أيضاً كمية من النيكل بنسبة تتراوح ما بين (1%) و (2%) لتحسن الخواص الميكانيكية، كما أنه يساعد في القضاء على مشكلة تجمع الرصاص أو عزله.

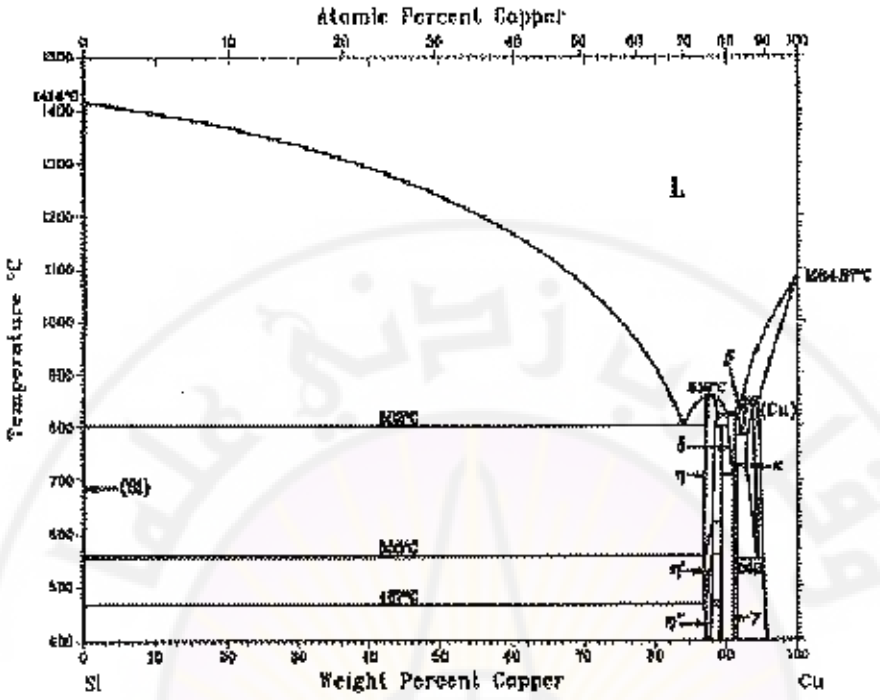
توجد مجموعة خاصة من سبائك برونز القصدير المحتوي على الرصاص، وهي سبائك المحامل الخاصة، وتبلغ نسبة الرصاص المضاف عندئذ حوالي (20%)، وتعرف هذه السبائك باسم الفلزات البيضاء، وهي سبائك من النحاس و القصدير والرصاص، وتتراوح نسبة القصدير فيها ما بين (5%) و (10%)، والرصاص ما بين (10%) و (20%)، ويتوزع الرصاص المضاف في كل من الوجه ألفا و خليط الوجهين (ألفا + بيتا). ومعامل توصيل سبائك الفلزات البيضاء للحرارة أعلى من أية سبائك أو فلزات محامل أخرى، ولهذا فإنه يمكن استعمالها عند السرعات العالية، نظراً لارتفاع معدل فقد الحرارة، مقارنة بأي مواد أخرى مستعملة للغرض نفسه، وعند استخدام زيت التزليق ترتفع مقاومة هذه السبائك للبلي، وفي الوقت نفسه فإن مقاومة الالتصاق عالية، نظراً لأن الرصاص يعمل مرحلياً كمادة تزليق عندما يفشل زيت التزليق المستخدم. وتستخدم هذه السبائك بكثرة في العمود المرفقي للطائرات و السيارات.

4-6-5-7: برونز السيليكون (Silicon Bronzes):

يوضح الشكل (4-73) منحني الاتزان الحراري – الجزء الغني بالسليكون لسبائك النحاس – سليكون، وتبلغ ذائبية السليكون في الوجه ألفا حوالي (5,3%) عند درجة حرارة (652°C)، وتقل الذائبية بانخفاض درجة الحرارة والتفاعل الأيوتكتيودي الذي يتم عند درجة الحرارة (555°C)هو تفاعل بطيء، ولهذا تحتوي سبائك النحاس- سليكون على أقل من (5%) سليكون، أي أنها وحيدة الوجه، ويشار إلى هذه السبائك باسم برونز السليكون أو بالاسم التجاري لبعضها مثل (إيفردور) (Everdur) و (هركلوي) (Herculoy) وتتراوح نسبة السليكون في سبائك برونز السليكون التجارية ما بين (1%) و (3%)، وإضافة كمية صغيرة من عنصري المنجنيز والحديد تحسن بعض خواص سبائك برونز السليكون ويبين جدول (4-26) التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية والاستخدامات لاثنين من أهم سبائك هذه المجموعة.



الشكل(4-72): قطاع ميكروسكوبي في عينة من سبيكة البرونز المنجنيزي، كما في حالة الصب. ويتضح منها أن البرونز يتكون من الوجه ألفا (الأبيض اللون) المتكون في بنان الوجه بيتا (الداكن اللون).

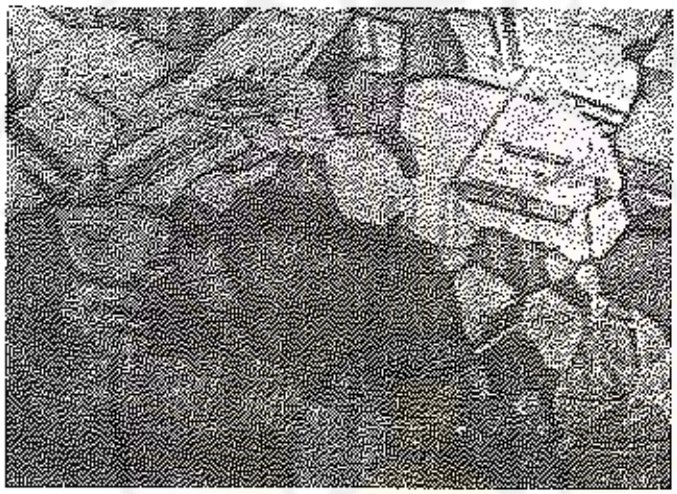


الشكل(4-73): يبين منحني الإتزان الحراري للنحاس – سيليسيوم.

يعد برونز السليكون أعلى جميع سبائك النحاس المصلدة بالتشكيل مقاومة، وتتقارب الخواص الميكانيكية لبرونز السليكون مع الخواص الميكانيكية للفولاذ الطري، كما أن مقاومتها للتآكل تقارن بمقاومة النحاس وتقاربها. ويستخدم برونز السليكون في صناعة الصهاريج والخزانات والأوعية الواقعة تحت الضغط، وفي الإنشاءات و المنشآت البحرية. وسبائك برونز السليكون منخفضة السعر، ولهذا فقد حلت في كثير من التطبيقات محل برونز القصدير، ويساعد على ذلك أيضاً مقاومتها العالية للتآكل في مياه البحر الراكدة، ولكن معدل تآكل سبائك البرونز السليكوني تزيد كثيراً في المياه المتحركة بسرعة. ويمكن أن تنتج سبائك البرونز السليكوني وتصنع إما بالصب أو بالتشكيل على البارد أو بالتشكيل على الساخن.

يبين شكل (4-74) البناء الميكروسكوبي لمسبيكة (إيفورد)، المركبة من : نحاس – (3%) سليكون – (1%) منجنيز، بعد التلدين، وكما في الحالة وجميع سبائك برونز السليكون ذات

الوجه ألفا، فإن البناء الميكروسكوبي يتكون من حبيبات الوجه ألفا مع شريط من التوأمة البلورية داخل الحبيبات. أما الخواص الميكانيكية لسبائك برونز السليكون ذات النسب المنخفضة أو العالية من السليكون فهي موضحة في جدول (4-27)، وتتراوح مقاومة سبائك البرونز السليكوني للشد ما بين (276MPa) و (386MPa) في حالة التلدين، أما عند التشكيل على البارد فتزيد الصلادة كثيراً، وتصل مقاومة الشد إلى حوالي (999MPa) وهذه قيمة عالية جداً. ولا يمكن تصليد هذه السبائك بالترسيب، نظراً لأن ذائبية السليكون في المحلول الجامد لا تقل كثيراً بانخفاض درجة الحرارة.



الشكل(4-74): التركيب الميكروسكوبي لسبيكة برونز السيلكون: نحاس – (3%) سيلكون – (1%) منغنيز بعد التلدين، وكما هو واضح فإن تركيب هذه السبيكة هو عبارة عن الوجه ألفا الذي ظهرت فيه كثيرا التوأمة البلورية داخل الحبيبات.

4-6-5-8: برونز الألمنيوم (Aluminum bronze):

يبين الشكل (4-32) الجزء الغني بالنحاس من منحني الاتزان الحراري بين النحاس والألمنيوم، ويظهر من الشكل أن أقصى ذائبية للألمنيوم في الوجه ألفا من المحلول الجامد هي حوالي (9,5) عن درجة الحرارة (566 °C). ويتحول الوجه بيتا خلال التفاعل الأيوتكتيودي عند درجة الحرارة (566 °C) مكوناً خليطاً من الوجهين (ألفا + بيتا) ويتضح من الشكل كذلك المدى الصغير ما بين خطي السيولة والتجمد.

جدول (4-27): بعض المعلومات عن خواص الزحف لسبائك النحاس

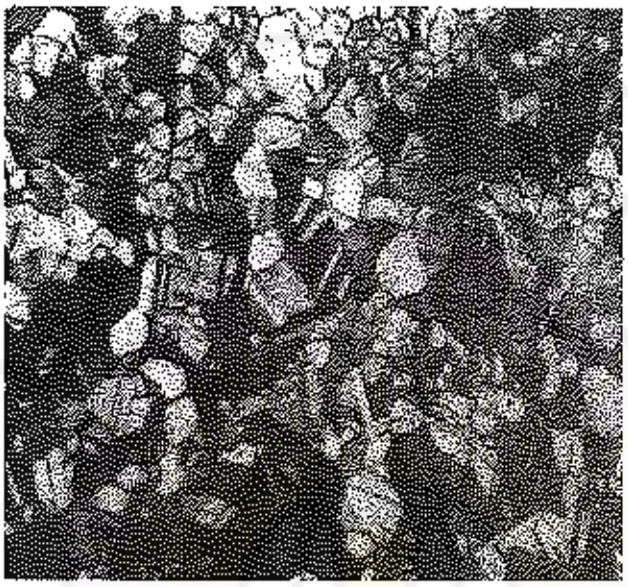
السبيكة ورقمها	درجة الحرارة (م)	مقدار الإجهاد (MPa) اللازم للحصول على (0.1 %) انفعال لمدن	
		10^3 ساعة	10^4 ساعة
السبائك المطروقة:	149	70	
نحاس c107	204	45	
	260	35	
نحاس كادميوم c108	200	122	
	250	101	
نحاس – 1% كروم	280	165	
	320	108	
	350	86	
نحاس أصفر (30/70) CZ106H	149	352	
	204	25	
	260	5	
نحاس أصفر cz110	200	178	
	250	85	
	300	63	
السبائك المطروقة:	238	70	
برونز فوسفوري PB101	321	21	
	368	7	
برونز ألومينى CA104	250	170	
	350	88	
	450	33	
	550	13	
برونز ألومينى CA105	316	162	
	371	75	
كوبرونيكل CN107	350	142	
	450	57	
	550	5	
كربوسليكون CS 101	200	220	
	300	82	
السبائك المصبوبة :	176		77
نحاس أصفر SCB1	232		55
	288		11
نحاس أصفر HTB1	176		38
	204		23
	232		15
نحاس أصفر HTB2	176		124
	204		62
	232		4

70 31 11		176 232 288	برونز LB2
46 27 70 31 54 23		232 288 232 288 232 288	برونز المدافع LG1 LG2 LG4
132 38 200 38		204 315 204 315	برونز الومينى AB1 AB2

والبناء البلوري للوجه ألفا هو مكعب متمركز الوجه، لهذا فإنه مطيل، كما يكون الوجه ألفا مع الوجه بيتا أيوتكتيكاً عند درجة الحرارة (°C 577) وتركيز من الألمنيوم مقداره (8,5%). أما البناء البلوري للوجه بيتا فمكعب متمركز الجسم، وهو أعلى صلادة من الوجه ألفا. والتركيب الميكروسكوبي لسبيكتي نحاس – (5%) ألمنيوم ونحاس (9,6%) ألمنيوم موضح في شكلي (4–75) (4–76) ويتضح من شكل (4–75) أن التركيب الميكروسكوبي لسبيكة نحاس– (5%) ألمنيوم شبيه بالبنيان الميكروسكوبي لسبائك النحاس الأصفر ألفا.

يطلق على سبائك النحاس – ألمنيوم اسم برونز الألمنيوم، ولكن يفضل تسميتها نحاس الألومنيوم الأصفر (aluminum brass) أو (النحاس الأصفر الألومينى). وتحتوي معظم سبائك برونز الألمنيوم على نسبة من الألمنيوم تتراوح مابين (4%) و (11%)، وتكون السبائك المحتوية على نسب من الألمنيوم حتى (7%) وحيدة الوجه وهي عالية المقاومة ومتينة، وذات قابلية جيدة للتشكيل على البارد، بالإضافة إلى مقاومة جيدة ضد التآكل، بينما تكون السبائك المحتوية على نسب من الألومنيوم مابين (7,5%) و(11%) من وجهين، وبوجه عام فإن سبائك نحاس ألومنيوم سبائك صلدة إلى حد ما وذات مقاومة عالية للشد، إضافة إلى مقاومتها الجيدة للصدمات. وتقاوم هذه السبائك البلى و الكلال كما هو مبين في جدول (4–28) الذي يوضح التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية واستخدامات عدد من سبائك النحاس ألمنيوم وتمتاز سبائك النحاس ألومنيوم بمقاومة تآكل ممتازة مقارنة بسبائك النحاس الأخرى، وكما يبدو فإن سبائك النحاس – ألمنيوم هي أفضل سبائك النحاس جميعاً في مقاومة التآكل، ويقارن جدول (4–29) بين خواص التآكل لعدد من سبائك النحاس وبعض المواد الأخرى في عدد من الأوساط المختلفة. ويرجع تفوق سبائك النحاس – ألمنيوم في مقاومة التآكل إلى حدوث الالتئام

الذاتي لطبقة الأكسيد المتكونة على سطح السبيكة عند كسرها أو فشلها لأي سبب من الأسباب، وتتركب طبقة الأكسيد المتكونة على سطح سبائك النحاس – ألمنيوم المقاومة للتآكل من أكسيد الألمنيوم الذي يمتاز بالتصاقه بجسم المادة، وخلوه من العيوب، ولهذا فإنه مقاوم ممتاز لاستمرار التآكل.



الشكل(4-75): التركيب الميكروسكوبي لسبيكة برونز الألمنيوم [نحاس – (5%) ألمنيوم] بعد تلدينها، والتركيب البنائي لهذه السبيكة، كما هو واضح في الشكل عبارة عن ألفا الذي تظهر في حبيباته شرائط التوأمة البلورية.

يمكن تقسيم سبائك البرونز الألومينى – كما في حالة النحاس الأصفر – إلى مجموعتين، المجموعة الأولى هي التي يتم تشكيلها على البارد، والمجموعة الثانية هي التي تشكل بالصب، ويعتمد التقسيم على التركيب الكيميائي وبالتالي الأوجه المتكونة في السبيكة. وكما هو واضح من منحنى الاتزان الحراري (4-32) فإن الوجه ألفا – المحلول الجامد – يحتوي على نسبة ألمنيوم تصل إلى (9.4%) عند درجة الحرارة العادية، مثل بقية سبائك النحاس الأخرى فإن سبائك برونز الألمنيوم تكون عندئذ مطيلة، ويمكن تشكيلها على البارد. وبزيادة نسبة الألمنيوم على (9.5%) يتكون الوجه (γ_2) إضافة إلى الوجه ألفا، أي أنها سبائك مكونة من وجهين، والوجه (γ_2) عبارة عن مركب فلزي متداخل تركيبه الكيميائي (Cu_9Al_4)، وخواصه مشابهة

لخواص المركبات الفلزية،أي أنه صلد وقصيف. وعند تكون الوجه(γ2) في سبائك برونز الألمنيوم، تصبح السبيكة قصيفة ولا يمكن تشكيلها على البارد. ويمكن معالجة الألمنيوم ذي الوجهين (ألفا + بيتا) حرارياً، حيث يتم الحصول على كتان شبيه بكتان الفولاذ. وفيما يلي نستعرض المعالجات الحلولية الحرارية لسبائك برونز الألمنيوم ذات الوجهين، وكذلك استعراض مجموعتي سبائك النحاس – ألمنيوم بشيء من التفصيل.



الشكل(4-76): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة برونز الألمنيوم [نحاس – (9.6%) ألمنيوم] بعد التشكيل على الساخن، ويظهر في هذه الحالة تكون الوجهين ألفا وبيتا. ويظهر الوجه بيتا (داكن اللون) بصورة طولية مع اتجاه التشكيل.

جدول (4-28): التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية وبعض تطبيقات سبائك برونز الألمنيوم.

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي (%)	شكل المنتج	الخواص الميكانيكية			مقاومة التآكل	قابلية التشغيل بالمكائن	طرق التشكيل و الاستخدامات
			مقاومة الشد	إجهاد الخضوع	الاستطالة			
608 5%	95,0Cu 5,0Al	برونز الالومنيوم ؛ أنابيب	60 (420)	27 (189)	55	جيدة - معتدلة	20	جودة التشكيل على البارد، ومقبولة التشكيل على الساخن وتستخدم في صناعة أنابيب المكثفات والمبخرات و المبادلات الحرارية، وأنابيب القطرات
610	92,0Cu 8,0 Al	قضبان وأسلاك	80-70 (560-490)	55 -30 (385-210)	25-65	جيدة - معتدلة	20	جيدة التشكيل على الساخن و البارد، يستخدم في صناعة المسامير والصواميل وأجزاء المضخات، وأعمدة الإثارة، وقضبان التوصيل، وتغطية الفولاذ لمقاومة البلى
613	92,650Cu 0,35Sn 7,0Al	منتجات مسطحة وقضبان وأنابيب على شكل حرف (s)	85-70 (560-490)	58-30 (379-210)	35-42	جيدة ، معتدلة	30	قابلية جيدة للتشكيل على الساخن و البارد، تستخدم في صنع المسامير والصواميل والأجزاء المقاومة للتآكل، والأوعية المقاومة للتآكل وأجزاء المنشآت وأجزاء المكثفات، وأنابيب المكثفات ونظم الأنابيب والمنشآت البحرية وتغليف الفولاذ وتغطيته

يتبع جدول (4-28): التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية وبعض تطبيقات سبائك برونز الألمنيوم

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي (%)	شكل المنتج	الخواص الميكانيكية			مقاومة التآكل	قابلية التشغيل بالمكنات	طرق التشكيل و الاستخدامات
			مقاومة الشد	الاستطالة	الصلادة			
614	91.0Cu 7.0Al 2.0 Fe	برونز الالومنيوم: منتجات مسطحة وأسلاك وقضبان وانابيب وموامير على شكل حرف (s)	89 76 (632-532)	60 -33 (420-231)	32 - 45	جيدة - ممتازة	20	مشابهة للسبيكة 613
618	89.0Cu 1.0Fe 10.0Al	قضبان	85-80 (595-560)	42-39 294 (273)	23 -28	جيدة - ممتازة	40	تصنع بالطرق والضغط على الساخن يستخدم في صنع الجلب وصناعة الوصلات وعوامل الكوارسي والتطبيقات التي تحتاج إلى مقاومة التآكل وقضبان اللحام
619	86.5Cu 4.0Fe 9.5Al	منتجات مسطحة	152-92 1064 - (644)	145-49 (1015-643)	1-30	جيدة - ممتازة	50	قابلية ممتازة للتشكل على الساخن، تشكل بالأغلاف، يستخدم في البرايات وأجزاء مفاتيح الكهرباء

Damascus University

يتبع جدول (4-28): التركيب الكيميائي و الخواص الميكانيكية و بعض تطبيقات سبائك برونز الألمنيوم

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي(%)	شكل المنتج	الخواص الميكانيكية			مقاومة التآكل	قابلية التشغيل بالمكنات	طرق التشكيل و الاستخدامات
			مقاومة الشد	إجهاد الخضوع	الاستطالة%			
623	87,0Cu 3,0Fe 10,0Al	منتجات مسطحة وقضبان	98-75 (686-525)	52 35 (346-245)	22-35	جيدة - ممتازة	50	ذات قابلية تشكيل على الساخن و البارد تصنع بالثني و الطرق على الساخن و بالضغط الساخن تشكل و تلحم تستخدم في سبائك المحامل، و صنع الجلب، و جذع المضخات، و التروس و المسامير و الفلاوظ و قضبان الملمعات
624	86,0Cu 3,0Fe 11,0Al	أجزاء مسطحة و قضبان	105-90 (735 630)	52-40 364-(280)	14-18	جيدة - ممتازة	50	ذات قابلية ممتازة للتشكيل و التسخين بالطرق على الساخن و الثني الساخن و تستخدم لصناعة الجلب وصفارق التروس و السنابك و الحنية و الشدادات
625	82,7Cu 4,3Fe 13,0Al	أجزاء مسطحة و قضبان	100 (700)	55 (385)	1	جيدة - ممتازة	20	قابلية ممتازة للتشكيل على الساخن، تصنع بالطرق الساخن و التشغيل بالمكنات تستخدم لصناعة الجلب المقاومة للبلى، و الحنية و القوالب و المدلفات

يتبع جدول (2-4-4): التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية وبعض تطبيقات سبائك بروانز الألمنيوم

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي(%)	شكل المنتج	الخواص الميكانيكية			مقاومة التآكل	قابلية التشغيل بالمكائن	طرق التشكيل والاستخدامات
			مقاومة الشد	اجهاد الخضوع	الاستطالة			
630	82,0Cu 3,0Fe 10,0Al 5,0 Ni	أجزاء مسطحة و قضبان	118-90 826-) (630	75 50 (525-650)	15-20	جيدة - ممتازة	30	جيدة التشكيل على الساخن، تصنع بالتشكيل بالطرق على الساخن،تستخدم في المسامير والصواميل وهذرع المحابس، ودافعات وأعمدة وأجزاء الطائرات، أجزاء المنشآت
632	82,0Cu 4,0Fe 9,0Al 5,0Ni	أجزاء مسطحة و قضبان	105-90 (735 630)	53-45 371-(315)	20-25	جيدة - ممتازة	30	جيدة التشكيل على الساخن تشكل بالتشكيل الساخن والباهم تستخدم في المسامير والصواميل وأجزاء المضخات وبالذات التي تتطلب مقاومة تآكل جيدة
638	95,0Cu 2,8Al 1,85i 0,40Co	أجزاء مسطحة	130 98 910-686) (	114-54 (798-378)	4-36	جيدة - ممتازة		ممتازة في التشكيل على البارد والساخن، تستخدم في صنع البلبات وأجزاء مفاتيح الكهرباء و التوصيلات والمثبتات
642	91,2Cu 7,0 Al 1,8si	أجزاء مسطحة	102 75 714-) 1525	68-35 686-) (254	22-32		60	ممتازة في التشكيل على الساخن،تصنع بالطرق الساخن تستخدم في جذرع المحابس،صناديق التروس،والمسامير والصواميل، جسم المحابس ومكوناته

جدول (4-29): معدلات تآكل بعض السبائك النحاس مقارنة ببعض المواد الأخرى.

المادة	فرق الجهد		عمق التقعر في مياه البحر (um) لسنة
	في محلول مخفف من كلوريد الصوديوم	في مياه البحر المتحركة المشبعة بالهواء	
نحاس	-0,29	- 0,36	300-150
سبيكة نحاس أصفر (30/70)	-0,30	-0,33	300-150
سبيكة النحاس البحري	-0,29	-0,29	350-180
برونز فوسفوري	-0,31	-0,32	250-130
برونز ألومينيي	-0,22	-0,30	200-700
كوبر ونيكل (70-30)	-0,27	-0,25	250-25
الومنيوم	-0,88	-0,79	-
فولاذ طري	-0,70	-0,61	760-360
فولاذ مقاوم للصدأ	سالب 0,08-	-0,08	
	نشط 0,53-	-0,52	
زنك	-1,03	-1,03	1700-1500

1- المعالجة المحلولية الحرارية لسبائك برونز الألمنيوم ذات الوجهين:

نظراً لسيل الحدود بين الوجه ألفا والوجهين (ألفا + بيتا) فإن النسبة بين ألفا وبيتا عند درجات الحرارة العادية تعتمد على معدلات التبريد تبعا لمحتوى الألمنيوم وكميته في السبيكة. ولنأخذ على سبيل المثال سبيكة النحاس - (10%) ألمنيوم، وتتكون هذه السبيكة بعد الصب والتبريد البطيء في الفرن لدرجة حرارة الغرفة من الوجهين ($\alpha+\gamma_2$)، كما هو مبين في الشكل (4-77)، وعند إعادة تسخينها مرة أخرى يتحول الايوتكتيود ($\alpha+\gamma_2$) إلى المحلول الجامد بيتا عند درجة الحرارة (°C 565) (درجة حرارة الأيوتكتيود). وإذا تم التسخين لدرجة حرارة أعلى من الدرجة الحرارة (°C 565) حتى درجة الحرارة (°C 900) فإن الوجه ألفا يمتص، ولا يظهر عندئذ في كذان السبيكة، إلا المحلول الجامد بيتا. وفي حالة التبريد المفاجئ لهذه السبيكة من درجات الحرارة العالية يكون الناتج هو الوجه (β)، وهو وجه غير واضح في منحني الاتزان الحراري، نظرا لأنه وجه غير ثابت، ويشبه في ذلك المارتنزيت في الفولاذ. كما أن الوجه (β) صلد

وقصيف مثل المارتنزيت، وهما متشابهان في طبيعة التركيب البنائي الدقيق، كما هو مبين في الشكل (4-77)، ويؤدي تطبيع الوجه (β) عند درجة الحرارة (500 °C) إلى ترسيب حبيبات دقيقة من الوجهين (α) و(γ_2)، ويبين الجدولان (4-30) و (4-31) تأثير معدلات التبريد على خواص سبائك برونز الألمنيوم.

وتهدف المعالجة الحرارية إلى زيادة المقاومة والصلادة في سبائك النحاس – ألمنيوم. وتستخدم سبائك النحاس ألمنيوم المعالجة حراريا في صناعة الترومس المسننة والمراوح وأغطية الرفاصات وأجزاء المضخات وقاعدة المحامل والأدوات التي لا تولد شرراً. وعلى الرغم من أهمية المعالجة الحرارية وتحسينها للخواص، إلا أن أهم استخدامات سبائك برونز الألمنيوم تعتمد على عدة معالم أخرى تتميز بها وهي:

1. قابلية السبائك ومقدرتها على الاحتفاظ بالمقاومة عند درجات الحرارة العالية، وبالذات في حالة إضافة عناصر سبائكية أخرى إليها.
2. مقاومة عالية للأكسدة عند درجات الحرارة العالية، ويرجع السبب في ذلك إلى ارتفاع محتوى السبيكة من الألمنيوم الذي يساعد على تكوين أكسيد الألمنيوم المقاومة للأكسدة.
3. مقاومة مميزة ضد التآكل عند درجات الحرارة العادية.
4. خواص جيدة في مقاومة البلى.
5. ألوان جذابة وجميلة، وتساعد هذه الظاهرة على استخدام سبائك النحاس – ألمنيوم في أغراض الزخرفة والديكور، وتستخدم سبائك برونز الألمنيوم في كثير من التطبيقات بديلاً عن الذهب، للشبه الكبير بينهما في اللون والمظهر الخارجي.

2- تأثير العناصر السبائكية على خواص سبائك النحاس – ألمنيوم:

تضاف بعض العناصر السبائكية الأخرى مثل الحديد أو النيكل أو السيلكون أو المنجنيز إلى برونز الألمنيوم في كثير من الحالات، ويهدف ذلك إلى تحسين خواص هذه السبائك، ونستعرض في الجزء التالي التأثيرات الناتجة عن العناصر السبائكية المضافة إلى سبائك النحاس – ألمنيوم:

أ- **الحديد:** يعدل الحديد المضاف إلى سبائك النحاس – ألمنيوم قليلاً في منحنى الاتزان الحراري، كما هو موضح في القطاع الرأسي للاتزان الحراري المبين في شكل (4-78). وتختلف

ذائبية الحديد باختلاف محتوى السبيكة من الألمنيوم، كما تعتمد على درجات الحرارة العالية، و يبدأ الحديد في الترسيب من سبائك الوجه ألفا عند درجة الحرارة (1000 °C) و لكن في حالة سبائك برونز الألمنيوم المكونة من الوجه بيتا يبدأ الترسيب عند درجة حرارة أقل من (850 °C). و يؤدي ترسيب الحديد أثناء التجمد إلى صغر حبيبات التركيب البنائي في صورته المصبوبة، و زيادة على ذلك فإن الحديد المترسب في سبائك بيتا يمنع زيادة حجم الحبيبات و نموها حتى عند درجات الحرارة العالية، إضافة إلى تأخير تكسر الوجه بيتا، و نادراً ما يضاف الحديد بمفرده لأي سبيكة من سبائك الألمنيوم، و لكنه يضاف سوياً مع النيكل.

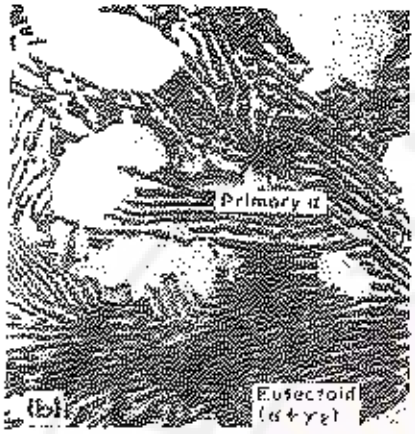
ب- **نيكل:** لا يضاف النيكل بمفرده لسبائك النحاس – ألمنيوم مثله في ذلك مثل الحديد، لكنه غالباً يضاف سوياً مع الحديد، و قطاع الاتزان الحراري لسبيكة النحاس – (50%) حديد – (5%) نيكل موضحة في الشكل (4--79)، وتؤدي إضافة الحديد والنيكل إلى ظهور وجه جديد هو (k) الذي لم يظهر من قبل، و يرتبط ظهور هذا الوجه بكل من أوجه النيكل و الألمنيوم، و كذلك وجه الحديد في النظام الثلاثي. و تزيد إضافة النيكل من مدى المحلول الجامد ألفا، كما يزيد من مقاومة سبائك النحاس – ألمنيوم دون أي تغيير في المطيلية.

ج- **منجنيز:** لا تؤثر إضافة المنجنيز تأثيراً واضحاً على بنية سبيكة النحاس – ألمنيوم الميكروسكوبية، و لكنه يكون محلولاً جامداً، نظراً لأن (1%) منجنيز (نسبة وزنية) يكافئ (2.5%) (نسبة وزنية واحدة) من الألمنيوم و يعوق المنجنيز المضاف تفاعل تحول الوجه بيتا إلى الوجهين($\alpha + \gamma_2$). و يضاف المنجنيز أحياناً بنسبة تصل إلى (14%) لتكون أساساً لمجموعة مهمة من السبائك تعرف باسم (CMA). ويحسن المنجنيز من سلامة الصب ويؤكد على خلوه من أية غازات داخلية محبوسة وذلك باتحاده مع الغازات المتصاعدة من الصب، كما أنه يزيد من مقاومة السبيكة.

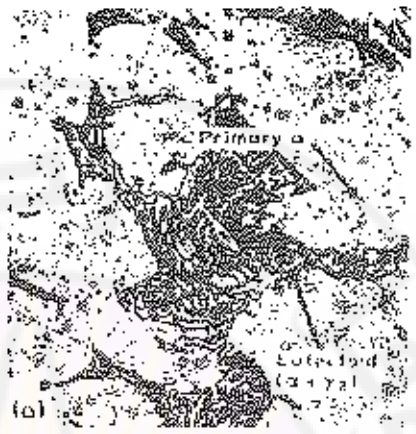
د- **رصاص:** يضاف الرصاص أحياناً إلى سبائك النحاس – ألمنيوم بنسبة تصل إلى حوالي (1%)، و ذلك لتحسين خاصية التشغيل بالمكنات.

هـ- **سليكون:** إن تأثير السليكون على النحاس مشابه لتأثير الألمنيوم مع اعتبار أن (1%) (نسبة وزنية) من السليكون تكافئ (1.5%) (نسبة وزنية) من الألمنيوم و يضاف السليكون لتحسين التشغيل بالمكنات. و تصبح خواص السبيكة المحتوية على حوالي (7%) ألمنيوم عند إضافة (2%)سليكون إليها مشابهة لخواص سبيكة محتوية على (10%) ألمنيوم. و عند إضافة (5%) حديد و (5%) نيكل إلى برونز الألمنيوم الذي يتركب من نحاس – (10%) ألمنيوم.

نحصل على سبيكة ذات مقاومة و صلابة عاليتين و مقاومة ممتازة للتآكل و الأكسدة عند درجات الحرارة العالية.



(أ)

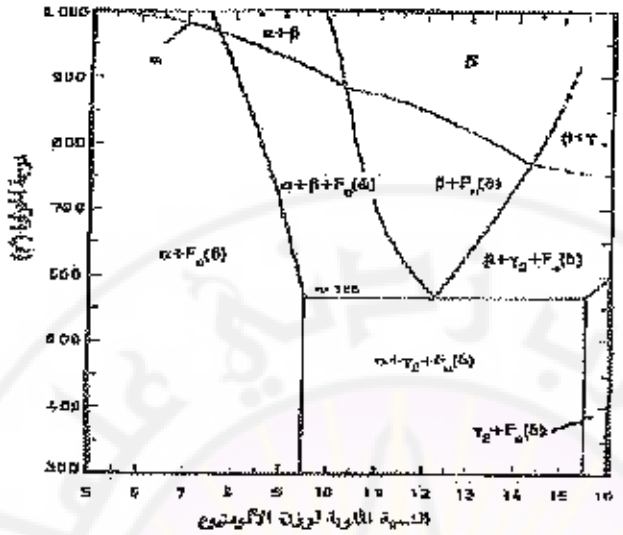


(ب)

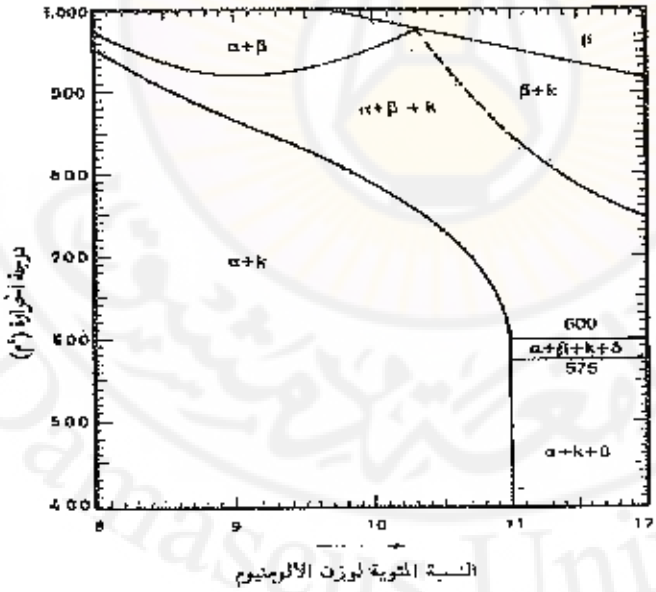


(جـ)

الشكل(4-77): التركيب الميكروسكوبي لسبيكة برونز الألمنيوم [نحاس – (10%) المنيوم]:
(أ): السبيكة بعد الصب، ويتضح فيها الوجه ألفا الأولي، والأيوتكتويد الحبيبي X750.
(ب): السبيكة بعد تبريدها في الفرن، ويتضح في هذه الحالة الوجه الأيوتكتويدي الصفائحي X500.
(ج): بعد التبريد الفجائي للسبيكة، ويظهر فيها الوجه بيتا المارتنزيتي.



الشكل(4-78): قطاع رأسي في منحني الاتزان الحراري للنحاس – المنيوم – (3%) حديد.



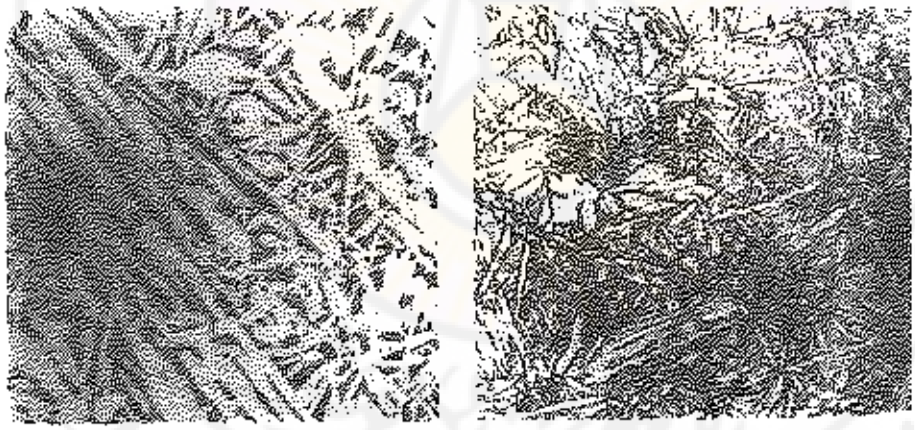
الشكل(4-79): قطاع الاتزان الحراري لسبيكة النحاس – (50%) حديد – (5%) نيكل.

3: سبائك برونز الألمنيوم المطروقة:

تقسم سبائك برونز الألمنيوم المطروقة إلى قسمين، و ذلك تبعاً لتركيبها البنائي، فالمجموعة الأولى هي التي يتكون بنائها من الوجهين $(\alpha + \gamma_2)$، و المجموعة الثانية هي المكونة من الوجه ألفا. و تفصيل ذلك فيما يلي :

آ- سبائك الوجهين$(\alpha+\gamma_2)$:

تعرف سبائك برونز الألمنيوم المطروقة بأنها سبائك الوجهين $(\alpha+\gamma_2)$ القابلة للتشكيل على الساخن، و تتراوح نسبة الألمنيوم في هذه السبائك ما بين (7%) و (10%)، بالإضافة إلى عناصر أخرى مثل الحديد و النيكل، و تتراوح نسبة الحديد ما بين (3,5%) و (5,5%). و التركيب البنائي لسبائك برونز الألمنيوم المطروقة هو خليط من الوجهين ألفا و بيتا، و تشكل هذه السبائك بالطرق و الدلفنة على الساخن عند درجات حرارة تتراوح بين (650 °C) و (1000 °C)، مع درجة من التحكم المناسب لتجنب نمو الحبيبات، و يوضح الشكل (4-80) التركيب الميكروسكوبي لسبيكة نحاس – (10%) ألمنيوم بعد معالجات حرارية مختلفة، و تستخدم هذه السبائك في الأغراض الهندسية و الكيميائية و بالذات الأجزاء المعرضة لدرجات الحرارة العالية، ولأغراض متنوعة تكون مقاومة التآكل فيها مهمة بعد طرق السبيكة.



الشكل(4-80): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة برونز الألمنيوم [نحاس - (10%) ألومنيوم]:
(أ): سبيكة تم تبريدها فجائيا بعد التلدين لمدة ساعة عند درجة الحرارة (900 °C).
(ب): سبيكة تم تبريدها فجائيا بعد تلدينها لمدة ساعة عند درجة الحرارة (900 °C)، ثم جرى بعد ذلك تزمينها لمدة ساعة عند درجة الحرارة (650 °C) ويلاحظ في كلتا الحالتين الترسيب الدقيق على المستويات البلورية.

الجدول (4-30): تأثير درجة الحرارة الفجائي

المعالجة الحرارية	الخواص الميكانيكية				رقم برنل للصلادة	النسب المئوية للاستطالة في الطول القياسي (5 سم)
	إجهاد الاستدلال 0.1 %		مقاومة الشد			
	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi		
تسخين إلى درجة الحرارة 900 مئوية ثم التبريد فجائياً	326	46.6	681	97.3	255	4
تسخين إلى درجة الحرارة 900 مئوية ثم التبريد ببطء إلى 800 درجة مئوية ثم بعد ذلك التبريد السريع.	300	42.9	600	85.7	216	9
تسخين إلى درجة الحرارة 900 مئوية ثم التبريد تدريجياً إلى درجة الحرارة 650 مئوية ثم التبريد فجائياً و بسرعة بعد ذلك.	151	21.5	431	61.8	138	17
تسخين إلى درجة الحرارة 900 مئوية ثم التبريد تدريجياً إلى درجة الحرارة 500 مئوية ثم التبريد فجائياً و بسرعة	139	19.8	300	42.9	136	5

الجدول (4-31): الخواص الميكانيكية لسبيكة بريونز الألمنيوم [نحاس – (4.9%) ألمنيوم] بعد المعالجات الحرارية –التبريد المفاجئ والتطبيع عند درجات حرارة مختلفة.

المعالجة الحرارية	الخواص الميكانيكية			
	مقاومة الشد MPa	إجهاد الخضوع Ksi	النسبة المئوية للاستطالة	رقم هيكرز للصلادة
تسخين لمدة ساعة عند درجة الحرارة 900 مئوية ثم تبريد مفاجئ سريع.	109 (765)	28.1 (198)	29	187
تسخين لمدة ساعة عند الحرارة 900 مئوية ثم تبريد مفاجئ سريع ثم تطبيع لمدة ساعة عند درجة الحرارة 400 مئوية .	107 (764)	30.7 (216)	29	185
تسخين لمدة ساعة عند درجة الحرارة 900 مئوية ثم تبريد مفاجئ سريع ثم تطبيع لمدة ساعة عند درجة الحرارة 600 مئوية .	102 (712)	34.5 (243)	34	168
تسخين لمدة ساعة عند درجة الحرارة 900 مئوية ثم تبريد مفاجئ سريع ثم تطبيع لمدة ساعة عند درجة الحرارة 650 مئوية .	93.6 (658)	32.3 (227)	48	150

2- سبائك الوجه الواحد

تتركب سبائك برونز الألمنيوم وحيدة الوجه الطروقة من الوجه ألفا، و هي مطيلة وقابلة للسحب على البارد، و تحتوي هذه السبائك على نسبة من الألمنيوم تتراوح ما بين (4%) و (7%)، و غالباً يضاف إليها النيكل بنسبة (4%) لتحسين مقاومتها للتآكل. و تستعمل السبائك المحتوية على النيكل في صناعة أنابيب المكثفات والمبادلات الحرارية، نظراً لأن هذه التطبيقات تتطلب مقاومة عالية و مقاومة للتآكل حتى درجة الحرارة (300 °C)، ويمكن لحام هذه السبائك باستخدام القوس الكهربائي في وجود الغاز الخامل، أو اللحام بالاحتكاك (friction welding). ويسهل تشغيل هذه السبائك بالمكنات وقطع سطح خارجي ناعم، ويماثل لون هذه السبائك غالباً لون الذهب، وتستخدم سبائك برونز الألمنيوم الطروقة في التغليف الصلد لسطح الفولاذ، ويمكن استخدامها في لحام السبائك الحديدية وغير الحديدية.

و يمكن التحكم في تركيب سبائك برونز الألمنيوم الطروقة ذات الوجه ألفا و تعديلها لتعطي لوناً مشابهاً لسبائك الذهب عيار (18) قيراطاً، كما يمكن دلفنة هذه السبائك إلى شرائط رقيقة تستخدم في صناعة شبيه الذهب (أو ما يعرف باسم الذهب المزيف) (false gold) لإنتاج علب السيجار و أغراض الديكور. و قد استخدم جزء من هذه السبائك في الماضي في صناعة دبلة الخطوبة رخيصة الثمن. أما في الوقت الراهن فإن الألمنيوم بعد تغطية سطحه بطبقة رقيقة من سبائك برونز الألمنيوم الطروقة بعملية الأنودة، ثم معالجته بعد ذلك فإنه يعطي شبيه الذهب بسعر أرخص من سبائك الذهب المزيف، و لهذا فقد حل ذلك محل ما كان ينتج في الماضي بأي طريق آخر.

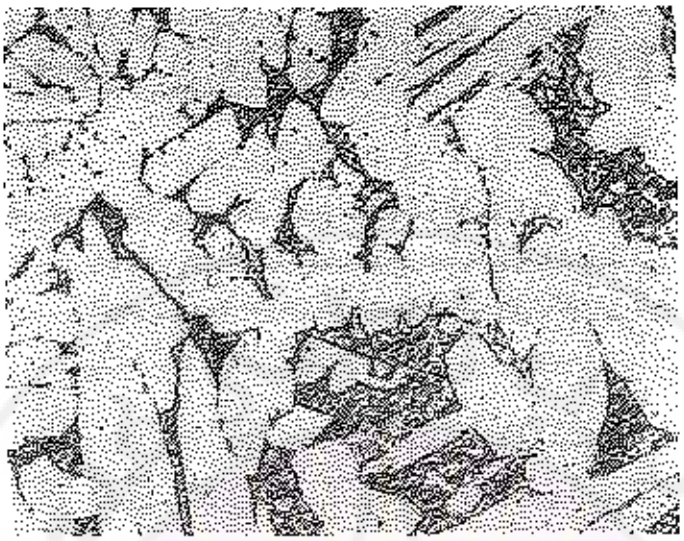
4- سبائك برونز الألمنيوم المصبوبة (Aluminum-Bronze Casting Alloys):

تحتوي سبائك برونز الألمنيوم التي تصب في الرمل أو في قوالب الصب على نسبة ألمنيوم تتراوح ما بين (9%) و (12%) و كميات مختلفة من الحديد والنيكل حتى (5%) من كل منهما والمنجنيز بنسبة (1.5%)، و في كلا النوعين من قوالب الصب يكون التركيب البنائي شائي الوجه أي خليطاً من الوجهين ($\alpha+\gamma_2$)، و يتوزع الحديد بانتظام في الوجهين. و الاختلاف الوحيد هو في حجم الحبيبات حيث تكون دقيقة في القوالب الفلزية كما هو موضح في الشكل (4-81 (أ)) و (4-81(ب)) وصبها في قوالب الرمل.

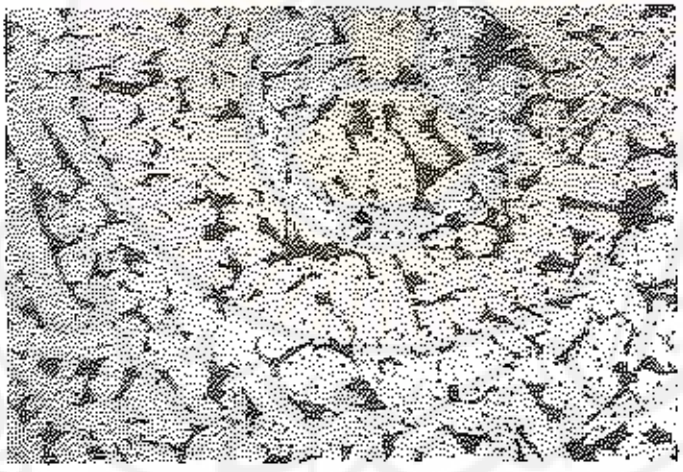
و نظراً للمدى الصغير من درجات الحرارة لتجمد هذه السبائك، فإن خواصها الميكانيكية لا تعتمد على سمك المقطع و لكنها تعتمد على طريقة السباكة، كما هو موضح في جدول (4-32). ويحتاج برونز الألمنيوم إلى خبرة طويلة في عمليات السباكة لتلافي تكون الأكاسيد كشوائب دخيلة (Inclusions) مع الاهتمام بمعدل التبريد. وأحياناً يحتاج المنتج من هذه الطريقة إلى المعالجة المحلولية الحرارية لزيادة المقاومة أو مقاومة البلي، ولكن يجب الحذر في العمليات خوفاً من حدوث التشوه نتيجة هذه المعالجة، كما أن التلدين بعد التشغيل بالماكنات أمر ضروري ومطلوب لإزالة الإجهادات الداخلية في السبائك، وبالتالي تخفيض التشوه فيها، وكذلك يلزم التلدين بعد عمليات اللحام لتجنيس (Homogenzation) الخواص عبر المنطقة المتأثرة بالحرارة.

تستخدم هذه السبائك بكثرة في التطبيقات الهندسية البحرية مثل قضبان المضخات ومثبتات الصمامات ومراوح ورقاصات السفن وأعمدة المراوح ومسامير البرشام. كما تستخدم سبائك برونز الألمنيوم المصبوبة في صناعة جذوع الصمامات وأجسام شمعات الاحتراق الداخلي وحوامل الفرشات في المولدات، وكذلك تستخدم في صناعة المحامل المستخدمة في الأعمال القاسية وعجلات التروس وفي صناعة الآلات التي لا تولد شرارات.

إن سبائك النحاس – ألمنيوم المحتوية على (12%) منجنيز قابلة للصب والسباكة كما أنها قابلة للحام، ويمكن كذلك – إلى حد ما – تشكيلها على الساخن وهذه السبائك ذات مقاومة للتآكل، كما أن مقاومتها عالية، ولهذا فإنها مناسبة للمسبوكات الكبيرة مثل المراوح البحرية ومكونات الصمامات الكبيرة والآلات التي تولد شرارات.



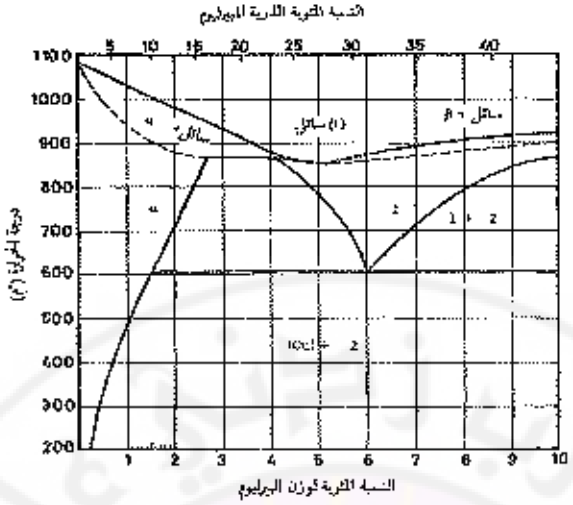
الشكل(4-81(أ)): سبيكة برونز الألمنيوم المصبوبة وتركيبها: (9.5%) ألمنيوم – (2%) حديد المصبوبة في الرمل، ويتضح من القطاع الميكروسكوبي تكوين الوجهين ($\alpha+\gamma_2$) مع جزيئات الحديد الموزعة بانتظام في الوجهين.



الشكل(4-81(ب)): سبيكة برونز الألمنيوم الموضحة في شكل (4-81(أ)) المصبوبة في قوالب ويتكون كذلك الوجهان ($\alpha+\gamma_2$) مع جزيئات الحديد الموزعة بانتظام في الوجهين، ويلاحظ هنا أن حجم الحبيبات أقل بكثير من الموضحة في شكل (4-81(أ)).

4-6-5-9: سبائك برونز البيريليوم (Beryllium bronz):

يوضح الشكل (4-82) الجزء الغني بالنحاس من منحني الاتزان الحراري لمجموعة سبائك النحاس – بيريليوم، و يتضح من الشكل أن ذائبية البيريليوم في الوجه ألفا – المحلول الجامد – تقل من (2.1%) عند درجات الحرارة (866) مئوية إلى أقل من (0.25%) عن درجة الحرارة العادية، و يدل التغير في الذائبية على إمكانية التصليد بالترسيب. و تتراوح نسبة البيريليوم في سبائك برونز البيريليوم التجارية – سبائك النحاس بيريليوم – مابين (0.6%) و (2.0 %) مع إضافة الكوبالت بنسب تتراوح ما بين (0.2 %) و (2.5%)، وتعالج هذه السبائك حرارياً، حيث تصلد بالترسيب. ويحصل على الخواص الميكانيكية المثلى لسبائك برونز البيريليوم بإضافة (2%) بيريليوم إلى النحاس ثم تعالج السبائك معالجة حرارية عند درجة الحرارة (788) مئوية، و تبرد فجائياً في الماء و تسحب بعد ذلك على البارد، ثم تُختم المعالجة بالتزمين، و تبلغ مقاومة الشد لهذه السبائك بعد المعالجة (1.461 MPa) و هذه أعلى قيمة لمقاومة الشد يمكن الحصول عليها في جميع سبائك النحاس التجارية. و يوضح الشكل (4-83) البناء الميكروسكوبي لبرونز البيريليوم المحتوي على (2%) بيريليوم بعد المعالجات الحرارية المختلفة، حيث يوضح شكل (4-83 (أ)) البنيان الميكروسكوبي للسبيكة بعد التبريد البطيء الذي يسمح بترسيب الوجه جاما – الداكن اللون – على حدود الحبيبات. و ينتج عن التبريد المفاجئ بالماء لهذه السبيكة من درجة حرارة التلدين سبيكة أحادية الوجه، و يؤدي تزمين هذه السبيكة إلى ترسيب الوجه غاما، في صورة دقيقة جداً، في كنان الوجه ألفا كما هو موضح في الشكل (4-83 (ب))، ويؤدي تزمين السبيكة أحادية الوجه الناتجة من التبريد المفاجئ بعد التلدين عند درجات الحرارة العالية – أعلى من (300) مئوية- إلى زيادة حجم الحبيبات و نموها بصورة كبيرة، و يمثل ذلك أحد أمثلة فوق التزمين (overaging)، ويوضح الشكل (4-83 (ج))-التركيب الميكروسكوبي الناتج عن فوق التزمين لهذه السبيكة. و في العادة يستمر الوجه بيتا في وجوده أثناء العمليات المتتالية، و يظهر في بعض المناطق في صورة سويمات (stringers)، كما هو واضح في الشكل (4-83 (د))، و لا يتأثر الوجه بيتا المتولد من تبريد الصبة شكل (4-83) (أ)، (ب)، (جـ)، (د) بمحلول النمش (etching solution) و يظهر أبيض في خلفية من الوجه ألفا الداكن اللون، كما هو واضح في الشكل (4-84)، و ذلك لسبيكة : نحاس – (1.87%) بيريليوم بعد المعالجة المحلولية الحرارية عند درجة الحرارة (800) مئوية ثم التبريد المفاجئ السريع.



الشكل(4-82): الجزء الغني بالنحاس من منحني الاتزان الحراري للنحاس – بريليوم.

يبين الجدول (4-32) الخواص الميكانيكية والتركيب الكيميائي واستخدامات عدد مختار من سبائك النحاس – بيريليوم، و كما سبق بيانه فإن هذه السبائك تخضع للمعالجة المحلولية الحرارية عند درجة حرارة حوالي (800) مئوية، ثم تبرد فجائياً في الماء، حيث تصلد بالترسيب في مدى من درجات الحرارة ما بين (250) و (330) درجة مئوية. وتشكيل هذه السبائك على البارد قبل التزمين يزيد كثيراً من مقاومتها، كما هو مبين في الشكل (4-85)، وربما يرجع تأثير التشكيل على البارد في زيادة المقاومة إلى زيادة كثافة السبيكة. وفي حال إجراء كل من التشكيل على البارد و التصليد بالترسيب، تصل مقاومة شد سبائك النحاس – بيريليوم إلى قيمة عالية جداً حوالي (1.379 MPa).

تمتاز سبائك برونز البيريليوم بالجمع بين العديد من الخواص المهمة، من بين الخواص المتميزة ما يلي:

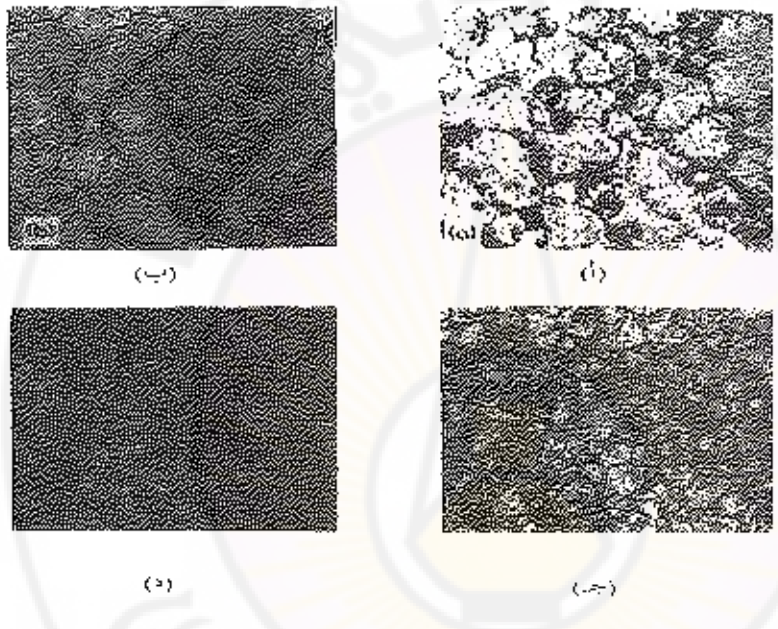
1- صلابة عالية، حيث تتمتع تلك السبائك بمقاومة عالية ضد الصدمات.
2- عدم حدوث أية شرارات كهربائية.
3- قابلية ممتازة للتشكيل بالطرق في الحالة الطرية، حيث إن معامل مرونة سبائك
4- النحاس – بيريليوم من المعاملات العالية بين سبائك النحاس الأخرى كما هو مبين في الجدول (4-33).

5- إجهاد الخضوع [إجهاد الاستدلال عند (0.2%) من مجموع الانفعال] عالي ومقاومة عالية كذلك.

6- مقاومة كلال مقبولة و مقاومة زحف جيدة.

7- مقاومة تآكل جيدة، بالإضافة إلى مقاومتها المقبولة للبلى.

8- توصيل كهربائي و حراري عاليان، كما هو موضح في الجدول (4-34) الذي يقارن بين الخواص الحرارية لمجموعات مختلفة من سبائك النحاس المطروقة.



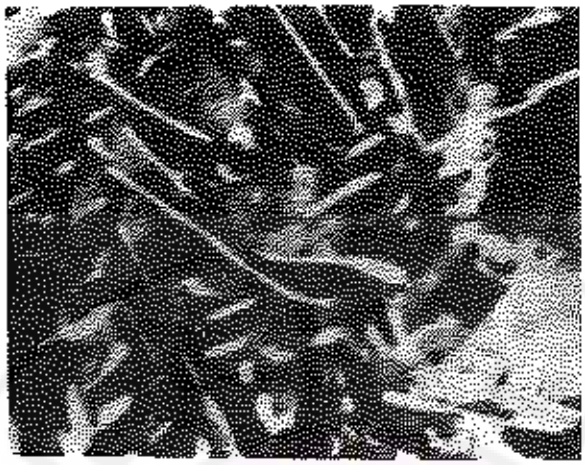
الشكل(4-83): التركيب الميكروسكوبي لسبيكة برونز البريليوم [نحاس -(2%) بريليوم] بعد التمش.

(أ): بعد التبريد البطيء ثم التزمين لمدة ثلاث ساعات عند درجة الحرارة (316 °C). ويتكون الوجه جاما (داكن اللون) فقط على حدود حبيبات الوجه ألفا.

(ب): بعد المعالجة المحلولية الحرارية والتزمين لمدة ثلاث ساعات عند درجة الحرارة (316 °C). ويظهر الوجه جاما (داكن اللون) في صورة حبيبات دقيقة في كتان الوجه ألفا.

(ج): بعد المعالجة المحلولية الحرارية ثم التزمين لمدة ساعتين عند درجة الحرارة (370 °C). وتزيد مثل تلك المعالجة من سمك حدود الحبيبات.

(د): زيادة التزمين وظهور حبيبات الوجه بيتا في صورة سُويمات.



الشكل(4-84): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة بروتز البيريليوم [نحاس – (1.87%) بيريليوم] بعد المعالجة المحلولية الحرارية عند درجة الحرارة (800) مئوية، ثم التبريد المفاجئ السريع. ويظهر في هذه الحالة الوجه بيتا الأولي(أبيض اللون) في صورة مُؤيمات.

جدول (4-32): تأثير التزمين والتركيب الكيميائي على الخواص الميكانيكية لبعض سبائك النحاس – بيريليوم.

تركيب السبيكة و ظروف المعاملة	الخواص الميكانيكية			
	مقاومة الشد		النسبة المئوية للاستطالة	رقم روكويل للصلادة
	MPa	Ksi		
1.90-2.15% Be تلدين المحلولية الحرارية بعد التزمين	420-650 1.155/1.260	60-80 165-180	35-50 5-8	45-65 (2) 36-40 (3)
1.60-1.80% Be تلدين المحلولية الحرارية بعد التزمين	420-560 1050-1155	60-80 150/165	35-50 5-8	45-65 (2) 33-37 (3)

على الرغم من الميزات الكبيرة والمتعددة لسبائك النحاس– بيريليوم، إلا أنه يعيبها كلفتها العالية، رغم أن نسبة البيريليوم فيها قليلة، إلا أن تكلفة البيريليوم عالية جداً بالإضافة إلى أنه يجب اتخاذ

احتياطات خاصة عند صب هذه السبائك، نظراً لسمية البيريليوم الشديدة. وتستخدم سبائك النحاس- البيريليوم فقط عندما تفشل سبائك النحاس الأخرى في تحقيق الغرض الهندسي المطلوب في الاستعمال، أو تستخدم عندما لا يوجد بديل عنها.

جدول (4-33): معامل المرونة لبعض مجموعات سبائك النحاس.

مجموعة السبائك	(معامل المرونة) x 10^3 [MPa]	
	في حالة الصب	السبائك الطروقة
سبائك عالية النحاس	120	120
نحاس- زنك	100-90	120-100
نحاس- قصدير	80-70	122-85
نحاس- ألومنيوم	120-100	140-114
نحاس- نيكل	150-120	155-124
نيكل الفضي	120	137-120
نحاس- سليكون	100	106
نحاس- بيريليوم	---	140-120

تستخدم سبائك برونز البيريليوم في صناعة العدد والآلات التي تتطلب صلادة عالية مع عدم حدوث شرارة، كما في الصناعات الكيميائية. وما تتمتع به سبائك النحاس- بيريليوم من مقاومة التآكل الجيدة ومقاومة الكلل بالإضافة إلى مقاومتها العالية جعل هذه السبائك مفيدة في صناعة الياتات والتروس المسننة والأغشية الرقيقة والمحابس، كما تستخدم في التلامس الكهربائية – جسور التوصيل – وقوالب صنع البلاستيك وأدوات الجراحة.

4-6-5-10: سبائك النحاس- نيكل:

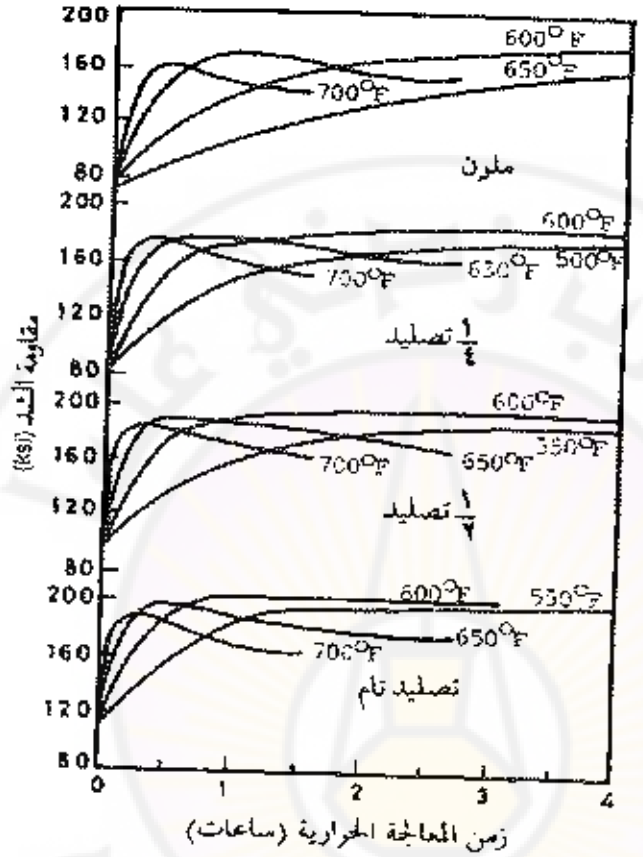
يضاف النيكل إلى النحاس بنسب مختلفة هي(10%) و (20%) و (30%)، ليكون الفلزان معاً سلسلة من سبائك المحلول الجامد،وتعرف هذه السبائك باسم الكوبرونيكل، وأهم هذه السبائك هي التي تحتوي على (30%) نيكل. ويوضح جدول (4-34) التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية واستخدامات بعض هذه السبائك.

يتضح من منحني الاتزان الحراري الثنائي بين النحاس والنيكل المبين في شكل (4-86) أن الفلزين يذوبان في بعضهما ذوباناً كاملاً بجميع النسب في الحالة الجامدة، ولهذا فإن جميع سبائك النحاس- نيكل هي سبائك وحيدة الوجه،ولا تقبل المعالجة الحرارية، ويمكن فقط تغيير خواصها أو التحكم فيها بالتشكيل على البارد، أي التصليد بالانفعال. وانطلاقاً من تركيب سبيكة النحاس- (30%) نيكل المكونة من وجه واحد فإن لها الميزات التالية:

جدول (4-34): الخواص الحرارية لعدد من سبائك النحاس المطروقة.

مجموعة السبائك	معامل التوصيل الحراري (w/mK)	معامل التمدد الحراري x 10^{-6} مابين (20 – 100) درجة مئوية	الحرارة النوعية J/KgK
سبائك عالية النحاس:			
Cu-Ag	390	16.8	393
(cH08)Cu-Cd	334	17	370
مجموعة سبائك النحاس الأصفر (czH01-H10)	100-230	20-17	370
(PBH01-H04) برونز وسفوري	45-145	17	370
(CAH01-H05) برونز ألومينيي	37-83	17-15	410
(CNH01-H07) كوبر ونيكل	27-62	17-15	370
(NSH03-H07) نيكل فضي	25-46	16-15	410-370
(CSH01) كوبر وسليكون	35	17	370
(CBH01) نحاس-بيريليوم	145-83	17	410

1. مقاومة جيدة للتآكل والأكسدة، إضافة إلى مقاومتها للتآكل والنخر حتى تأثير مياه البحر الجارية بسرعات عالية، كما هو موضح في جدول (4-35) الذي يقارن مقاومة التآكل في مياه البحر المتحركة بسرعة متر واحد في الثانية بين النحاس وسبيكتين من سبائك الكوبرونيكل.
2. جميع سبائك النحاس- نيكل مطلية، نظراً لأنها تتكون من وجه واحد، هو المحلول الجامد من العنصرين، ولهذا فهي تناسب جميع طرق التصنيع المختلفة، ويمكن تشكيلها على البارد والساخن بالدلفنة أو الطرق أو الكبس أو الضغط أو السحب والغزل.

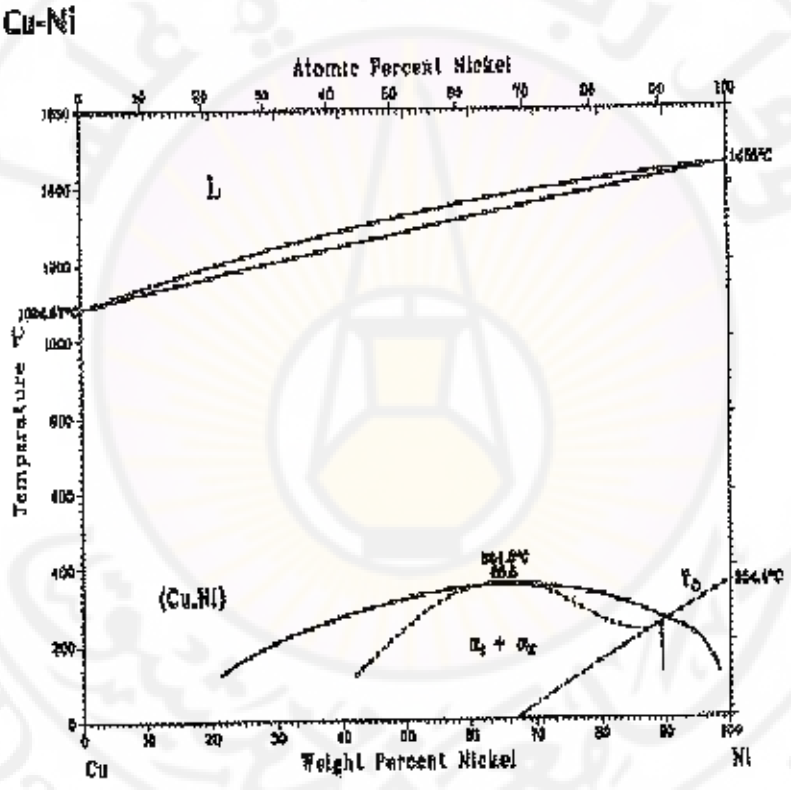


شكل(4-85): منحنيات التزمين لسبيكة النحاس – (2%) بيريليوم- (0,2%) كوبالت عند درجات حرارة مختلفة بعد تخفيض في المساحة السطحية قدره صفر، (11)،(21)،(27).

3. عدم وجود الوجه الثاني يلغي أي احتمال للتآكل الكهروكيميائي في وجود أي وسط إلكتروليتي، ولا تتآكل هذه السبائك انتقائياً، كما في سبائك النحاس– زنك.
4. تصلد سبائك النحاس – نيكل فقط بالتشكيل على البارد (تصلد الانفعال)، كما هو مبين في جدول (4–37)، كما أن تصليدها بالتشكيل محدود، حيث لا يمكن تصليدها بقدر كبير،

ولهذا يمكن استخدامها في أنابيب وألواح المكثفة والمبادلات الحرارية والعديد من أجهزة المعاملات الكيميائية.

5. لا يترسب في أي حال من الأحوال الوجه الثانوي القصيف، كما يحدث في سبائك النحاس الأخرى، وعند التلدين فإن سبائك النحاس- نيكل تتكون من المحلول الجامد المنتظم. ويوضح شكل (4-87) التركيب البنائي الدقيق لسبيكة الكوبرونيكل المحتوية على (30%) نيكل بعد إعادة بلورتها، ويتضح الكتان هو فقط عبارة عن المحلول الجامد ألفا.



الشكل(4-86): منحني الاتزان الحراري الثنائي بين النحاس والنيكل.

جدول (4-35). التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكة وأهم تطبيقات سبائك النحاس- نيكل.

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي (%)	الصورة المتوافر فيها	الخواص الميكانيكية			مقاومة التآكل(2)	قابلية التشغيل بالماكينات(3)	ظروف التشكيل واهم الاستخدامات
			إجهاد الشد Ksi(MPa)	إجهاد الخضوع Ksi(MPa)	النسبة المئوية للاستطالة (1)			
717	cu67.8 Fe0.7 0.5Be 31.0Ni	ألواح، وقضبان وأسلاك	200-70 (1,400-490)	180-30 (1,260-210)	4-40	جيدة إلى ممتازة	20	جيدة التشكيل على البارد و الساخن تستخدم في التطبيقات التي تحتاج لمقاومة شد عالية للتآكل، و غلاف المعماع المائي، وأسلاك مرسى السفن، و الحواجز المصنوعة في صور حلقات، ومسامير ودبابيس في كابلات التلفونات
725	88.2Cu 9.5Ni 2.3Su	ألواح،و قضبان وأسلاك، و أنابيب	120-55 (840-385)	108-22 (756-154)	1-35	ممتازة	20	ممتازة التشكيل على البارد و الساخن، تصنع بطرق عديدة من اللحام والسحب و الكمش والثني، و غيرها من الطرق المختلفة. تستخدم في صناعة التوصلات،وبايلات،المفاتيح وسبائك اللحام

(1) طول قياسي قطره (5) سم.
(2) قدرت في ظروف ماء البحر
(3) مقدرة بالنسبة لسبيكة (360) التي تعد

يتبع جدول (4-35). التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية وأهم تطبيقات سبائك النحاس- نيكل.

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي (%)	الصورة المتوافر فيها	الخواص الميكانيكية			مقاومة التآكل (2)	قابلية التشغيل بالمكائن (3)	ظروف التشكيل واهم الاستخدامات
			إجهاد الشد Ksi(MPa)	إجهاد الخضوع Ksi(MPa)	النسبة المئوية للاستطالة (1)			
706 ـ نحاس 10% نيكل	cu88.7 1.3Fe 10.0Ni	أنابيب و ألواح	66-44 (420-308)	57-16 (399-112)	42-10	ممتازة	20	يمكن تشكيلها على الساخن و على البارد و تصنيع بالتشكيل الساخن و الثني و اللحام تستخدم في الصناعة أنابيب المكثفات و أنابيب المقطرات و المبخرات و أنابيب المبادلات الحرارية وفي أجهزة تحليه المياه المالحة
710 ـ نحاس 20% نيكل	79.0Cu 21.0Ni	أنابيب، ألواح، وأسلاك	95-49 (655-643)	84-13 (588-91)	3-40	ممتازة	20	جيدة التشكيل على البارد و الساخن تصنع في صورة ألواح وهي قابلة للحام و الثني تستخدم في وصلات الاتصالات وألواح المكثفات،وياينات كهربائية، ،أنابيب المبخرات والمبادلات الحرارية
715 ـ نحاس 30%	70.0Cu 30.0Ni	ألواح،قضبان وأنابيب	75-54 (525-578)	70-20 (490-140)	15-45	ممتازة	20	كما في السبيكة706

جدول (4-36): مقارنة بين مقاومة النحاس وبعض النحاس وبعض سبائكه المتآكل في مياه البحر المتحركة بسرعة (متر/ثانية).

معدن التآكل	المادة		
	Cu	90%cu-10%Ni	70%Cu-30%Ni
معدل التآكل السنوي (μm/year)	100-10	10-2.5	10-2.5
عمق النقعر السنوي (μm/year)	300-150	130-25	130-25



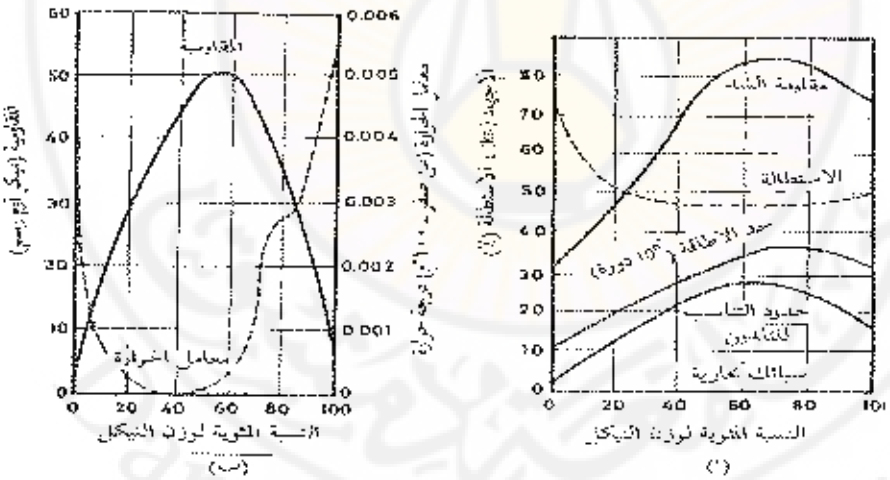
الشكل (4-87): التركيب البنائي الميكروسكوبي لسبائك الكوبرونيكل: نحاس- (30%) نيكل. ويتضح من الصورة أن التركيب البنائي في هذه الحالة هو الوجه ألفا المعاد بلورته مع وضوح كثير من الحزم التوأمية بداخل الحبيبات.

جدول (4-37). الخواص الميكانيكية لسبائك النحاس- نيكل المصلدة بالتشكيل.

التركيب الكيميائي(%)		الخواص الميكانيكية					
		ملدن		نصف تصليد		تصليد تام	
Cu	Ni	رقم فيكز للصلادة	مقاومة الشد MPa	رقم فيكز للصلادة	مقاومة الشد MPa	رقم فيكز للصلادة	مقاومة الشد MPa
90	10	77	320	137	410	150	480
70	30	93	370	154	480	174	560

يبين الجدول(4-38) الخواص الميكانيكية لسبائك النحاس- نيكل، ولما كان كل من النيكل والنحاس ذوي بناء بلوري مكعب متمركز الوجه، فإن جميع سبائك النحاس- نيكل مطلية لجميع تركيباتها. ويوضح شكل (4-88(أ)) تأثير إضافة النيكل على مقاومة النحاس للشد، ويظهر من الشكل أن إضافة النيكل تزيد مقاومة الشد مع احتفاظ السبيكة بقدر عال من المطيلية. وتزيد إضافة النيكل من مقاومة النحاس للتوصيل الكهربائي، كما هو موضح في شكل (4-88 (ب)). وسبيكة النحاس-(45%) نيكل ذات مقاومة عالية جداً للتوصيل الكهربائي، ولكن معامل المقاومة الحراري لها منخفضة جداً بمعنى أن معدل تغير المقاومة الكهربائية مع درجة الحرارة صغير جداً، ولهذا تستخدم هذه السبيكة في صناعة أسلاك المقاومة في الأجهزة الكهربائية.

تستخدم سبائك الكوبرونيكل في صناعة المكثفات البحرية وأنابيب المياه وأنابيب معالجة ماء البحر في محطات التحلية، نظراً لمقاومتها المتوسطة – وهي كافية لهذا الاستخدام – إضافة لمقاومتها للتآكل والتخر بتأثير حركة مياه البحر، كما تستخدم في صناعة أنابيب وألواح المكثفات والمبادلات الحرارية والعديد من أجهزة العمليات الكيميائية.



الشكل(4-88): تأثير النيكل على:
(أ): الخواص الميكانيكية لسبائك النحاس – نيكل.
(ب): الخواص الكهربائية والحرارية لسبائك النحاس- نيكل.

جدول (4-38): الخواص الميكانيكية لسبائك النحاس – نيكل الطروقة الملدنة.

التركيب الكيميائي (%)		الخواص الميكانيكية		
Cu	Ni	مقاومة الشد MPa	النسبة المئوية للاستطالة	رقم فيكرز للصلادة
95	5	275	45	75
90	10	320	50	80
80	20	340	65	90
70	30	370	50	95

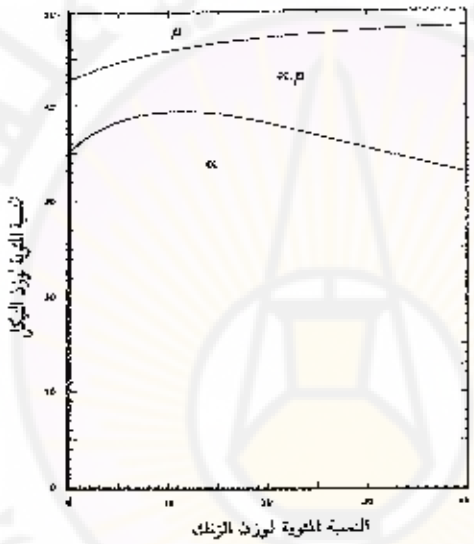
4-6-5-11: سبائك النحاس – نيكل – زنك:

تعرف هذه السبائك باسم النيكل الفضي أو الفضة الألمانية، وهي عبارة عن سبيكة ثلاثية من النحاس والنيكل والزنك ولا تحتوي على أي كمية من عناصر الفضة. واسم (النيكل الفضي) الخاطئ الذي أطلق على هذه السبائك، يأتي من اللون الفضي الذي تتمتع به هذه السبائك، وليس لاحتوائها على عنصر الفضة. وتتكون سبيكة النيكل الفضي التجارية على التالي: نسبة النحاس من (50%) إلى (70%)، وتتراوح نسبة النيكل بين (5%) و(30%)،أما نسبة الزنك فتتراوح ما بين (5%) و (40%). ويختلف لون سبائك النيكل الفضي بزيادة نسبة النيكل، وتتراوح الألوان من اللون العاجي الخفيف إلى اللون الأبيض الفضي.

وتعد سبائك النيكل الفضي أقرب ما يكون لسبائك النحاس الأصفر، حيث حل النيكل محل النحاس– نظراً لأن (10%) نسبة وزنية من النيكل تكافئ (12%) نسباً وزنية من النحاس– ليكون المحلول الجامد ألفا، والقطاع الأفقي عند درجة الحرارة (650) مئوية للنظام الثلاثي من النحاس – نيكل – زنك موضح في شكل (4-89) ومنه يظهر تأثير النيكل على الأوجه المتكونة. وجميع سبائك النحاس – نيكل – زنك هي من نوع المحلول الجامد، كما تمثل سبائك النيكل الفضي في الخواص الميكانيكية سبائك النحاس الأصفر المماثل في التركيب. ويوضح شكل (4-90) البنيان الميكروسكوبي لسبيكة النحاس –(10%) نيكل – (25%) زنك بعد إعادة بلورتها، وكما هو واضح في الشكل، فإنها تتكون من المحلول الجامد ألفا، وهذا البنيان مشابهة تماماً لبنيان نحاس الطلقات الأصفر (نحاس – 30% زنك) مع وجود العديد من التوائمية البلورية الداخلية.

تتمتع سبائك النيكل الفضي بالعديد من الخواص المغرية و المميزة التي تجعلها جذابة في التطبيقات الهندسية، وأهم تلك الخواص أو المميزات ما يلي:

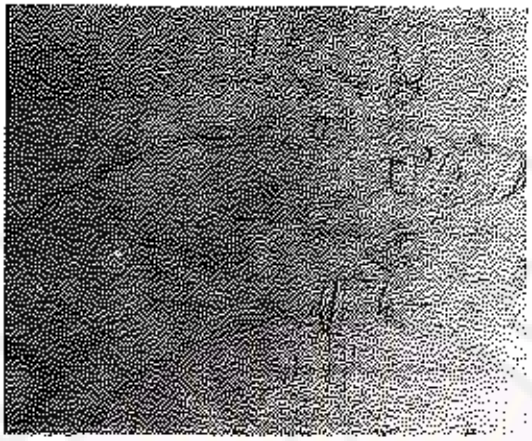
1. مقاومة التآكل، حيث تحتفظ ببريقها ولمعانها تحت الظروف المختلفة.
2. مقاومة جيدة لإجهاد التحات وخاصة السبائك المحتوية على نسب قليلة من الزنك.
3. مقاومة جيدة وفي الوقت نفسه مطيلية عالية.
4. قابلية جيدة للتشكيل على البارد.
5. تتصلد بالتشكيل.
6. ليست لها خواص مغناطيسية.



الشكل (4-89): قطاع أفقي في منحني الاتزان الحراري للنظام الثلاثي: نحاس – زنك – نيكل عند درجة الحرارة (650) مئوية.

يوضح الجدول (4–39) الخواص الميكانيكية والتركيب الكيميائي والاستخدامات لعدد مختار من سبائك النيكل الفضي. والسبيكة ذات الوجه الواحد ذات مقاومة متوسطة إلى عالية وقابلية جيدة للتشكيل على البارد، ولكنها فقط مقبولة في التشكيل على الساخن، وفي بعض الأحيان يضاف الرصاص لهذه السبائك بنسبة تصل إلى (2%) لتحسين التشغيل بالمكنات، ولكن إضافة الرصاص تقلل من مطيلية هذه السبائك. وتتمتع سبائك النيكل الفضي بمقاومة تآكل ممتازة نظراً لوجود النيكل الذي يحسن من مقاومة التآكل، كما هو مبين في جدول (4–39)، ولكن

السبائك المحتوية على نسبة مرتفعة من الزنك تصبح عرضة لظاهرة انتزاع الزنك انتقائياً تحت تأثير بعض الظروف، وإذا تعرضت سبائك النيكل الفضي لأية إجهادات عالية أثناء التصنيع في بد من إزالة هذه الإجهادات بالتلدين لمنع التشققات الناتجة من التآكل الإجهادي.



الشكل (4-9): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة النيكل الفضي وتركيبها نحاس (10%) نيكل – (25%) زنك بعد الدافئة على البارد والتلدين في مدى من درجات الحرارة بين (650) و (700) مئوية. ويتكون التركيب البنائي الميكروسكوبي في هذه الحالة من الحبيبات المعاد بلورتها ذات الاتجاه المحوري الواحد. وتركيب السبيكة من الوجه ألفا، ويلاحظ ظهور الحزم التوأمية بداخل الحبيبات.

يوجد نوعان من سبائك النيكل الفضي تبعاً للأوجه المكونة للسبيكة، وهما: سبائك وحيدة الوجه، وسبائك ثنائية الوجه، وتفصيل ذلك على النحو التالي:

أ- سبائك النيكل الفضي وحيدة الوجه: هذه السبائك ذات لون أبيض فضي، كما يظهر فيها اللون المصقول العميق، وهذه الألوان المتميزة تجعل هذه السبائك مغرية في أعمال الديكور والزخرفة، كما أن هذه السبائك مغرية ومناسبة جداً لصناعة الملاعق والشوك والسكاكين وغيرها من أدوات المائدة. ونظراً لأن هذه السبيكة ذات مطيلية عالية فيمكن تشكيلها على البارد للتطبيقات المذكورة، وتختم منتجات هذه السبائك بالحروف (E.P.N.S)، وهي الحروف الأربعة الأولى من (Electro-Planet Nickel Silver) (النيكل الفضي المقطى كهربائياً) والهدف من وضع هذه الحروف

الأربعة هو منع غشها مع الفضة. وفي السنوات الأخيرة وبعد أن غزا الفولاذ المقاوم للأسواق وزادت استخداماته وانخفض سعره مقارنة بأية سبائك أخرى، لذا فإنه حل محل النيكل الفضي في صناعة أدوات المائدة. وبوجه عام تستخدم سبائك النيكل الفضي في صناعة الأجهزة الصغيرة في معدات التليفون، كما أن إضافة الرصاص إلى هذه السبائك يسهل الحفر عليها، ولهذا تصنع من سبائك النيكل الفضي الرصاصي المفاتيح الشهيرة والمعروفة في كل مكان باسم مفاتيح (يل).

2- سبائك النيكل الفضي ثنائية الوجه: تحتوي سبائك النيكل الفضي ثنائية الوجه على نسبة من النحاس تتراوح ما بين (43%) و (47%) ونيكل بنسبة (10%)، ويضاف إليها أيضا (2.5%) رصاص، والوجهان اللذان تتكون منهما الشبيكة هما ألفا وبيتا. وهذه السبائك ذات معامل مرونة عالي، مثلها في ذلك مثل سبائك النحاس الأصفر ألفا وبيتا، لذا يمكن تشكيلها على الساخن بسهولة، كما تستخدم بكثرة في صناعة الياقات وأجهزة التلامس في التليفونات وأسلاك المقاومة الحرارية وبالأدوات الفلزية على اختلاف أنواعها وأدوات ومعدات الجراحة للجراحين وأطباء الأسنان.

4-6-5-12: سبائك النحاس – كروم:

يبين شكل (5.22) الجزء الغني بالنحاس في منحني التزان الحراري للنحاس– كروم، فتظهر في المنحني نقطة الأيوتكتيك عند درجة الحرارة (1.070) مئوية وحوالي (1.5%) كروم، وذائبية الكروم في النحاس الجامد قليلية وتقل أكثر بانخفاض درجة الحرارة، فهي حوالي (0.65%) عند درجة حرارة الأيوتكتيك، وتصل إلى(0.15%) عند درجة الحرارة (800) مئوية لتصل إلى أقل من (0.01%) عند درجة الحرارة العادية، ولذلك فإن سبائك النحاس كروم قابلة للمعالجة الحرارية والتصليد بالترسيب.

جدول (4-39): التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية وبعض استخدامات عدد من سبائك النيكل

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي (%)	الخواص الميكانيكية: مقاومة الشد Ksi(MPa)	الخواص الميكانيكية: إجهاد الخضوع Ksi(MPa)	الخواص الميكانيكية: الاستطالة (1) %	مقاومة التآكل (2)	قابلية التشغيل بالماكينات (3)	ظروف التشكيل وأهم الاستخدامات
745 نيكل فضي 65-10	65.0Cu 25.0Zn 10.0Ni	130-49 (410-343)	76-18 (532-126)	15-50	ممتازة	20	قابلية ممتازة للتشكيل على البارد،تصنع بالأغلاف، والسحب،والثني،و الدلفنة، والقطع، والعزل،تستخدم في المسامير البراشيم، و المسامير المقلوظة، و الأجزاء الصوانية، و الأسلاك المفرشة، وألواح الأسماء، واللافتات
752 نيكل فضي 65-18	65.0Cu 17.0Zn 18.0Ni	103-56 (721-392)	90-25 (360-175)	3-54	ممتازة	30	تشبه طرق تشكيل سبيكة745، تستخدم في صناعة مسامير البراشيم، و المسامير المقلوظة و أجزاء المناضد،و أسلاك الجماتون،والسنت،ومقدمة الطائرات، والنظارات، وأجزاء الكاميرات، و الأقواس، وأساس للتغطية بالفضة، و المجوهرات، و ألواح الأسماء، وأجزاء الراديو
752 نيكل فضي 65-15	65.0Cu 20.0Zn 15.0Ni	90-25 (630-175)	79-18 (553-126)	2-43	ممتازة	60	تشبه طرق تشكيل سبيكة 745. تستخدم في أجزاء الكاميرات، و الأجزاء الصوانية، و ألواح الأسماء.

1. الطول القياس عينات سم.
2. مقارنة بسبيكة (300).

تابع جدول (4-39).

رقم السبيكة واسمها	التركيب الكيميائي (%)	الخواص الميكانيكية			مقاومة التآكل (2)	قابلية التشغيل بالماكينات (3)	ظروف التشكيل واهم الاستخدامات
		مقاومة الشد Ksi(MPa)	إجهاد الخضوع Ksi(MPa)	الاستطالة (1) %			
757 نيكل فضي 65-12	65.0Cu 23.0Zn 12.0Ni	93-52 (651-364)	79-18 (553-126)	48-2	ممتازة	20	تشبه طرق تشكيل سبيكة745 و استخدامها مشابه لسبيكة 754
770 نيكل فضي 55-18	55.0Cu 27.0Zn 18.0Ni	145-60 (1015-420)	90-27 (630-189)	40-2	ممتازة	30	جيدة في التشكيل على البارد،تصنيع بالأغلاف، و التشكيل،و الثني،والقطع تستخدم في الأجزاء الصوئية الجيدة
782 نيكل فضي 65-8-2	65.0Cu 2.0Pb 25.0Zn 8.0Ni	91-53 (637-371)	76-23 (532-161)	40-3	ممتازة	60	جيدة التشكيل على البارد،تصنع بالأغلاف و الثقب،تستخدم في المفاتيح، و أجزاء الساعات

وتحتوي سبائك النحاس – كروم التجارية على (1%) كروم، وتتم معالجة هذه السبيكة حرارياً عند درجة الحرارة (1020) مئوية، ثم تبرد فجائياً من هذه الدرجة، ويؤدي ذلك لزيادة مقاومة السبيكة. ويصل معامل التوصيل الكهربائي لسبيكة النحاس – (1%) كروم بعد هذه المعاملة إلى حوالي (45%) من معامل التوصيل الكهربائي القياسي للنحاس، ثم تصلد السبيكة بعد ذلك بالترسيب عند درجة الحرارة (450) مئوية. وتزيد مقاومة الشد لسبيكة النحاس – (1%) كروم من خلال المعالجة الكاملة، كما ترتفع درجة التوصيل الكهربائي إلى (80%) من التوصيل الكهربائي القياسي للنحاس، وأيضاً تزيد مقاومة الشد نتيجة المعالجة الحرارية لتصل إلى (MPa 450). ويمكن استخدام هذه السبائك في صورة مصبوبة أو مطروقة، وتستخدم سبيكة النحاس– (1%) كروم في صناعة مفاتيح التحويل الكهربائي، كما تعمل كإلكترود في لحام الضغط (سواء نقطة– أو خط).

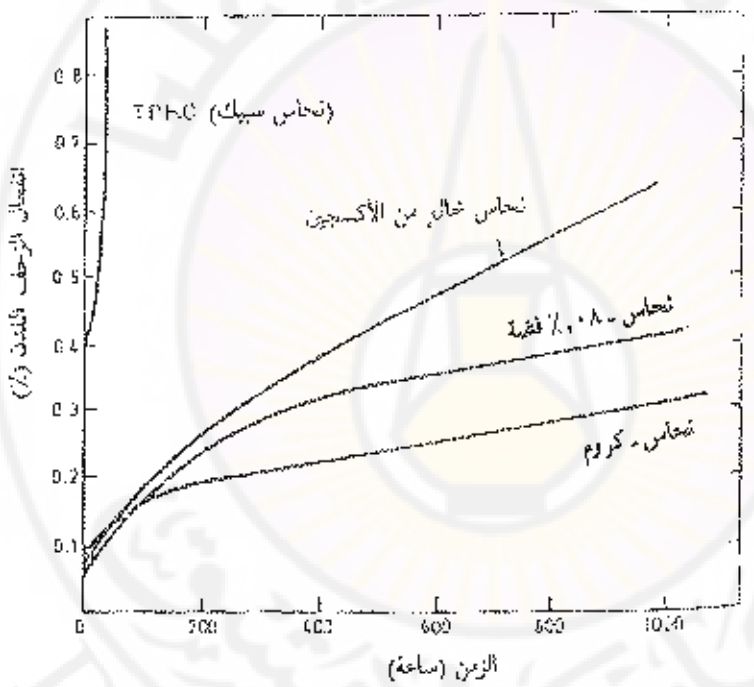
4-6-5-13: سبائك النحاس – زركونيوم:

يبين شكل (4-34) الجزء الغني بالنحاس في منحني الاتزان الحراري لمجموعة النحاس – زركونيوم، ويتضح من الشكل أن ذائبية الزركونيوم في النحاس تنخفض من (0.15%) عند درجة الحرارة (965) مئوية إلى (0.08 %) عند درجة الحرارة (900) مئوية وإلى أقل من (0.01%) عند درجة الحرارة العادية، ولهذا فإن مجموعة سبائك النحاس – زركونيوم قابلة للمعالجة الحرارية.

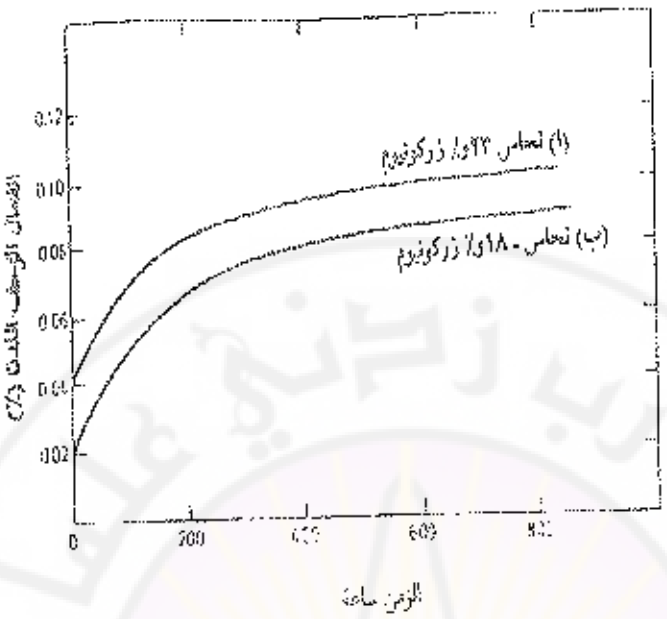
وتتم معالجة المحلولية الحرارية لهذه السبائك عند درجات حرارة بين (850) و (900) مئوية، ثم تبرد فجائياً إلى درجة الحرارة العادية لتعطي محلولاً جامداً فوق المشبع، ثم يتبع ذلك معالجتها بالترسيب في مدى من درجات الحرارة بين (375) و (450) مئوية حيث يترسب المركب الفازي ($ZrCu_2$) الذي يكون متماسكاً ومتلاحماً مع كتان السبيكة. وقد تحتاج هذه السبيكة للتشكيل على البارد بعد المعالجة الحرارية المذكورة. والخواص الميكانيكية لسبائك النحاس – زركونيوم مشابهة لخواص سبائك النحاس – كروم، وربما تتفوق عليها، كما أن معامل التوصيل الكهربائي أنها يزيد على (90%) من معامل التوصيل الكهربائي القياسي للنحاس.

إن مقاومة سبائك النحاس الثلاثية المحتوى على الكروم و الزركونيوم (نحاس – 0.7% كروم– 0.1% زركونيوم) أفضل قليلاً من مقاومة السبائك الثنائية سواء كانت من النحاس – كروم أو

النحاس – زركونيوم بعد المعالجة الحرارية. وعلى الرغم من أن اختبارات الزحف قد أظهرت أن سبائك النحاس ليست مناسبة للعمل تحت تأثير الإجهادات لفترة طويلة عند درجات حرارة أعلى من(120) مئوية، إلا أن سبائك النحاس المحتوية على الكروم أو الزركونيوم هي أفضل من جميع سبائك النحاس الأخرى في مقاومة الزحف، كما هو موضح في شكلي (4–91) و (4–92). ويقدم الجدول (4–27) بعض البيانات عن مقاومة هذه السبائك للزحف، واستخدم سبيكة النحاس – (0.7%) كروم- (0.1) زركونيوم كعاكس للتيار، نظرا لجودتها في التوصيل الحراري والكهربائي، كما يصنع منها فوهة الصواريخ، وتستخدم كذلك في صناعة الكترودات اللحام.



الشكل (4–91): مقارنة بين مقاومة سبيكة النحاس- كروم [نسبة تشكيل على البارد (33%)] للزحف مع النحاس عالي التوصيل [(0.8%) فضة ونسبة تشكيل (25%) على البارد] ونحاس سبيك، ونحاس خالي من الأوكسجين.



شكل (4-92): مقاومة الزحف لسبائك النحاس- زركونيوم عند درجة الحرارة (230) مئوية ومقاومة شد (308) ميجابسكال.

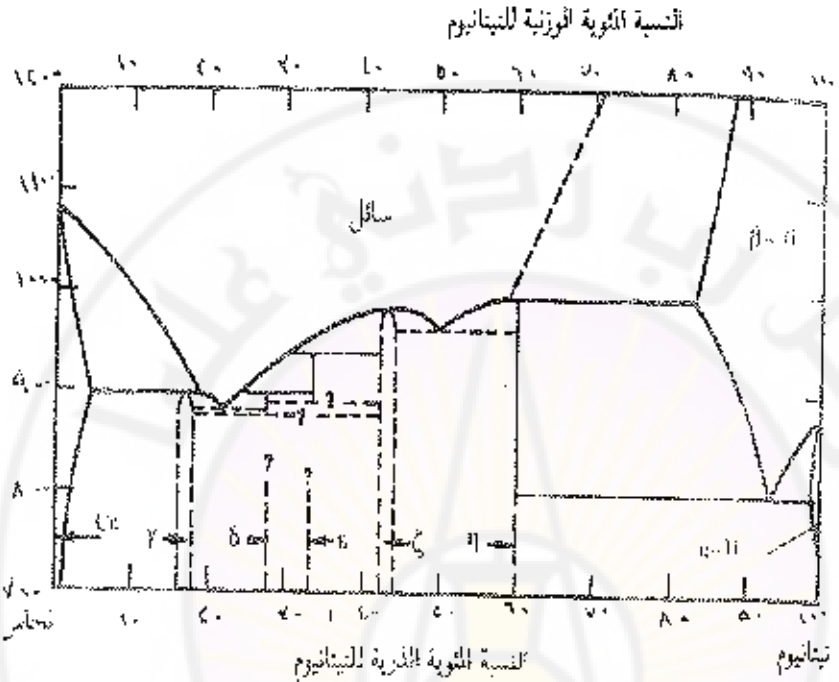
(أ) : صهر في الهواء وصب

(ب) : صهر في الفراغ وصب

4-6-5-14: سبائك النحاس – تيتانيوم:

يبين شكل (4-93) منحني الاتزان الحراري للنحاس– تيتانيوم، ويتضح من الشكل أن ذائبية التيتانيوم في النحاس تقل مع انخفاض درجة الحرارة. وتستعمل في الوقت الحالي استعمالاً تجارياً سبائك النحاس المحتوى على نسب من التيتانيوم تتراوح ما بين (2.5%) و(4%). وتتم معالجة هذه السبائك حرارياً لزيادة مقاومتها انطلاقاً من انخفاض ذائبية التيتانيوم في النحاس بانخفاض درجة الحرارة، وعلى سبيل المثال تجري على سبيكة النحاس – (4%) تيتانيوم المعالجة المحلولية الحرارية عند درجات حرارة تتراوح بين (850) و(900) مئوية، لمدة ساعة واحدة ثم تبرد فجائياً، ثم تشكل عندئذ على البارد لتخفيض السمك بنسبة (4%)، ثم تصلد بعد ذلك بالترسيب في مدى من درجات الحرارة يتراوح بين (400) و(525) مئوية، لتصل مقاومتها للشد إلى (1,076 MPa)، وهي مقومة عالية. وتستخدم سبائك النحاس– تيتانيوم في الأغراض

نفسها التي يستخدمها فيها برونز البيريليوم، أي في وحدات وفتحات و بايات التلامس الكهربائي والأدوات التي لا تحدث شرارة.



شكل (4-93): منحني الاتزان الحراري النحاس- تيتانيوم.

4-6-5-14: سبائك النحاس- منجنيز:

يبين شكل (4-37) منحني الاتزان الحراري للنحاس- منجنيز وهو شكل معقد نظراً لوجود كثير من التغيرات التأصلية. ولقد طورت في عام (1960 م) سبيكة ثنائية من النحاس والمنجنيز، وتحتوي على (50%) من كلا العنصرين، وسبيكة النحاس (30%) منجنيز ذات صفة ومقاومة عالية، مما يجعلها مناسبة لامتصاص الاهتزازات وتخفيض الضوضاء، وتوجد في الوقت الحالي سبيكة ثلاثية تحتوي على(12%) منجنيز و (40%) نيكل تعرف باسم سلك مقاومة منجنين، كما توجد سبيكة ثالثة من سبائك النحاس- منجنيز ذات مقاومة عالية، وهي تحتوي على (10%) منجنيز إضافة إلى (2%) ألمنيوم، والمعامل الحراري لهذه السبيكة هو صفر عند درجة

الحرارة (350) مئوية. وإضافة إلى ذلك فهنالك سلسة أخرى من سبائك النحاس – منجنيز – نيكل الثلاثية تحتوي على مقادير متساوية من النيكل و المنجنيز بدءاً بحوالي (7%)، ويمكن زيادة مقاومة هذه السبائك بالمعالجة المحلولية الحرارية ليصل رقم فيكرز لصلادتها إلى حوالي (500)، كما أنها تقاوم التآكل عند درجات الحرارة العالية.

4-7: الكوبلت وسبائكه:

4-7-1: تمهيد:

لم يكن الكوبلت حتى وقت قريب من العناصر الصناعية المهمة، سواء من ناحية الكمية المستخدمة منه في الأغراض والتطبيقات الصناعية أو الهندسية المختلفة مقدرة بالطن، أو من ناحية قيمته وخواصه التي يتمتع بها، ولكن الصورة تغيرت كثيراً الآن، فقد أصبح الكوبلت يحتل مرتبة إستراتيجية مهمة بين الفلزات الأخرى، ويفوق الكثير منها في الأهمية نظراً للتطبيقات المهمة والحيوية التي يستخدم فيها، وذلك من خلال الحقبتين الأخيرتين، وخاصة في صناعة التربينات الغازية وتربينات الطائرات النفاثة. وقد تنوعت وتوسعت استخدامات الكوبلت العملية كعنصر أساسي في صناعة سبائك الكوبلت المتفوقة، المستخدمة عند درجات الحرارة العالية في أوساط تحتوي على عوامل تآكل خطيرة وخاصة الكبريت والأكسجين وثاني أكسيد الكبريت وكلوريد الصوديوم أو كبريتات الصوديوم. كما استخدم الكوبلت وما زال يستخدم كعنصر سبائكي بإضافات العديد من السبائك المستخدمة في التطبيقات والصناعات الكيميائية العاملة عند درجات الحرارة العالية، كما في صناعة بعض أنواع الفولاذ وسبائك النيكل المتفوقة وغيرهما ولقد ساعد على استخدام الكوبلت والتوسع في استعماله ما يتمتع به من خواص يتميز بها عن بقية الفلزات الأخرى، وحتى العناصر الأساسية المعروفة مثل النحاس والحديد وغيرهما وسيأتي ذكر مميزات عنصر الكوبلت فيما بعد.

لقد تمكن الكيميائي السويدي "برانديت" في عام (1735 م) من فصل الكوبلت واستخلاصه من خاماته. وفي الماضي البعيد استخدمت مركبات وأملاح هذا العنصر – بغير اسم الكوبلت؛ نظراً لأن اسم الكوبلت لم يطلق إلا حديثاً على هذا العنصر وبالتالي على أملاحه ومركباته، كما سيأتي ذكره فيما بعد – لعدة قرون طويلة كمادة لتلوين الزجاج والمواد السيراميكية باللون الأزرق، وقد وجد عدد من التماثيل الصغيرة – يقارب عمرها 4000 سنة – في مقابر قدماء المصريين زجج سطحها الخارجي باستخدام أملاح الكوبلت، وكذلك فإن هنالك الكثير من الألوان اللامعة

والجذابة التي استخدمها اليونانيون القدماء وكذلك الرومان في طلاء التماثيل وغيرها، والتي وجد أنها تحتوي على فلز الكوبلت، إضافة إلى ما هو ثابت عن استخدام مركبات ذلك العنصر في آثار البابليين. وعلى الرغم من أن تحضير واستخلاص الكوبلت كان في عام (1735 م)؛ إلا أنه لم يتم التعرف على خواصه إلا بعد ذلك بأربعين عاماً، ويرجع الفضل في التعرف على خواص الكوبلت للعالم الألماني (Bergman) "برجمان" الذي درس وفحص وتعرف على خواصه الفيزيائية والكيميائية.

ترجع تسمية الكوبالت بهذا الاسم إلى أكثر من سبب، فهناك قولان في ذلك: الأول يعتقد أن كلمة كوبالت(Cobalt) قد جاءت من الألمانية وهي (German Kobelt) وهي مشتقة من الكلمة الألمانية(Cobalos)، وتعكس المانيتها أقوالاً مأثورة وأساطير ترتبط بخامات الكوبلت. فمن المعروف أن معظم خامات الكوبلت زرنيخية أو كبريتية، مما سبب في الماضي ثورماً في أيدي وجلود العاملين فيها، حيث أطلق عمال المناجم في سكسونيا "الكوبلو" على خامات العنصر بمعنى مسبب الأورام فأصبح مثلاً. ومع مرور الوقت حرفت الكلمة فكانت "الكوبلت".أما الاعتقاد الثاني أو الرأي الآخر فيظن أن اسم الكوبالت قد جاء أيضاً من كلمة ألمانية (Kobold) في القرن السادس عشر الميلادي، حيث أطلق ذلك الاسم على خام كان يتوقع أن يكون محتويا على النحاس بعد اختزاله بالطرق المعروفة، وفيها تم ابتعاث غازات سامة من الزرنيخ أثناء التحميص واستخدم تعبير مشابه لذلك السكسون(Saxony).

ويعتقد أن بداية التعرف على خام الكوبلت بصورة تجارية عام (1903م) عندما كان عمال السكك الحديدية في شمال مقاطعة بكندا يقومون بمد خط السكك الحديدية في هذه المنطقة، ولاحظ هؤلاء العمال وجود عروق في التربة تتميز في اللون عن غيرها. وعند زيارة الباحثين (جيمس مانكلي) و (آرنست دراج) للموقع هالهما ما تحمله تلك العروق من فلز الفضة الخام، ومع الفضة مقدار هائل من خامات فلز آخر لم يكن معروفا لهم، وإن كان مشكوكا في أن يكون فضة، وما هو في واقع الأمر بفضة، ولكنه كان خام فلز الكوبلت.

4-7-2: استخلاص الكوبلت:

ينتشر الكوبلت بصورة موسعة في القشرة الأرضية بنسبة (0.0024%)، ويأتي الكوبلت في المرتبة الرابعة والثلاثين بين العناصر في ترتيب وفرته في القشرة الأرضية، وتوجد عدة طرق

مختلفة لاستخلاص الكوبلت من خاماته، تعتمد على نوع الخام المعالج، وان كانت هذه الطرق جميعا تعتمد على جاذبية الثقل أو تركيز الطفو . وفيما يلي نستعرض ثلاثاً من هذه الطرق:

4-7-2-1: الانصهار في فرن الصهر:

يستخدم في ذلك الفرن العاكس أو الفرن الكهربائي للحصول على ناتج ذي قيم عالية من الفلز لغرض معالجة أخرى بواسطة التحميص، ثم إذابة المعدن الخام في المذيب المناسب، ثم يتبع ذلك الترسيب الكيميائي لعنصر الكوبلت على شكل هيدروكسيد الكوبلت. وبعد ترسيب هيدروكسيد الكوبلت يسخن ليتحول إلى أكسيد الكوبلت أما الأكسيد الناتج المحصول فيختزل إلى فلز الكوبلت باستخدام الفحم.

4-7-2-2: الاستخلاص بالطريقة الالكترونية:

استخدمت هذه الطريقة في بلجيكا من قبل اتحاد المعادن البلجيكي (Union Miniere du Haut Katanga)، وتقوم هذه الطريقة على إذابة الكوبلت في ظروف مشابهة للتحليل الكهربائي للنحاس، حيث يستخلص الفلز من مخلفات إذابة خام النحاس وتحليله كهربائيا وتكون المخلفات غنية بالكوبالت، ومن ثم تعامل هذه المحاليل مع لبن الجير لإزالة النحاس والحديد. ويرسب الكوبلت بعدئذ في صورة هيدروكسيد الكوبلت والذي يذوب في محلول الكبريتات عند الأس الهيدروجيني (7)، ثم يصهر الكوبلت المترسب وينقى في الفرن الكهربائي.

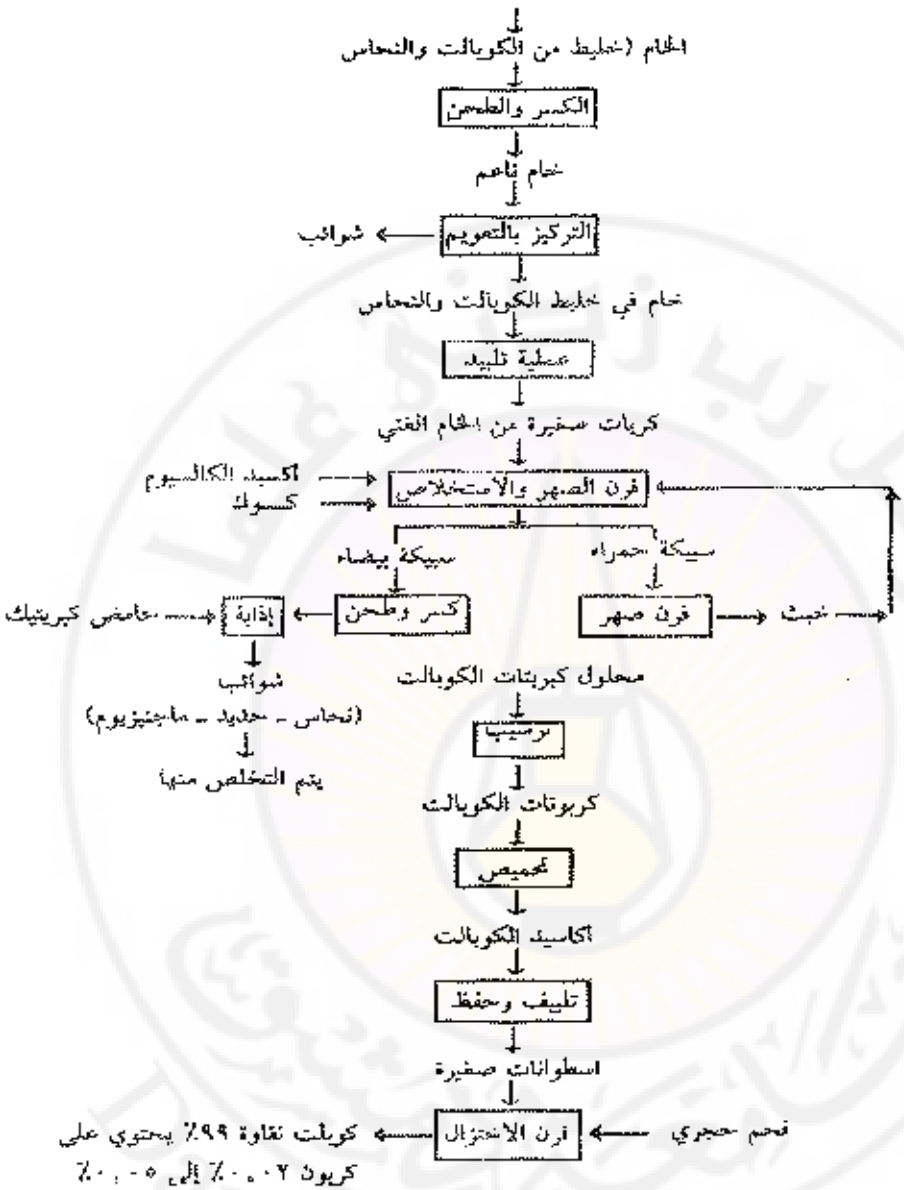
4-7-2-3: معالجة خامات كبريتيد النحاس – كوبالت:

تستخدم هذه الطريقة– التي ستتم مناقشتها بتفصيل أكثر؛ نظرا لاستخدامها بتوسع الآن في معالجة خامات النحاس-كوبالت المشتركة، حيث يتكون خام الكوبلت المركز من (32٪) نحاس و(32٪) كوبالت و(13٪) حديد و(23٪) كبريت. ويتم تركيز الخام في البداية بعملية التعويم (froth flotation)، حيث يتم الحصول عندئذ على خام الكوبلت (أكسيد الكوبلت) الغني، وتتساوى عندئذ في نواتج التركيز نسبة الكوبلت نسبة النحاس. ويكبس الناتج إلى كريات صغيرة (pellets) وتغذى إلى فرن الصهر الكهربائي مع كميات غنية من الخام غير المكبوس. وتتكون شحنة الفرن إضافة للخام من أكسيد الكالسيوم والكوك. والكوك المضاف هو عامل الاختزال، وتشبه الشحنة في هذه الحالة شحنة الفرن العالي لاختزال الحديد من خامته. وتكون نواتج الاختزال في طبقتين منفصلتين باختلاف الكثافة، الطبقة السفلية وهي مركب ثقيل وهي سبيكة

حمراء تحتوي على (90٪) نحاس و(5٪) كوبالت و(4٪) حديد أما الطبقة الثانية الخفيفة العلوية فهي سبيكة بيضاء تحتوي على (42٪) كوبالت (15٪) نحاس و(34٪) حديد (2٪) سليكون. وتتم معالجة السبيكة الحمراء (الغنية بالنحاس) في مصاهر النحاس، ويضيع محتوى هذه السبيكة من الكوبلت حيث يذهب إلى الخبث، ولكن هذا الخبث يعاد مرة أخرى إلى أفران صهر واستخلاص الكوبلت، كما هو موضح في الشكل (4-94) أما السبيكة البيضاء الغنية بالكوبالت فتكسر ثم تذاب في حمض الكبريتيك ويزال النحاس والحديد والمنجنيز بأسلوب الترسيب الانتقائي (selective precipitation)، ثم يرسب الكوبلت بتحويله إلى كربونات الكوبلت وذلك بإضافة كربونات الصوديوم إلى المحلول،وعند تكليس كربونات الكوبلت النقية يتم الحصول على أكسيد الكوبلت ذي النقاوة التجارية، وهو ذو لون رمادي، وتبلغ نسبة الكوبلت في الأكسيد حوالي(75٪)، وذلك في حالة التكليس عند درجات حرارة تتراوح ما بين (780 و 880 درجة مئوية) وتقل نسبة الكوبلت في الناتج لتصل إلى حوالي(71٪) إذا كانت درجة حرارة التكليس في المدى من (720-750) درجة مئوية ويكون لون أكسيد الكوبلت الناتج من التكليس عند درجات الحرارة المنخفضة أسود. وتكبس أكاسيد الكوبلت الناتجة في صورة اسطوانات صغيرة بقطر 1 سم وارتفاع 1سم وتجفف، ثم تشحن إلى الفرن في وجود الفحم الحجري لتختزل عند درجة الحرارة(1000 درجة مئوية) منتجة الكوبلت بدرجة نقاوة تبلغ(99٪) مع قليل من الكربون (0.04%) ويمكن الاستعاضة عن الفحم باستخدام الهيدروجين كعامل مختزل، وفي هذه الحالة فإن درجة حرارة الاختزال تكون أقل بكثير من (1000درجة مئوية).

4-7-3: خواص الكوبلت:

الكوبلت واحد من الفلزات الانتقالية (Transition Metals) التي تقع في الدورة الرابعة من الجدول الدوري للعناصر، يسبق فلز النيكل مباشرة في هذه الدورة ويلي الحديد مباشرة فيها، ويطلق عليه أحياناً اسم أحد أشقاء الحديد - إن صح التعبير - وهذه العناصر الثلاثة النيكل والكوبالت والحديد يجمعها - بالإضافة إلى الدورة الرابعة في الجدول الدوري - خاصيتها المغناطيسية المميزة، وإن كان الحديد أقواها مغناطيسياً، وللكوبالت خواص فيزيائية عديدة مشابهة لخواص فلز النيكل، من بينها حجم الذرة ودرجة حرارة الانصهار ويقدم الجدول (4-40) مقارنة بين خواص فلزي الكوبلت والنيكل. وبعض خواص الكوبلت الفيزيائية والكيميائية موضحة في جدول (4-41).



الشكل (4-94): رسم تخطيطي يوضح خطوات الحصول على الكوبلت من خام يحتوي على خليط من مركبات النحاس والكوبلت (خامات زائير).

والتركيب البلوري للكوبالت عند درجة حرارة الغرفة هو مسدس عالي الحشو (HCP) ولكنه يتحول إلى صورة بلورية أخرى هي المكعب متمركز الوجه، وذلك عند درجة حرارة (400 درجة مئوية)، أي أن الكوبالت من الفلزات التأصلية (Polymorphism) متعددة الأوجه.

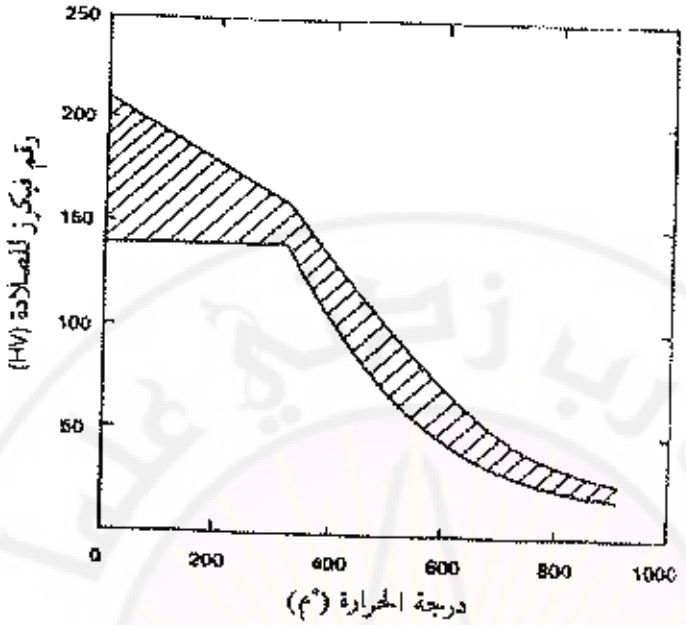
لون فلز الكوبالت أبيض فضي عند كسره أو عند انعكاس الضوء على سطحه، وهو مشابه للنيكل والحديد في مظهره. كما أن فلز الكوبالت قاس (صلد)، ولقد وجد أن صلادته – على مقياس فيكرز للصلادة – تتراوح ما بين(140) و (250)، اعتماداً على طريقة إعداد العينة إضافة إلى طريقة المعالجة الحرارية،فإذا كانت المادة جيدة التلاين وعالية النقاوة، فإن رقم فيكرز للصلادة يكون ما بين (140) و (180)، وتغير صلادة الكوبالت مع درجة الحرارة موضح في الشكل (4–95)، ولا يوجد تغير ملحوظ في صلادة الكوبالت عند درجة حرارة تغيره البلوري، بينما يحدث تغير في معامل المرونة ومعامل القص عند درجة حرارة التحول البلوري، كما هو موضح في الشكل (4–96) ويوضح الشكلان (4–97) و(4–98) التغير في بعض الخواص الميكانيكية الأخرى مع تغير درجة الحرارة، ويتضح من الشكلين أن أعلى مطيلية لفلز الكوبالت هي عند درجة الحرارة (300 درجة مئوية)، أي أنه يفضل تشكيل الكوبالت عند درجة الحرارة (300 درجة مئوية).

جدول (4-40): مقارنة بين بعض الخواص الفيزيائية لعنصري الكوبالت و النيكل.

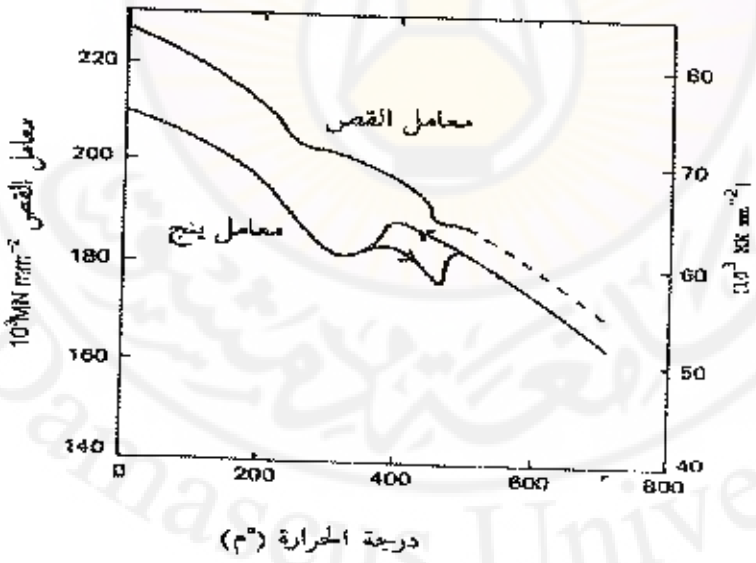
العنصر	الخواص			
	قطر الذرة أنغستروم	درجة حرارة الانصهار (درجة مئوية)	الكثافة g/cm3	البناء البلوري
الكوبالت	2,497	1495	8,85	مسدس يتحول إلى مكعب متمركز الوجه عند الدرجة 400 مئوية.
النيكل	2,491	1453	8,90	مكعب متمركز الوجه

جدول (4-41): أهم الخواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية لفلز الكوبلت

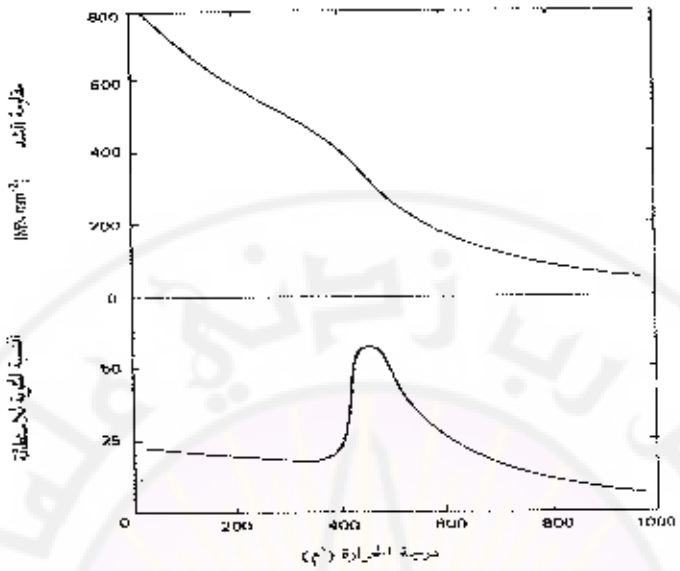
الخاصية	القيمة
رمز العنصر	كو، Co
العدد الذري	27
الوزن الذري(الكتلة)	58.93amu
نصف قطر الذرة	1.25,1.26×10^{-10} m
التكافؤ	ثنائي CO^{2+} وثلاثي CO^{3+}
النظائر CO 55	نصف العمر 18،2 ساعة
CO 56	نصف العمر 80 يوماً
CO 57	نصف العمر 270 يوماً
CO 58	نصف العمر 72 يوماً
CO 61	نصف العمر 5،3 سنة وهو اكبر واهم مصدر للإشعاعات النووية المستخدمة في العلاج وفي تعقيم الطعام وحفظه
اللون المنعكس في الضوء	ابيض فضي
التركيب البلوري	عند درجة حرارة اقل من 400 درجة مئوية فهو مسدس عالي الحشو (HCP) ابعاده a=0.25 c=0.407×10^{-10} m
	عند درجة حرارة أعلى من 400 درجة مئوية فهو مكعب متمركز الوجه a=0.356*10^{-10} m
اقل مسافة بين مركز الذرتين	25.1*10^{-11} m
الكثافة عند 20درجة مئوية	8.9*10^{-3} kg/m^3
عند درجة حرارة الانصهار	8.1*10^{-3} kg/m^3)
درجة حرارة الانصهار	1.573 °k
درجة حرارة الانصهار	3.173 °k
معامل التمدد الحراري مابين 20 و1000درجة مئوية	12.08*10^{-6} cm/cm,°C
معامل التوصيل الحراري	0.165 cal/cm.°C. s
المقاومة الكهربائية عند 20 درجة مئوية	9.7*10^{-3} ohm.cm
الجهد المثالي CO^{2+}	-0.277v
CO^{3+}	1.8v
الصلادة (على مقياس موز)	5.5
معامل يانج للمرونة:	
في حالة الشد	17.4*10^4 Mpa
في حالة القص	6.48*10^4 Mpa
حرارة الصهر	58.38cal/g



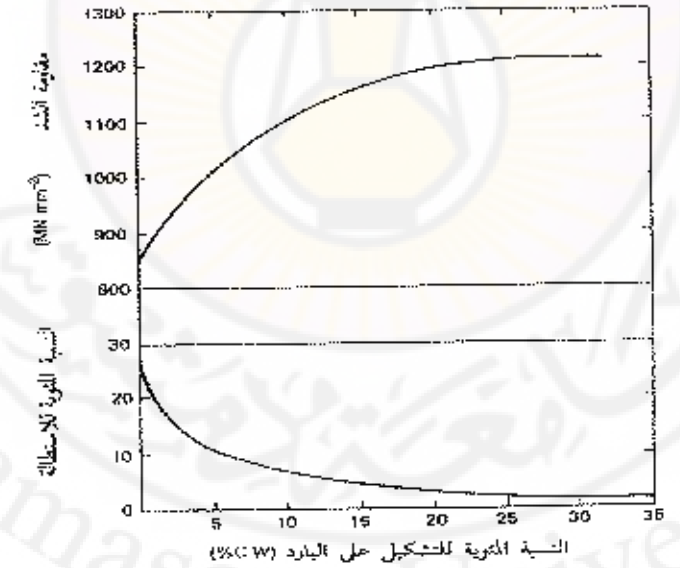
الشكل (4-95): العلاقة بين صلادة فلز الكوبلت ودرجة الحرارة.



الشكل (4-96): العلاقة بين معامل يونج ومعامل القص وفلز الكوبالت مع درجة الحرارة.



الشكل (4-97): تأثير درجات الحرارة على خواص الشد لفلز الكوبلت.



الشكل (4-98): تأثير التشكيل على البارد على تصلبد الكوبلت المادن.

4-7-4: استخدامات الكوبلت:

يستخدم الكوبلت في العديد من التطبيقات الهندسية، إما كعنصر أساسي في سبائك الفولاذ أو النيكل أو كأساس (قاعدة) لسبائك الكوبلت، وقد ساعد على التوسع في استخدام الكوبلت في الآونة الأخيرة ما يتميز به هذا العنصر من خواص وأهم تلك الخواص ما يلي:

1- احتفاظه بخواص مغناطيسية ثابتة حتى مع تغير درجات الحرارة المرتفعة أكثر من أي عنصر تجاري آخر.

2- إمكانية تشكيل سبائك الكوبالت بطرق مختلفة: الدلفنة أو السحب كما يمكن معالجتها حراريا لزيادة الخواص الميكانيكية.

3- يحسن بنسبة كبيرة قابلية السبائك المختلفة للصب عند استخدامه كعنصر سبائكي مع تلك السبائك.

4- يرفع من مقاومة الفلزات الأخرى وسبائكها – عند إضافته كعنصر سبائكي – للاحتكاك والبلى والتآكل الميكانيكي.

5- يحتفظ بخواصه الميكانيكية عند درجات الحرارة العالية حتى (900) درجة مئوية وعند درجة الحرارة (1000) مئوية يفقد الكوبالت قليلا من صلادته وتعرف هذه الخاصية باسم "الصلادة الحمراء" (red hardness). والكوبالت من الفلزات القليلة التي تحتفظ بصلادتها عند درجات الحرارة العالية.

يستخدم حوالي (80٪) من الكوبالت المنتج في صناعة السبائك، بينما تستخدم النسبة المتبقية في تكوين مركبات تدخل في استعمال الأصباغ والأملاح والمجففات وفريتات الفخار (مزيج مكلس من الرمل والمواد المصهورة لصنع الزجاج). ويدخل حوالي (20٪) من مجموع الكوبالت المستهلك في صناعة أنواع عديدة من المغانط الدقيقة الدائمة ويستخدم الكوبالت كذلك في إنتاج عدد من سبائك الفولاذ وكعنصر سبائكي في عدد من السبائك غير الحديدية وعلى وجه خاص سبائك النيكل المتفوقة. وتمتاز السبائك غير الحديدية التي يدخل الكوبالت في تكوينها بمقاومة عالية للتآكل والتأكسد كما تتمتع تلك السبائك بمقاومة ممتازة ضد البلى وتتميز السبائك المحتوية على الكوبالت بإمكانية تصليد سطحها وسبائك الكوبالت ذات مقاومة عالية للتآكل والأكسدة وهي صالحة للاستعمال عند درجات الحرارة المرتفعة. ويستعمل مسحوق الكوبالت في صناعة سبائك العدد الرئيسة مثل سبائك كربيد الكوبالت والتنجستن المصنعة بأسلوب التكتل. وسيأتي ذكر استخدامات سبائك الكوبالت لاحقاً.

يستعمل الكوبالت (60) ونظائر الكوبالت الأخرى في بحوث الكيمياء والفيزياء وعلم الأحياء وكمصدر مشع للعلاج الإشعاعي أو العلاج النووي حيث يشع الكوبالت (60) اثنتين من أشعة γ مصحوبة بأشعة β. ويتراوح نصف عمر النظائر ما بين ثلاث وخمس سنوات. وللكوبالت (60) تطبيقات أخرى مثل تعقيم الأغذية وحفظها وعمليات التحاليل وتقنية الفلزات وتنشيط التفاعلات الكيميائية بكل أنواعها.

4-7-5: سبائك الكوبالت:

يعتقد أن أول استخدام لسبائك الكوبالت المتفوقة عند درجات الحرارة العالية كان في عام (1920م) عندما استخدمت سبيكة مكونة من: الكوبالت – كروم – تنجستن وعرفت هذه السبيكة باسم "ستيليت" (stellite) ولقد كان استخدام هذه السبيكة كمادة مغلفة في ملفات العادم (محابس العادم) في محركات الطائرات. وقد أطلق على هذه السبائك فيما بعد اسم "السبائك المقاومة للبلى" (wear resistant alloys) كما درست خواصها بعد ذلك بالتفصيل ولقد بني اختيار هذه السبائك في ذلك الوقت المتقدم من عصر التقنية على أساس:

1- مقاومتها الممتازة للتآكل عند درجات الحرارة العالية – في مدى من درجات الحرارة بين (700) و (800) مئوية وفي وجود ترسبات من أكاسيد الرصاص والهاليدات الناتجة من المواد المختلفة المضافة للوقود.
2- صلادة المادة المرتفعة إضافة إلى احتفاظ سبائك الكوبالت بقيمة الصلادة نفسها عند درجات الحرارة العالية.
3- مقاومة السبائك الجيدة للبلى والتحات الميكانيكي.

وما زالت هذه السبيكة تستخدم حتى الآن ولو أنها تلاقي منافسة كبيرة في الوقت الراهن من سبائك النيكل – كروم عالية الكربون.

وفي عام (1930م) تم تطوير سبيكة أخرى من سبائك الكوبالت عرفت باسم "فيتاليوم" (vitallium) وهي سبيكة من الكوبالت والكروم والموليبدنوم وقد أمكن تصنيع أجزاء على درجة عالية من التعقيد من هذه السبيكة باستخدام الطريقة الذهبية المتميزة للصب وهي السبك بطريقة الشمع المتبدد (lost wax casting) وكان من أهم المنتجات المصنعة من هذه السبيكة زعانف محركات الطائرات الأمريكية التي تم توصيلها (لحامها) إلى قاعدة التربينات المصنوعة من الفولاذ. وكانت هذه الزعانف تعمل عند درجة حرارة بين (700) و (800) درجة مئوية وقد استعملت سبيكة الفيتاليوم بكميات كبيرة في الطائرات خلال الحرب العالمية الثانية أما السبائك

المعدلة من سبيكة فيتاليوم التي تحتوي على نسبة أقل من الكربون فقد عرفت باسم (HS 21) "اتش اس 21" ثم كانت هناك سبيكة أخرى هي "اتش اس 31" (HS 31) التي استبدل فيها عنصر الموليبدنوم بعنصر التنجستن، وعرفت بعد ذلك باسم "اكس 40" (X 40). وفي عام (1940م) بدأت صناعة التربينات الغازية من سبائك "اكس 40" ثم صرف النظر عن السبائك المذكورة آنفا عندما قلت كمية الكوبالت المعروضة واتجهت الأنظار نحو سبائك النيكل، ولكن في الوقت الراهن عاد التفكير مرة أخرى في سبائك الكوبالت لما تتمتع به من خواص كثيرة ومتنوعة سيأتي ذكرها عند الحديث عن كل سبيكة من سبائك الكوبالت.

يكون الكوبالت العديد من السبائك مع العناصر المختلفة، ولهذا فإن التعرف على منحني الاتزان الحراري للكوبالت مع بعض العناصر الفلزية يساعد على فهم طبيعة التركيب البنائي، وكذلك خواص السبائك المتكونة، وفي الجزء التالي نستعرض عددا من منحنيات الاتزان الحراري للكوبالت مع عدة عناصر سبائكية.

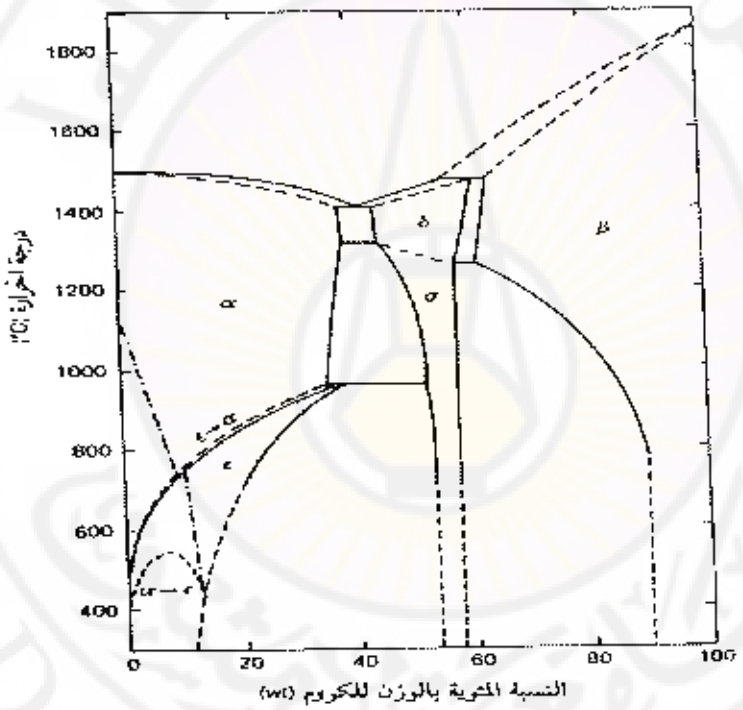
4-7-5-1: منحنيات الاتزان الحراري لسبائك الكوبالت الثنائية:

1- الكوبالت- كروم: منحني الاتزان الحراري لسبائك الكوبالت- كروم موضح في الشكل(4-99)، ويتضح من الشكل أن الكوبالت ألفا (α) يذيب حوالي (38٪) كروم عند درجة حرارة الأيوتكتيك (1400) درجة مئوية ويظل مقدار الإذابة ثابتاً مع انخفاض درجة الحرارة (960) مئوية حيث يبدأ الكوبالت إبسلون (ε) في التكوين، وتقل بالتالي ذائبية الكروم في الكوبالت حتى درجة الحرارة (700) مئوية لتصل الذوائبية إلى حوالي (20٪) وعند درجة الحرارة (1310) مئوية يكون المحلول الجامد الغني بفلز الكوبالت في حالة اتزان مع الوجه σ تركيبه الكيميائي (CoCr) ومن الجهة الأخرى في منحني الاتزان الحراري تكون أقصى ذائبية للكوبالت في الكروم (38٪) عند درجة الحرارة (1260) مئوية، وتنخفض هذه النسبة إلى حوالي (10٪) عند درجة الحرارة (800) مئوية.

2- الكوبالت - حديد: توجد إذابة تامة بين الحديد - في صورة γ أو الحديد الأوستونيتي - والوجه α من الكوبالت لتكوين المحلول الجامد عند درجة الحرارة (985) مئوية إلى خط التجمد فيما عدا بعض المناطق المحدودة المعروفة باسم "دلتا فريت" "δ-ferrite" بين درجة الحرارة (1400) مئوية ودرجة حرارة انصهار الحديد في المنطقة الغنية بالحديد، كما هو مبين في الشكل (4-100) لمنحني الاتزان الحراري لسبائك الكوبالت - حديد. أما في المنطقة الغنية بالكوبالت ومنطقة كوري عند درجة الحرارة (1115) مئوية إلى درجة الحرارة (900) مئوية

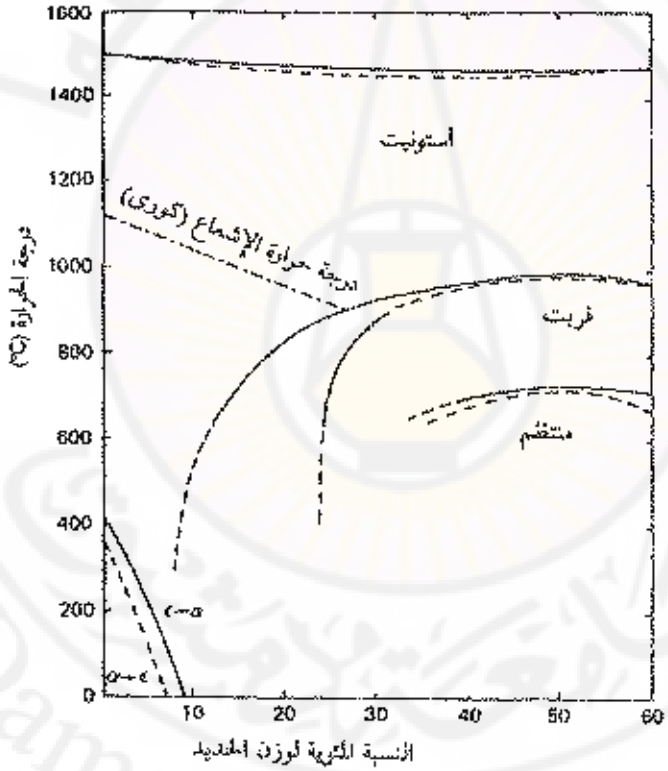
فيحدث انخفاض سريع في درجة التحول مع زيادة نسبة الحديد. ويذوب الكوبالت في الحديد α الفريتي بمقدار حوالي (75٪) مكونا مركباً هو ($FeCo$) وأساس هذا المركب هو اتحاد ذرة من كل من عنصري الكوبالت والحديد عند درجات الحرارة أقل من (730) مئوية.

3- الكوبالت - نيكل: يوضح الشكل (4-101) أن المدى الكامل لذائبية العنصرين معاً لتكوين المحلول الجامد بين الكوبالت α والنيكل. وفي مدى من تركيز النيكل يتراوح ما بين صفر و(10٪) يظهر انخفاض قليل في درجة حرارة الكوري ودرجة حرارة التحول البنائي. أما عند النسب العالية (أعلى من 10٪) من النيكل فإن درجة حرارة التحول وحدود منطقة (ε+α) ليست محددة تماماً. وهناك نتائج واضحة تبين أن المركبات (Co_3Ni) و($CoNi_3$) المتكونة من الفلزين ذات تركيب منتظم.



الشكل (4-99): منحني الاتزان الحراري للكوبلت – كروم.

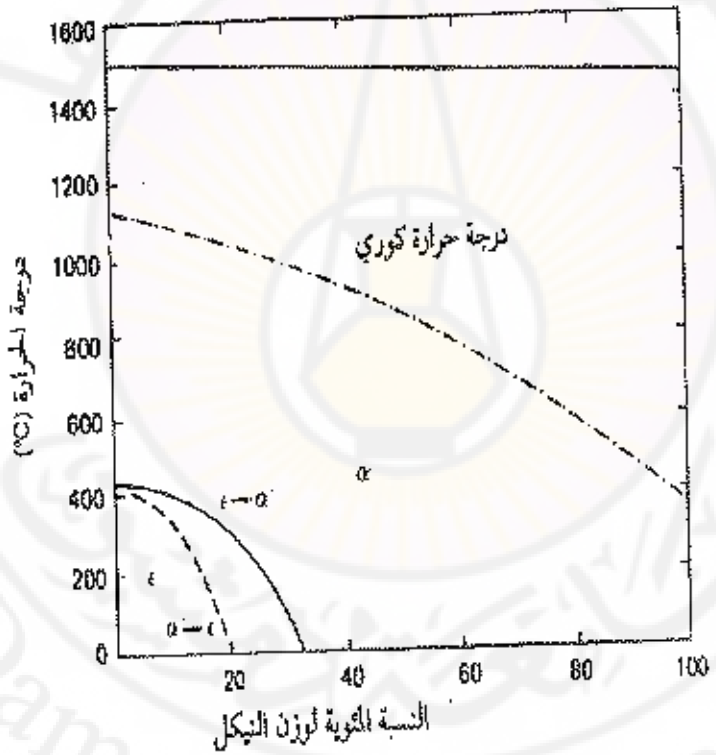
4- **الكوبالت – تنجستن:** تصل ذائبية التنجستن في الكوبالت α عند درجة حرارة الأيوتكتيك إلى (1480) مئوية لتكوين المحلول الجامد إلى حوالي (40٪) عندما تكون في حالة اتزان مع المركبات الفلزية المتداخلة والمركب الفلزي المتكون في هذه الحالة هو (W_6Co_7)، كما هو موضح في الشكل (4–102)، ومع انخفاض درجة الحرارة تقل ذائبية التنجستن في الكوبالت لتصل إلى حوالي (30٪) عند درجة الحرارة (1050) مئوية وعند درجة الحرارة هذه يكون المحلول الجامد في حالة اتزان مع المركب (WCo_3)، وترتفع كذلك درجة حرارة التحول من ε إلى α بتكوين المحلول الجامد.



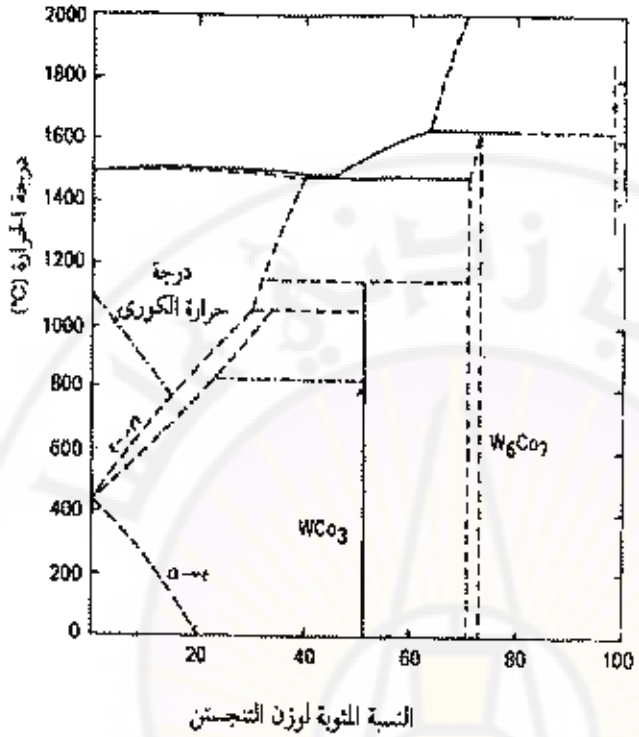
الشكل (4– 100): منحنى الاتزان الحراري الكوبلت – حديد.

4-7-5-2: منحنيات الاتزان الحراري لسبائك الكوبالت الثلاثية:

أ- **كوبالت – كروم – حديد:** من أهم خصائص النظام الثلاثي لمنحنيات الاتزان المدى الواسع من ثبات البناء التركيبي البلوري المسدس وكذلك الوصلات القائمة في منتصف الشكل لتكوين الوجهين سيجما وتركيبهما ($FeCr$) و ($CoCr$)، كما هو موضح في الشكل (4-103) عند درجة الحرارة (1200) مئوية. ويتقلص البناء البلوري المسدس ناحية محور الكوبلت–كروم مع زيادة درجة الحرارة حتى يختفي عند درجة الحرارة (960) مئوية، وتظل منطقة سيجما دون تغير حتى درجة الحرارة (800) مئوية، ثم تبدأ في التقلص ناحية محور الكوبلت-كروم، ولكن يظل الوجهان سيجما موجودين بنسب ذرية متساوية من العنصرين المكونين لهما عند درجة الحرارة (1300) مئوية.

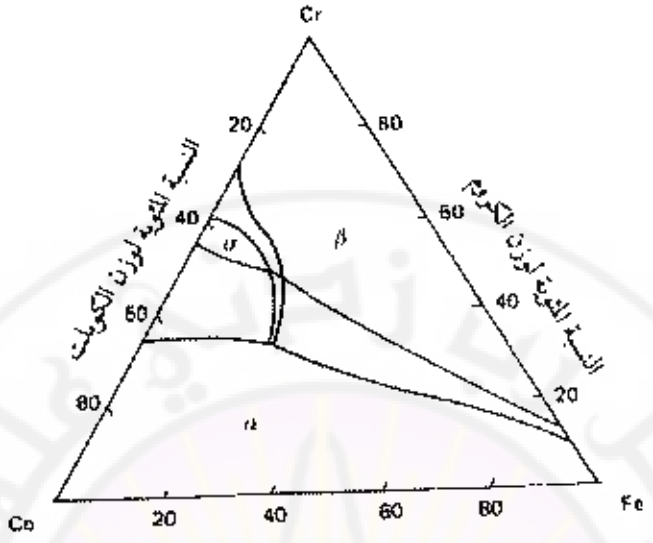


الشكل (4- 101): منحنى الاتزان الحراري للكوبلت – نيكل.



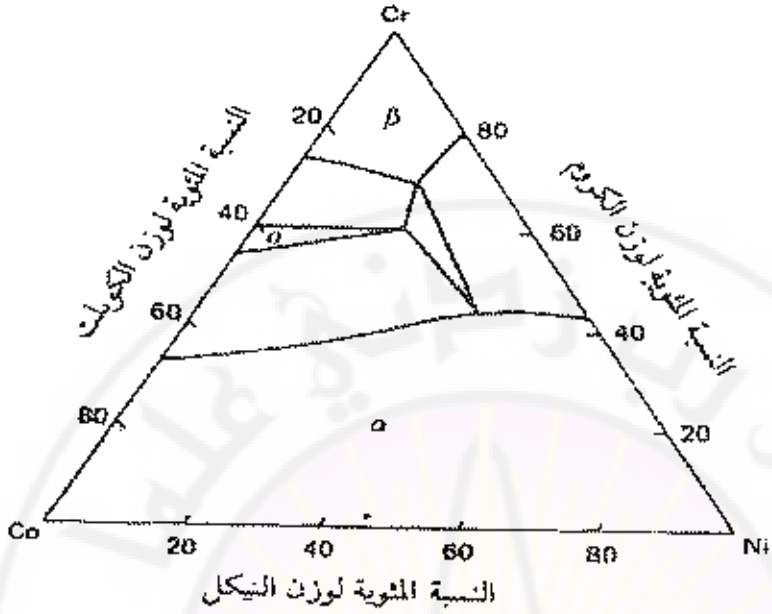
الشكل (4- 102): منحني الاتزان الحراري للكوبلت – تنجستين.

2- **كوبلت – كروم – نيكل:** يمكن أن تذيب السبيكة الثنائية المكونة من الكوبلت – نيكل، وبناؤها البلوري هو مكعب متمركز الوجه، نسباً كبيرة من الكروم لتكوين مساحة كبيرة من ذلك الوجه عند درجات الحرارة العالية، ويوضح الشكل (4-104) هذا التركيب عند درجة حرارة (1,200) مئوية. ومن المعروف أن إضافة النيكل ذات فعالية معاكسة لتأثير الكروم في تثبيت الكوبلت في صورته المسدسة، ولكن الزيادة في إبطاء التحويل يجعل تحديد أمرها صعباً.

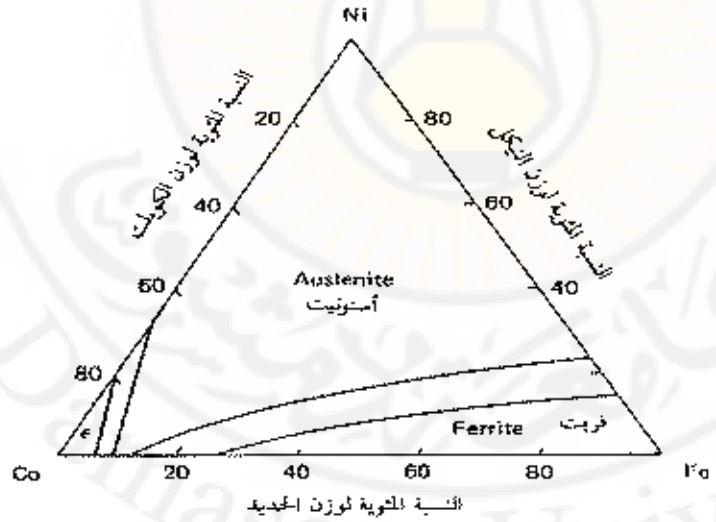


الشكل (4- 103): منحني الاتزان الحراري لسبائك الكوبلت .. كروم – حديد عند درجة الحرارة 1200 °C.

3- **كوبلت – نيكل – حديد:** تكون العناصر الثلاثة – عند درجات الحرارة العالية – أعلى من (1,000) مئوية – سلسلة من المحاليل الجامدة تركيبها البلوري مكعب متمركز الوجه فيما عدا منطقة الدلتا فريت (δ-ferrite) في الجزء الغني بالحديد من درجة الحرارة (1,400) مئوية حتى درجة حرارة الانصهار. ويحدث عند درجات حرارة أقل من (1,000) مئوية تحولان لا بد من أخذهما في الاعتبار؛ يحدث التحول الأول في المنطقة الغنية بالحديد، عند (50٪) حديد، وهو تحول الأوستونيت (γ) إلى فريت (α)، والذي يبدأ من درجة الحرارة (985) مئوية، أما التحول الآخر فهو تغير البناء البلوري من المكعب إلى النظام المسدس عالي الحشو في المنطقة الغنية بالكوبلت، ويُنشط التحول الآخر بإضافة النيكل والحديد، ولذا فإن منطقة البناء البلوري المسدس منطقة صغيرة في النظام الثلاثي. ويظهر هذان التحولان جزءاً كبيراً من التخلفية؛ ولهذا يصعب تحديد الاتزان. ويوضح الشكل (4-105) منحني الاتزان الحراري للنظام الثلاثي كوبلت – نيكل – حديد عند التبريد البطيء لدرجة الحرارة العادية.



الشكل (4- 104): منحني الاتزان الحراري لسبائك الكوبلت ـ كروم ـ نيكل عند درجة الحرارة 1200 °C.



الشكل (4- 105): منحني الاتزان الحراري لسبائك الكوبلت ـ نيكل ـ حديد عند درجة الحرارة 1200 °C.

4-7-5-3: نظرة عامة على سبائك الكوبلت وتطبيقاتها:

يبين جدول (4-42) التركيب الكيميائي الاسمي وإستخدامات بعض سبائك الكوبلت المتفوقة. وسبائك الكوبلت المتفقة أقل تعقيداً في تركيبها من سبائك النيكل المتفوقة. وتحتوي سبائك الكوبلت المصبوبة على نسبة من الكوبلت تتراوح ما بين (50٪) و(60٪)، والكروم في مدى من (20٪) إلى (30٪)، أما التنجستن فنسبته من (5٪) إلى (10٪)، أما الكربون فإنه يتراوح ما بين (0,1٪) و (1,0٪). وفي بعض الأحيان تكون هناك إضافات من عناصر أخرى مثل: النيكل والتنتالم والحديد والنيوبيوم. أما سبائك الكوبلت المتفوقة المطروقة فتحتوي على (40٪) كوبلت، وتصل نسبة النيكل فيها إلى حوالي (20٪) إضافة إلى عدة عناصر أخرى، وتركيب سبائك الكوبلت المصبوبة والمطروقة موضح في جدولي (4-42) و(4-43). وتساعد إضافة النيكل إلى سبائك الكوبلت كثيراً على زيادة قابلية التشكيل على البارد بالطرق المختلفة وخاصة الدلفنة للحصول على منتجات في صورة شبه نهائية مثل القضبان والألواح وقد ساعدت التقنية الحديثة على التوسع في استخدام السبائك المطروقة بعد أن كانت هناك بعض المصاعب والعقبات التي حالت دون التوسع في استخداماتها، وقد تم التغلب على مشكلات سبائك الكوبلت المطروقة من خلال عاملين هما: الأول: هو التحكم في نسبة الشوائب الغازية، ويمكن الآن الحصول على كوبلت تصل درجة نقاوته (99,5 ٪)، أما العامل الآخر: فهو التحكم وضبط العناصر المضافة لسبائك الكوبلت سواء من ناحية النوع أو الكم.

جدول (4-42): التركيب الكيميائي لبعض استخدامات الكوبلت المتفوقة واستخداماتها.

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)								الاستخدامات
	Co	Cr	W	Ni	C	Fe	Ta	إضافات أخرى	
X 40 (I)	54.0	25.5	7.5	10.5	0.50	1.5	-	0.5Si + 0.5Mn	أجزاء التربينات الغازية، ريش المراوح والزعانف
FSX-414	52.0	29.0	7.5	10.0	0.25	1.0	-	0.01B	ريش وأجزاء التربينات الغازية
HS 21	64.0	27.0	-	3.0	0.25		-	5.0Mo	ريش وأجزاء التربينات الغازية
MAR-M302	58.0	21.5	10.0	-	0.85		9.0	0.01B+Ti + 0.20Zr	المراوح والريش لتربينات

محركات الطائرات									
المراوح والريش توربينات محركات الطائرات	0.75Ti + 2.25Zr	4.5	-	1.0	-	9.0	21.5	61.0	MAR-M322
المراوح والريش توربينات محركات الطائرات	0.2Ti + 0.50Zr	3.5	-	6.0	10.0	7.0	23.5	55.0	MAR-M509
المراوح والريش توربينات محركات الطائرات	2.0Mo+1.3Nb+2.8V	-	17.3	8.0	12	-	19.0	45.0	G-34
الأنواح والأنابيب المقاومة للتآكل على الساخن	3.5Al+0.15Zr+0.1Y	6.5	-	18.0	-	4.7	19.0	66.0	AR-213
السبائك المتروقة									
المراوح والريش توربينات محركات الطائرات	4.0Mo+4.0Nb+1.2Mn+0.4Si	-	4.0	0.38	20.0	4.0	20.0	42.0	S-816(1)
السبائك المقاومة للأكسدة عند درجات الحرارة العالية	0.75Mn + 0.40Si + 0.08La	-	1.5	0.10	22.0	14.0	22.0	39.2	HA 188

جدول (4-43): التركيب الكيميائي الاسمي لعدد من سبائك الكوبلت المتفوقة الطروقة.

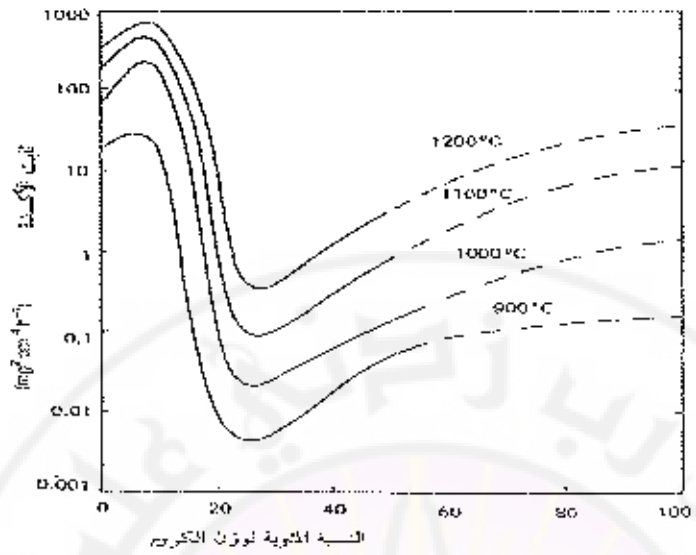
السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)							
	Co	Cr	W	Mo	Ni	C	Fe	إضافات أخرى
S816	64	20	4	4	20	0.4	4	4NB
L605 (HA25)	55	20	15	-	10	0.1	-	-
J1570	39	20	7	-	28	0.2	2	4Ti
HS 188	40	22	14	-	22	0.1	1.5	$0.08L_8$
Mar M 918	52	20	-	-	20	0.05	-	7.5Ta, 0.1Zr
G32 B	46	19	-	2	12	0.3	16.2	3V, 1.5 Nb

يعني مصطلح السبائك المتفوقة أنها السبائك التي تعمل عند درجات الحرارة العالية، أي أعلى من درجة الحرارة (800) مئوية، ويجب أن يتوافر في السبائك المتفوقة شرطان أساسيان هما:

1- مقاومة التأكل عند درجات الحرارة العالية في ظروف العمل، وتعمل مثل تلك السبائك في ظروف يتوافر فيها الأكسجين والكبريت، وبعض مركباته الغازية مثل ثاني أكسيد الكبريت (So_2) أو كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، وذلك في حالة ظروف الاحتراق المختزلة أو في وجود أملاح ومركبات الكبريت السائلة عند درجة حرارة العمل (الجامدة عند درجة حرارة الغرفة)، مثل كبريتات الصوديوم التي تترسب على السطح في حالة سائلة، كل ذلك إضافة إلى الهاليدات وبوجه خاص كلوريد الصوديوم.

ومصدر كلوريد الصوديوم إما أن يكون الوقود أو هواء الاحتراق، وبخاصة عندما تكون محطات القوى العاملة بالقرب من الأماكن الساحلية. وأفضل طريقة لمقاومة الأكسدة أو التأكل الساخن في هذه السبائك هو بإضافة عنصر الكروم بنسبة تتراوح ما بين (25٪) و(30٪)، وتؤدي هذه الإضافة إلى انخفاض كبير في معدل الأكسدة، كما هو واضح في الشكل (4-106).

2- مقاومة ميكانيكية كافية لمقاومة التشوه أو الكسر تحت الاجهادات المختلفة المعرضة لها المادة. وتكتسب سبائك الكوبلت مقاومتها الميكانيكية من عاملين مهمين هما: المقاومة الناتجة عن المحلول الجامد الناتج عن إضافة عناصر السباتكية، وكذلك المقاومة الناتجة عن الكربيدات الناعمة الدقيقة المترسبة في السبيكة. وترسيب الكربيدات هو الذي يسهم ويساعد كثيراً في زيادة مقاومة سبائك الكوبلت؛ نظراً لعدم تكون المركبات الفلزية المتداخلة، كما هو الحال في سبائك النيكل، حيث يترسب مثلاً (Ni_3Al) أو (Ni_3Ti) أو كليهما في سبائك النيكل، ولا نظير لهما في سبائك الكوبلت.



الشكل (4- 106): معدل أكسدة سبائك الكوبلت – كروم عند درجات حرارة مختلفة.

وتساعد المركبات المتكونة والمترسبة في سبائك النيكل على رفع مقاومة هذه السبائك، كما سيأتي ذكره عند الحديث عن النيكل في الفصل السادس؛ ولهذا فإن نسبة الكربون في سبائك الكوبلت أعلى بكثير من نسبته في سبائك النيكل، وتتراوح نسبة الكربون في سبائك الكوبلت ما بين (0,1٪) و(1,0٪).

وتتكون في سبائك الكوبلت ثلاثة أنواع من الكربيدات اعتماداً على نسبة الكربون وعلى عناصر السبائكية المضافة للسبيكة، وهذه الكربيدات هي:

(أ) كربيدات ($M_{23}C_6$): حيث (M) أساسا هي الكروم، ولكن يمكن أن يحل محلها التنجستن مع وجود الموليبدنوم أو بدونه.

(ب) كربيدات (MC): حيث (M) تمثل أي فلز فعال نشيط مثل التنتالم أو التيتانيوم أو الزركونيوم أو النيوبيوم أو بدونه.

(جـ) كربيدات (M_6C): حيث تمثل (M) في ذلك كربيدات التنجستن أو الموليبدنوم، وتتكون هذه الكربيدات عندما تكون النسبة المئوية الذرية للتنجستن والموليبدنوم في السبيكة حوالي (5٪).

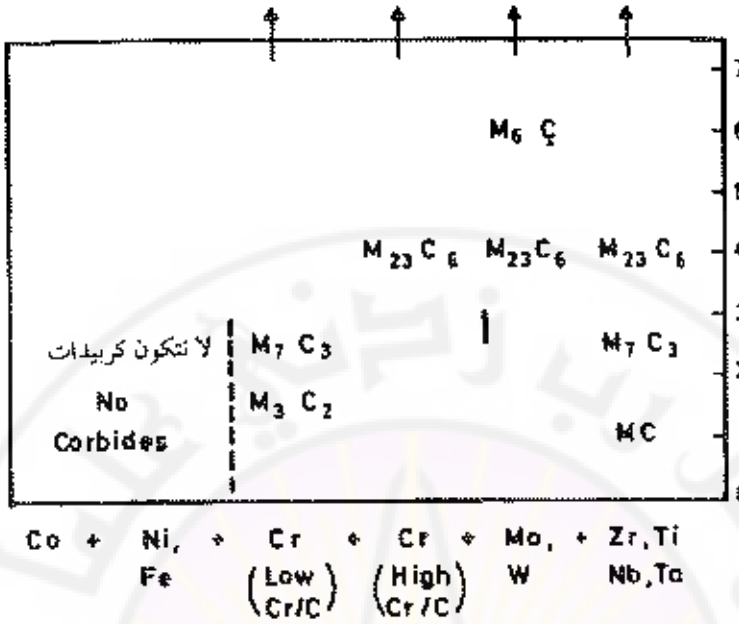
يوضح الجدول (4-44) أنواع الكربيدات المتكونة في سبائك الكوبلت المختلفة، كما يبين الشكل (4-107) تأثير نسبة الفلز المضاف إلى نسبة الكربون في السبيكة على طبيعة الكربيدات المتكونة، وأهم الكربيدات في معظم السبائك التجارية هي ($M_{23}C_6$).

ويسهم الكربون – من خلال تكوين الكربيدات – في زيادة مقاومة سبائك الكوبلت المتفوقة من خلال العاملين الثاليين:

1. ترسيب الكربيدات على حدود الحبيبات في كل من السبائك المصبوبة والمطروقة، وتعوق الكربيدات المتكونة إمكانية انزلاق حدود الحبيبات، وبهذا يزيد عمر المادة (الزمن اللازم لحدوث الفشل) ويرتفع مستوى مقاومتها.
2. ترسيب جزء من الكربيدات المتكونة في أخطاء الترصيص (Stacking faults)، كما هو موضح في البنيان المجهري شكل (4-108(أ & ب))، وتعمل تلك الترسبات كحواجز تعوق حركة الانخلاعات، مما يزيد من مقاومة المادة، وتزيد كميات الكربيدات المترسبة في أخطاء الترصيص أثناء استخدام السبائك، و يوضح الشكل (4-109) الزيادة في ترسيب كربيدات ($M_{23}C6$) في أخطاء الترصيص لسبيكة (MAR-$M_{10}2$) أثناء الاستخدام عند كسر السبيكة عند درجة الحرارة (870) مئوية.

جدول (4-44): الكربيدات المتكونة في سبائك الكوبلت المتفوقة.

السبيكة	الكربيدات المتكونة
S- 816	$M_{23}C_6$, M_6C
HA – 25 (L-605)	M_6C, $M_{23}C$
HS – 31 (X-40)	M_7C_3, M_6C, $M_{23}C_6$
HS – 21 (تعديل سبيكة فيتاليوم)	M_7C_3, $M_{23}C_6$, M_6C, Cr_2C_3
J – 1570	M_6C
J – 1650	M_6C, $M_{23}C_6$, Cr_3C_2
MAR - M302	MC, $M_{23}C_6$, M_6C
MAR - M509	MC, $M_{23}C_6$,(Co,Cr,W)C
UMCO - 50	(Co, Cr, Fe)C
AiResist213	(Ta, Zr) (C,N)
WI – 52	MC, M_6C, $M_{23}C_6$
HA – 188	M_6C, $M_{23}C_6$

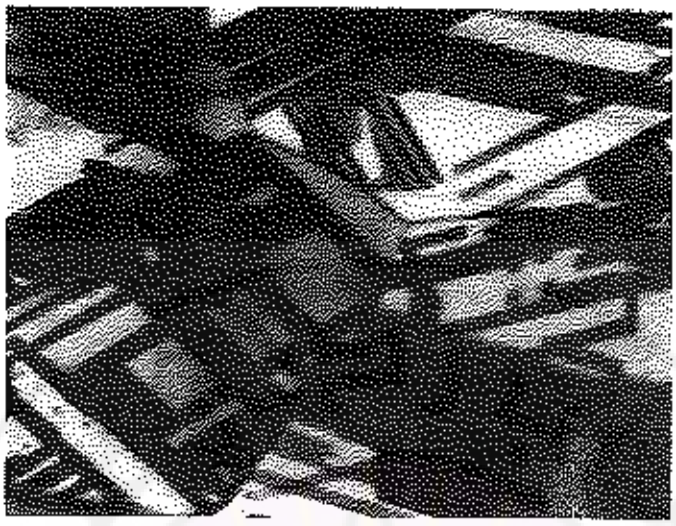


الشكل (4- 107): الكربيدات المتكونة في سبائك الكوبلت وعلاقتها بالعناصر السبائكية.

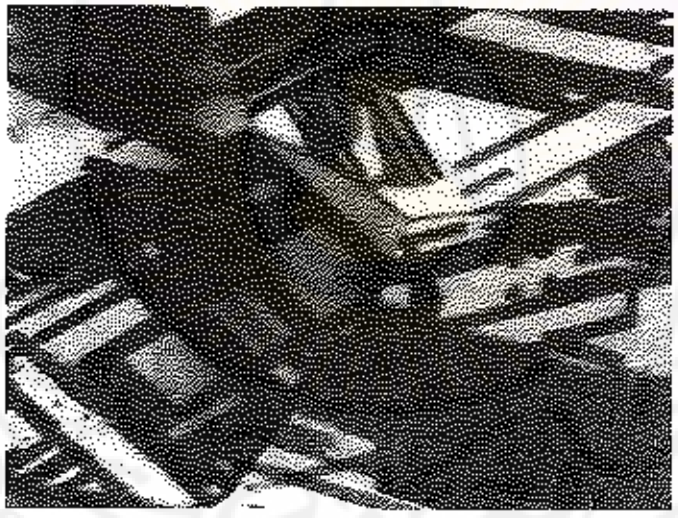
ولكن يعيب ترسيب الكربيدات سواء داخل أخطاء الترصيص أو على حدود الحبيبات تخفيض مطيلية سبائك الكوبلت بدرجة كبيرة، وفي واقع الأمر فإن انخفاض قيمة المطيلية هو مشكلة كبيرة في معظم سبائك الكوبلت.

وتتغير الكربيدات، في النوع والتركيب البنائي، على حسب نوع المعاملة الحرارية التي تتعرض لها السبيكة، وتغير الكربيدات أمر مهم، نظراً لأنه يتحكم في خواص السبائك، ولهذا سيتم إفراد جزء خاص بتحويل الكربيدات في سبائك الكوبلت فيما بعد.

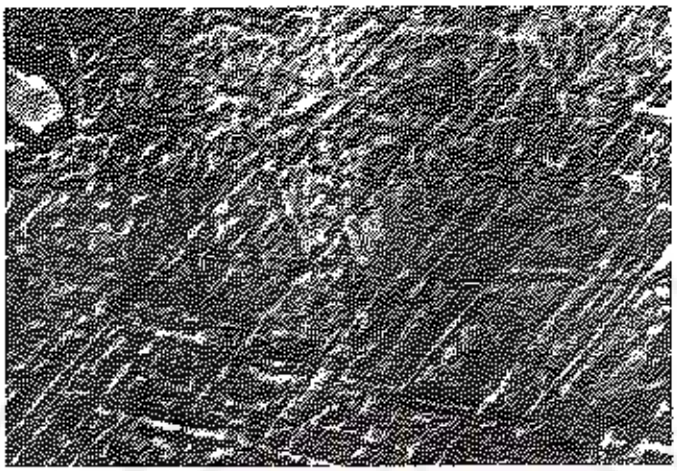
إن أهم المتطلبات في سبائك الكوبلت – كما سبق بيانه – هي مقاومة التآكل و الأكسدة عند درجات الحرارة العالية، وكذلك مقاومتها الميكانيكية العالية للإجهادات و الأحمال المؤثرة على السبيكة عند درجات الحرارة العالية، أي مقاومة عالية للزحف.و يلاحظ وجود تداخل بين تأثير هذين العاملين كل واحد على الآخر، أي أنهما مرتبطان في تأثيرهما، فعندما تتعرض المادة للتآكل الساخن فإن ذلك يعني تخفيض مقاومة المادة، كما تزيد الإجهادات المؤثرة على المادة من معدلات تآكلها.



الشكل (4- 108(أ)): أخطاء الترصيص في سبيكة الكوبلت (UMCO-50) باستخدام المجهر الإلكتروني.



الشكل (4- 108(ب)): صورة بالميكروسكوب الإلكتروني لقطاع في سبيكة الكوبلت (UMCO-51) موضح فيها أخطاء الترصيص بالإضافة إلى كربيدات النيوبيوم المترسبة، وتبدو الكربيدات باللون الأسود.



الشكل (4- 109): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة الكوبلت (MAR-M203) المكسورة عند درجة الحرارة (870 °C)، ويتضح في الصورة كربيدات ($M_{23}C_6$) المترسبة في أخطاء الترصيص. لاحظ كمية الكربيدات الثانوية الكثيرة المترسبة في أخطاء الترصيص.

4-7-5-4: المعالجة الحرارية لسبائك الكوبلت:

Heat treatment of cobalt-base alloys

يعد التركيب البنائي لسبائك الكوبلت المتفوقة أقل تعقيدا من سبائك النيكل المتفوقة، وكذا من تركيب سبائك النيكل – حديد المتفوقة. وفي كثير من الأحوال يكون التركيب المجهري لسبائك الكوبلت عبارة عن كنان أوستونيتي يتركب من حوالي (50%) كوبلت وحوالي (25%) كروم، والبقية غالبا نيكل وعناصر حرارية أخرى مثل التنجستن والتنتالم والحديد أو الموليبدنوم، والبناء البلوري في هذه الحالة هو مكعب متمركز الوجه. ونظرا لأن الكوبلت من العناصر ذات التأصل البلوري، حيث يتحول من مكعب متمركز الوجه إلى مسدس عالي الحشو عند درجة الحرارة (400 °م)، وهذا بطبيعة الحال أمر غير مرغوب فيه، نظرا لأن طبيعة استخدام السبيكة تتطلب العمل عند درجات حرارة عالية، ثم تنخفض درجة حرارة السبيكة بعد ذلك لدرجة الحرارة العادية عند إيقاف التربينة، لذا فلا بد من تثبيت البناء البلوري في صورة مكعب متمركز الوجه مع وجود بعض طبقات من المسدس عالي الحشو وتسبب الأخيرة أخطاء الترصيص.

وتزيد بعض العناصر المضافة إلى سبيكة الكوبلت مثل النيكل والحديد والزركونيوم والتنتالم من طاقة أخطاء الترصيص، أي أنها تعمل على تثبيت التركيب البلوري المكعب، بينما تقلل بعض العناصر الأخرى مثل الكروم والموليبدنوم والتنجستن من طاقة أخطاء الترخيص، أي أنها تعمل على تثبيت تركيز السدس عالي الحشو، أي أن عناصر : الكروم والموليبدنوم والتنجستن تساعد على تكوين أخطاء الترصيص في سبائك الكوبلت المتفوقة.

تؤثر المعالجة الحرارية التي تجري على سبائك الكوبلت على تركيبها البنائي وبالتالي خواصها الميكانيكية ومقاومة التآكل، ويوضح شكل (4-110) أثر المعالجة الحرارية على البنيان الميكروسكوبي لسبيكة (MAR-M509). ففي حالتها المصبوبة يتكون التركيب البنائي من كربيدي (M_6C) و($M_{23}C_6$) شكل (4-110 (أ)) وبعد إجراء المعالجة المحلولية الحرارية عند درجة الحرارة (1275) مئوية لمدة أربع ساعات تختفي حدود الحبيبات، كما في شكل (4-110 (ب)) ونحصل على كربيدات (M_6C) الناشئة عن تحول كربيدات (MC) ولكن تظل بعض كربيدات ($M_{23}C_6$) على حالها دون إذابة ويؤدي التزمين لمدة (24) ساعة عند درجة الحرارة(925 °م) إلى ترسيب حبيبات من كربيدات (M23C6) بكميات كبيرة على حدود حبيبات السبيكة، كما هو موضح في شكل (4-110(ج)) ولكن بعد (732) ساعة من التسخين عند درجة الحرارة (1100) مئوية – وهذه تشبه ظروف العمل التي تتعرض لها التربينات الغازية – فإن جزءا من كربيدات ($M_{23}C_6$) تنمو وترسب في صورة حبيبات كبيرة الحجم، أما الحبيبات الدقيقة من كربيدات ($M_{23}C_6$) فيزيد حجمها كذلك وتتوزع بانتظام في كنان السبيكة، كما هو موضح في شكل (4-110 (د))، ولكن يصاحب المعالجة الحرارية انخفاض كبير في مطيلية هذه السبائك عند درجات الحرارة العادية، كما تضعف كثيرا مقاومة السبيكة، وهذا أحد عيوب السبائك المتفوقة، حيث تقل بعد زمن طويل من الاستعمال مطيليتها وتنخفض مقاومتها للزحف، وبوجه عام تضعف خواصها الميكانيكية.

إن دراسة البنية الداخلية للسبائك التي توضح طبيعة وموقع ترسب الكربيدات أمر مهم، فقد وجد أن كيفية توزيع الكربيدات تؤثر إلى حد بعيد على مقدار المقاومة (والمقاومة هنا تقاس إما بمقدار مقاومة الزحف أو مقدار لإجهاد الكسر)، كما أثبتت الدراسات أن الحصول على أحسن الخواص وأفضلها يكون في حالة ترسيب الكربيدات على حدود الحبيبات وبداخلها، فترسيب الكربيدات على حدود الحبيبات يمنع الانزلاق وهجرة الحدود (وبالتالي يعوق عملية التشكيل)، ولذا كانت الكربيدات في صورة مستمرة على حدود الحبيبات أي في صورة سلسلة مستمرة، فإن

هذا يمكنها من أن تقاوم جزءا كبيرا من الإجهادات التي تتعرض لها المادة أما في حالة ترسيب الكربيدات داخل الحبيبات فيقوى البناء الشبكي (بنية المادة)، نظراً لأن الكربيدات تعمل في هذه الحالة كعقبات لحركة الانخلاعات وعوائق في وجهها، وبالتالي تمنع الانزلاق البلوري (crystalline slip). ويعتمد توزيع الكربيدات في البداية على الظروف الأولية للتجمد مثل: درجة حرارة صب المصهور الفلزي، ومعدل التبريد أثناء وبعد التجمد، ولا تتعرض معظم السبائك المصبوبة بعد ذلك لأية معالجة حرارية فيما عدا التسخين عند درجات حرارة منخفضة جداً حوالي (200) درجة مئوية لإزالة الإجهادات الداخلية، ولا تؤثر مثل هذه المعالجة على توزيع الكربيدات، ولذا يظل التركيب الميكروسكوبي الأولي كما هو من دون تغيير، ولهذه الأسباب فإن من المهم التحكم وضبط درجة حرارة الصب (السباكة) وكذلك ضبط معدل التبريد من خلال استخدام القوالب المناسبة للحصول على أفضل الخواص.

ونظرا لأن سبائك النيكل والكوبلت المتفوقة تعمل دائما عند درجات الحرارة العالية، فإنه من المفيد التعرف على خواص هذه السبائك عند درجات الحرارة العالية، ويوضح الجدول (4-45) إجهادات الكسر لعدد من سبائك الكوبلت المتفوقة كما يبين الشكل (4-111) تأثير درجات الحرارة على إجهادات الكسر لعدد من هذه السبائك، ويقارن الشكل (4-112) بين إجهادات الكسر عند درجات الحرارة العالية لسبائك الكوبلت والنيكل المتفوقة، ويتضح من الشكل أن:

1- مقاومة سبائك الكوبالت للشد أقل من مثيلاتها لسبائك النيكل.

2- مقاومة شد سبائك الكوبلت عند درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة ليست كافية لكي تستعمل كقاعدة للتوربينات الغازية المتحركة.

وترجع محدودية مقاومة سبائك الكوبلت عند درجات الحرارة المتوسطة إلى عدم ترسيب الوجه (γ') المتماسك مع كتان السبيكة، ويترسب هذا الوجه في سبائك النيكل هو سر تفوقها في مقاومة الشد. ولا يمكن أن تنافس أو أن تقارن مقاومة سبائك الكوبلت التي تقوم على أساس تكون المحلول الجامد وترسيب الكربيدات بسبائك النيكل التي أساس مقاومتها ترسيب الوجه (γ') ولذا تستخدم سبائك الكوبلت في التطبيقات المعمرة التي تتطلب إجهادات أقل عند درجات الحرارة العالية مثل ريش التوربينات الصناعية.

4-7-5-5: سبائك الكوبلت التجارية:

إن أول مجموعتين من سبائك الكوبلت التي تم تطويرهما للعمل في الظروف المختلفة هما:

المجموعة الأولى: طورت هذه المجموعة للعمل عند درجات حرارة عالية في ظروف تآكل شديدة، ولكن الإجهادات المؤثرة على المادة منخفضة ، كما في حالة مكونات الأفران وأجهزة المعالجة الحرارية وبعض مركبات الغلايات وأوعية التفاعل.

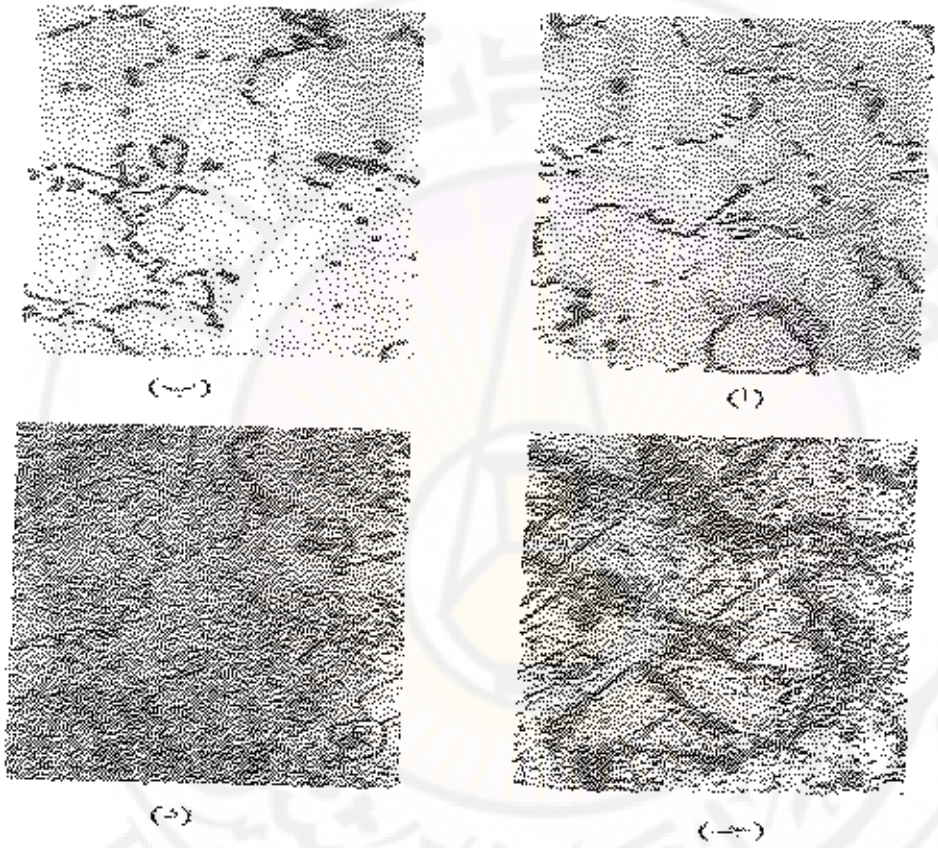
المجموعة الثانية: لقد طورت هذه المجموعة للعمل في ظروف تآكل ساخن شديد عند مستويات عالية من الإجهادات مثل زعانف التربينات البخارية والغازية، وأنابيب الغلايات ذات الضغط العالي.

وهكذا يمكن القول إن سبائك الكوبلت المتفوقة تستخدم في تصنيع بعض أجزاء التربينات الصناعية (غازية أو بخارية) نظرا لأن هذه الأجزاء أقل تعرضا للتآكل على الساخن من الأجزاء المصنوعة من سبائك النيكل المتفوقة حيث إن مقاومة سبائك النيكل المتفوقة للتآكل الساخن، وكذلك مقاومتها للأكسدة أفضل من مقاومة سبائك الكوبلت. ولكن سبائك الكوبلت تفوق سبائك النيكل في عدم تأثر خواصها الميكانيكية بعامل الزمن – وذلك على الرغم من أن مقاومة سبائك النيكل أفضل من مقاومة سبائك الكوبلت – مما يجعلها أكثر فائدة وأكثر استعمالاً في الأجزاء المعرضة للإجهادات القليلة الثابتة عند درجات الحرارة العالية. ولذلك تستخدم سبائك الكوبلت المتفوقة في معظم الأحيان في مقسم مروحة موجه الفوهة المستخدمة في التربينات الصناعية وبعض محركات الطائرات.

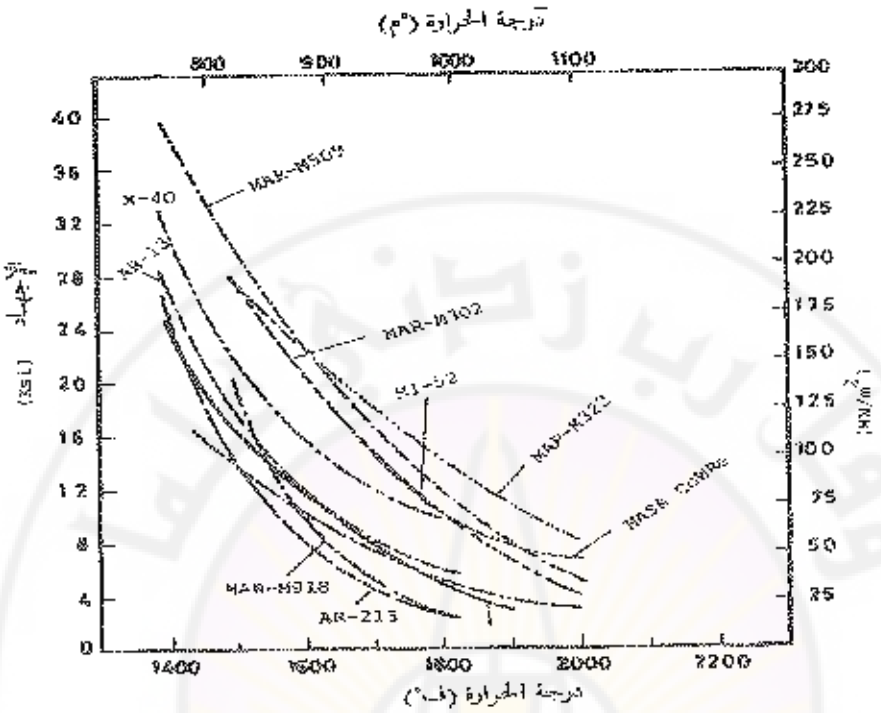
1: سبائك الكوبلت المقاومة للحرارة:

تتطلب مواصفات سبائك الكوبلت المقاومة للحرارة فقط مقاومة للتآكل في الأوساط المحيطة في ظروف العمل عند درجات الحرارة العالية، والوسط المحيط في هذه الظروف يشبه إلى حد بعيد ظروف التربينات الغازية. ولقد استخدمت في الماضي ومنذ زمن طويل سبائك الكوبلت المحتوية على كروم بنسبة تتراوح بين (20%) و (30%) إضافة إلى حوالي (25%) حديد أو نيكل. وعرفت هذه السبائك بمقاومتها الجيدة للتآكل عند درجات الحرارة العالية، ولكنها لم تستخدم بتوسع كبير في التطبيقات الصناعية الأخرى نظراً لمحدودية خواصها مقارنة بسبائك النيكل – حديد – كروم التي تفوقت على سبائك الكوبلت لرخص التكلفة وانخفاض السعر، أي أن سبائك النيكل كانت أكثر اقتصادا، ولهذا فقد استخدمت أكثر من سبائك الكوبلت ولكن في السنوات العشر الأخيرة زاد استخدام سبائك الكوبلت – حديد – كروم ووجدت مجالات أوسع في الاستعمال، وخاصة في الأجزاء غير المعرضة لأية إجهادات، كأجزاء الأفران والأجهزة المساعدة في

الصناعات الغازية، حيث يتطلب الأمر فقط مقاومة الأكسدة والتآكل الساخن مع قدر مناسب من المقاومة عند درجات الحرارة العالية، وكذلك مقاومة للصدمات الحرارية ومقاومة البلى والتحات الميكانيكي. وأشهر وأهم سبيكتين مستخدمتين في هذا المجال سبيكتان في جدول (4–46)، وكلتا السبيكتين ذات تركيب بلوري مزدوج، وكذا تركيب بنائي مزدوج – وجهين– تحتفظ بهما السبيكتين عند درجات الحرارة العالية، وهما سكب متمركز الوجه ومسدس عالي الحشو.



الشكل(4-116): تأثير المعالجة الحرارية على التركيب البنائي لسبيكة (MAR-M509).
(أ): في الحالة المصبوبة.
(ب): معالجة محلولية حرارية عند درجة الحرارة (1275 °C)، لمدة أربع ساعات.
(ج): تزمين لمدة (24) ساعة عند درجة الحرارة (925 °C)، للسبيكة في الحالة (ب).
(د): إعادة تسخين السبيكة في الحالة (ج) لمدة (72) ساعة عند درجة الحرارة (1100 °C).

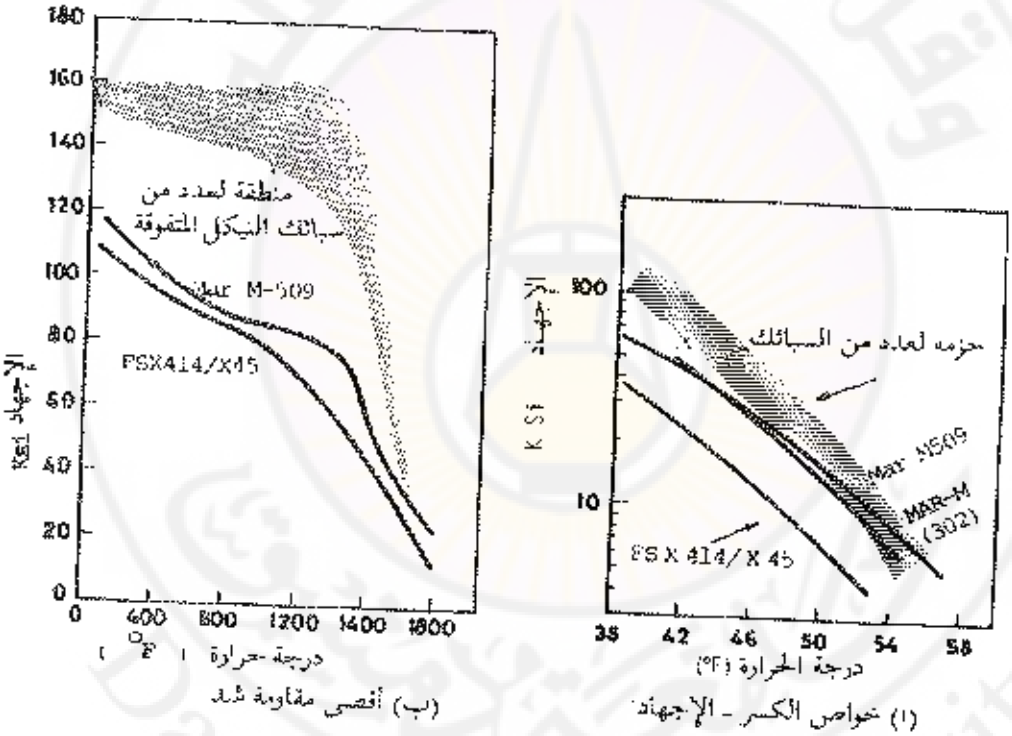


الشكل (4- 111): علاقة إجهادات الكسر بعد ألف ساعة مع درجات الحرارة لعدد مختار من سبائك الكوبالت المتفوقة.

وترجع مقاومة هذه السبائك عند درجات الحرارة العالية إلى وجود أخطاء في الترصيص بين الوجهين الموجودين بها. وعند إضافة النيوبيوم إلى سبائك الكوبلت – حديد – كروم تتكون كربيدات ذات درجات عالية من الثبات، وعند تسخين هذه السبائك لمدة طويلة عند درجة الحرارة (800 °م) فيحتمل ترسيب وجه جديد هو الوجه سيجما القصيف.

إضافة إلى السبيكتين المذكورتين في هذه المجموعة توجد سبائك أخرى تستخدم في الأغراض السابقة نفسها ولكنها أبسط في تركيبها الكيميائي وهي إما سبائك مطروقة أو سبائك مصبوبة شريطة أن لا تزيد نسبة الكربون فيها عن (0.12 %)، أما السبائك التي يضاف إليها عنصر النيوبيوم فتكون صورة مصبوبة. وتزيد ترسيبات كربيدات النيوبيوم في سبائك (UMCO-51) كثيراً من المقاومة عند درجات الحرارة العالية، كما هو موضح في جدول (4-47)، الذي يبين

مقادير إجهادات الكسر عند درجات الحرارة المختلفة لعدد من سبائك الكوبالت المقاومة للحرارة، و لكن على الرغم من ارتفاع قيمة إجهادات الكسر لهذه السبائك إلا أنها ما زالت أقل من إجهادات كسر سبائك الكوبالت المتفوقة المبينة في جدول (4-48)، و كما هو معروف فإن صلادة هذه السبائك تعتمد على نسبة الكربون المضاف، و كذلك على معالجاتها الحرارية، و رقم صلادة فيكرز لسبيكة (UMCO-50) في الحالة المصبوبة هو (250)، أما في حالتها الطروقة و بعد التلدين فيصل إلى حوالي (350). و يتراوح رقم فيكرز لصلادة سبيكة (UMCO-51) ما بين (280) و (350)، و يرتبط التغير في الصلادة بتغير نسبة الكربون في السبيكة، و الذي يتراوح ما بين (0.25٪) و (0.4٪) للسبيكتين.



الشكل(4-112): الخواص الميكانيكية الممثلة لسبائك الكوبلت مقارنة بمجموعة من سبائك النيكل المتفوقة.

جدول (4-45): متوسط مقدار إجهاد الكسر لبعض سبائك الكوبلت المتفوقة عند درجات الحرارة العالية.

السبيكة	إجهاد الكسر MPa							
	815 °C		870 °C		980 °C		1059 °C	
	110h	1000h	100h	1000h	100h	1000h	100h	1000h
السبائك المصبوبة								
HS21	152	98	115	91	65	48	--	--
X40	179	138	134	103	76	55	--	--
Mar M 509	269	228	200	138	200	228	55	38
FSX 414	152	117	110	83	119	117	21	--
السبائك المطروقة								
S 816	172	124	107	69	107	124	--	--
L 605	165	117	107	72	107	117	--	--
J 1570	228	165	158	110	158	165	--	--
HA 188	154	110	105	70	41	25	15	--
Mar M918	207	138	110	76	41	22	17	--

جدول (4-46): التركيب الكيميائي لسبائك الكوبلت المقاومة للحرارة (Batteridge 1979).

السبيكة	النسبة المئوية للوزن				
	Co	Cr	C	Nb	Fe
UMCO50	50	28	0.12 - 0.05	-	– 21.95
UMCO51	50	28	0.40 – 0.25	2.2 – 2.0	21.88

جدول (4-47): إجهادات كسر سبائك الكوبالت المقاومة للحرارة.

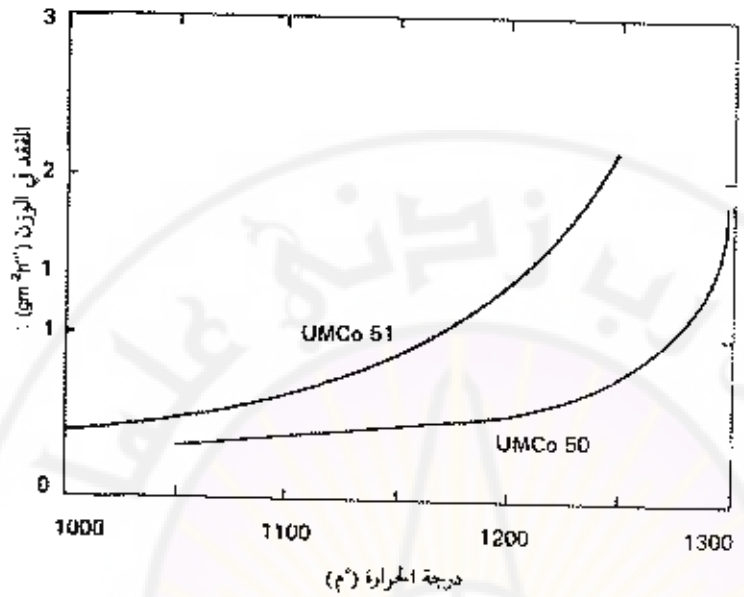
السبيكة	إجهاد الكسر MPa							
	700 °C		800 °C		900 °C		950 °C	
	100h	1000h	100h	1000h	100h	1000h	100h	1000h
سبائك مطروقة UMCO 50	172	117	71	47	30	8	19	12
سبائك مصبوبة UMCO 50	-	-	-	-	-	-	17	11
UMCO 51 (0.36% C)	-	-	148	108	71	53	59	41

إن مقاومة سبيكتي (UMCO-50) و (UMCO-51) للصدمات الحرارية تساوي مقاومة سبائك الفولاذ الأوستنيتي ذي نسبة الكربون العالية للصدمات الحرارية و تظهر بعض الاختبارات أن مقاومة سبائك الكوبالت للصدمات الحرارية أفضل من سبائك الفولاذ، أما مقاومة سبيكتي (UMCO-50) و (UMCO-51) للأكسدة. فتقارن بمقاومة سبائك الفولاذ المقاوم الصدأ المحتوية على (25٪) كروم + (20٪) نيكل في مدى واسع من درجات الحرارة يصل إلى (1200) درجة مئوية، و لقد أثبتت نتائج اختبارات الأكسدة أن مقاومة سبيكة (UMCO-50) أفضل من مقاومة سبيكة (UMCO-51) عند درجات الحرارة الأعلى من (1000) مئوية كما هو موضح في الشكل (4-113). وتمتاز هاتان السبيكتان بمقاومة التآكل الساخن في الأوساط المؤكسدة المحتوية على الكبريت، وكذلك تقاومان تآكل الخبث وبخاخات احتراق الزيت الثقيل.

جدول (4-48): مقاومة الكسر لبعض سبائك الكوبالت المتفوقة.

السبيكة	مقاومة الكسر (MPa), ksi					
	815 °C		985 °C		1095 °C	
	100h	1000h	100h	1000h	100h	1000h
السبائك المصبوبة						
X – 40	26 (182)	20 (140)	11 (77)	8 (56)	4.1 (29)	
FSX – 414	22 (154)	17 (114)	8 (56)	5 (35)	3.1 (22)	
MAR - M302	40 (280)	30 (210)	16 (112)	11 (77)	6.0 (42)	4.0 (28)
MAR - M322	40 (280)	28 (146)	20 (140)	15 (105)	10.0 (70)	
MAR - M509	39 (273)	33 (231)	17 (119)	13 (91)	8.0 (56)	5.5 38.5
AR – 213	20 (140)	13 (91)	5 (35)	3.5 (24.5)	2.8 (20)	
السبائك المطروقة						
S – 816	25 (175)	18 (126)				
HS – 188	22 (154)	16 (112)	6 (42)	3.6 (25)	2.2 (15.4)	

إن أهم استخدامات سبائك الكوبالت المقاومة للحرارة هي في صناعة أفران المعالجة الحرارية التي تعمل عند درجة حرارة تصل إلى (1100) درجة مئوية، وتكون الظروف فيها إما مؤكسدة أو مكبرتة نتيجة احتراق الوقود، أو من الأبخرة المتصاعدة من أوساط التبريد السريع المفاجئ (quenching media). و الأجزاء المصنعة من هذه السبائك هي الصواني و الشبكات المصبعة (grates)، و قاعدة الفرن و سلاسل التبريد، و لقد أثبتت الدراسات على تصنيع هذه الأجزاء من تلك السبائك أنها اقتصادية للغاية، كما تستخدم هذه السبائك في صنع البواشق و الحوامل (racks) في حمامات المعالجة الحرارية و لها المميزات نفسها والكفاءة نفسها كما في أفران المعالجة الحرارية. و تصنع من هذه السبائك أيضاً أفران إعادة التسخين لعمليات الدلفنة و الطرق، وكذلك تصنع منها أفران الصهر و استخلاص النحاس.



الشكل (4- 113): مقارنة بين معدل أكسدة سبيكتي (UMCO 50) و (UMCO 51) في الهواء الساخن عند درجات حرارة مختلفة لزمن قدره (500) ساعة.

2: سبائك الكوبالت المتفوقة (Cobalt superalloys):

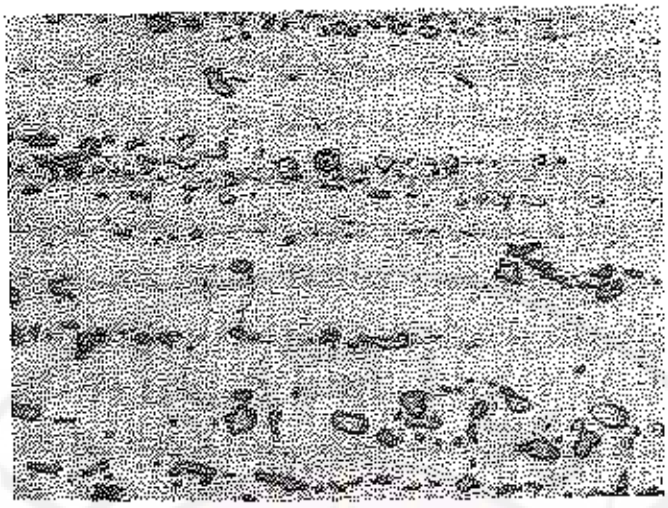
يطلق مصطلح سبائك الكوبالت المتفوقة على سبائك الكوبالت المتفوقة على سبائك الكوبالت التي تتمتع بالخواص الميكانيكية الجيدة عند درجات الحرارة العالية، إضافة إلى مقاومة متميزة للأكسدة والتأكل في ظروف عمل تحتوي على الأكسجين والكبريت والهاليدات وغيرها كما سبق ذكره، ويطلق على السبائك المستخدمة في هذه الظروف التي تعمل بنجاح اسم سبائك الكوبالت المتفوقة. وتستمد هذه السبائك مقاومتها الميكانيكية من عاملين أساسيين هما؛ تكون المحلول الجامد وكذلك ترسيب الكربيدات. ويوضح الجدولان (4-42) و (4-43) التركيب الكيميائي لعدد من هذه السبائك. وتنقسم سبائك الكوبلت المتفوقة إلى نوعين: السبائك المصبوبة وهي التي يتم الحصول على الأشكال المصنعة عن طريق الصب، أما النوع الأخر فهو السبائك المطروقة (أو الطروقة) وهي السبائك التي تشكل الأجزاء المصنعة منها بالتشكيل على البارد أو الساخن.

يتضح من الجدولين (4-42) و (4-43) أن سبائك الكوبالت المتفوقة تتكون من كوبالت – كأساس للسبيكة - بالإضافة إلى احتوائها على نسبة (25٪) كروم (وهي أقل نسبة لمقاومة الأكسدة)، وفي بعض الأحيان يحل النيكل محل الكوبالت بنسبة تصل إلى (30٪) كما يضاف إليها (15٪) تنجستن، ولقد استخدم في فترة من الفترات عنصر الموليبدنوم محل التنغستن – نظراً لكثافة التنغستن العالية التي تزيد كثيراً من وزن السبيكة – ولكن هذا الإحلال لم يستمر طويلاً لأن أكاسيد الموليبدنوم المتكونة ذات درجات حرارة انصهار منخفضة، و بالتالي تساعد على صهر وإزالة طبقة الأكسيد الواقية – أكسيد الكروم – وكذلك نتيجة تفاعلها مع كبريتات الصوديوم عندما تترسب على السطح. كما تضاف بعض العناصر الأخرى وبخاصة العناصر ذات الألفة الكيميائية (chemical affinity) العالية مع عنصر الكربون لتكوين الكربيدات – ومن هذه العناصر: التنتالم أو الزركونيوم أو الفاناديوم – بنسب صغيرة، ولكن قد تصل نسبة العناصر المضافة في مجموعها في بعض الأحيان إلى (9٪). وتتراوح نسبة الكربون في السبائك الطروقة ما بين (0,05٪) و (0,4٪) و خاصة للسبائك التي يتم دلفنتها على الساخن حتى تكون المطيلية مناسبة لإجراء عمليات التشكيل.

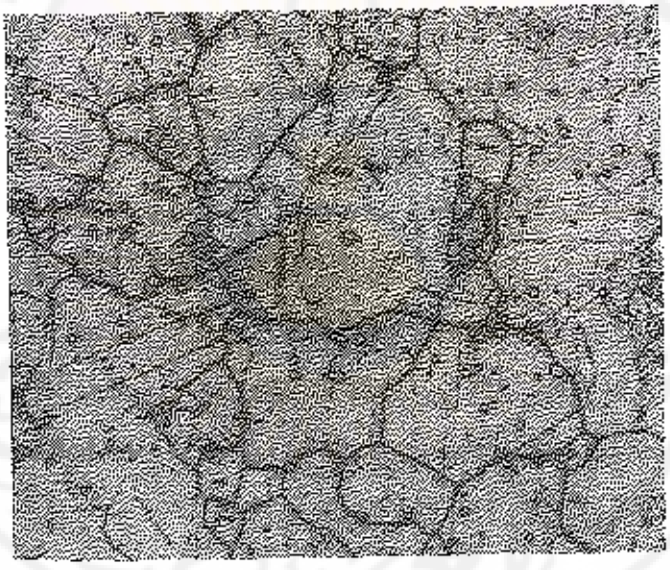
و تستمد سبائك الكوبالت المتفوقة – كما سبق ذكره – مقاومتها من مصدرين أساسيين؛ أحدهما: المقاومة الناتجة عن المحلول الجامد و المصدر الأخر هو تكوين الكربيدات. وتعتمد المقاومة الناتجة من المحلول الجامد على كمية عناصر السبائكية التي لا تترسب في صورة كربيدات أو في مركبات فلزية متداخلة. فمثلاً يحوي المحلول الجامد غالباً على الكروم والتنغستن والنيوبيوم و التنتالم، وفي حالة إضافة النيكل إلى السبيكة فإنه يسهم جزئياً في المحلول الجامد ولكن النظرة العامة للنيكل أنه عنصر لتثبيت البناء البلوري المكعب، و بهذا تتجنب السبيكة عدم الثبات المرتبط بالتغير إلى النظام البلوري المسدس عالي الحشو . ويرتبط الشق الثاني من التقوية بالكربيدات، وأحياناً خليط من الكربيدات والنتريدات، والتي يدخل فيها الكروم إضافة إلى عناصر التنغستن والموليبدنوم والنيوبيوم والتنتالم والزركونيوم والفاناديوم والتيتانيوم، وقد سبق بيان أنواع الكربيدات. وتعتمد الكربيدات المتكونة على عناصر السبائكية المضافة للسبيكة ونسبة الكربون ونوع المعالجة الحرارية للسبيكة، وفي بعض الأحيان يمكن أن يحل النتروجين محل الكربون في السبائك لتكوين النتريدات التي تقوم بعمل الكربيدات نفسها لتقوية سبائك الكوبالت المتفوقة.

لا تتم المعالجة الحرارية لسبائك الكوبالت المتفوقة إلا عند درجات الحرارة المنخفضة، بحيث لا تؤثر المعالجة على الكربيدات المتكونة والمترسبة، ولكن ظروف العمل عند درجة الحرارة العالية قد قدمت التساؤلات عن التغييرات التي تحدث للكربيدات عند درجات الحرارة العالية ومدى تأثير ذلك على خواص السبائك، وهناك تساؤل آخر عن تأثير عامل الزمن على خواص سبائك الكوبالت المتفوقة عند درجة الحرارة العالية. والخواص التي يهتم بها مستعمل هذه السبائك عند درجات الحرارة العالية هي معدلات الزحف وإجهادات الكسر أو مقاومة الكلال عند درجات حرارة الاستعمال. وعلى الرغم من أن بعض الخواص التي تظهرها اختبارات سبائك الكوبالت المتفوقة عند درجات الحرارة العالية مثل مقاومة الشد والصلادة ومعامل (ينج) للمرونة التي يظهر أثرها على المدى القصير وبعض الخواص الفيزيائية الأخرى التي يمكن أن تكون سهلة إلا أنها لاتعطي دلالة واضحة عن هذه السبائك وتصرفاتها عند درجات الحرارة العالية وبوجه خاص في المدى الطويل من الاستعمال. ولذلك فإن الجزء التالي يستعرض تأثير درجات الحرارة على طبيعة الكربيدات ومقاومة السبيكة، إضافة إلى تأثير عامل الوقت على هذه الخواص.

يوضح الشكل (4-114) التركيب الميكروسكوبي (HA-188) لإحدى سبائك الكوبالت المتفوقة المصبوبة، وفيها تترسب الكربيدات فقط على حدود الحبيبات، بينما يتضح من الشكل (4-115أ) ترسب كربيدات إضافية على حدود الحبيبات وداخلها عندما تمت معالجة السبيكة نفسها حرارياً عند درجة الحرارة (760) مئوية وهي مشابهة لدرجة حرارة الاستخدام لفترة، وذلك لمدة (500) ساعة. وتحدث الظاهرة نفسها في السبائك المطروقة مثل سبيكتي (S 816) و (HA-25) عند تشكيلها على الساخن عند درجات حرارة تتراوح ما بين (950) و (1230) درجة مئوية حيث تترسب الكربيدات داخل الحبيبات، إضافة إلى نمو حجم الحبيبات المترسبة من البداية على حدود الحبيبات، وتتحسن مقاومة هذه السبائك للزحف وكذلك تزيد إجهادات الكسر بالمعالجة المحلولية الحرارية عند درجات حرارة تتراوح ما بين (1175) و (1230) مئوية ثم التبريد السريع، وليس من المعتاد تزمين أو معالجة التزمين لهذه السبائك؛ نظراً لحدوث فرق التزمين (over aging) أثناء العمل، وبهذا تفقد السبيكة ما تم تحسينه أثناء المعالجة الحرارية. ويظهر من دراسة التركيب الميكروسكوبي لإحدى سبائك الكوبالت المتفوقة المطروقة بعد معالجتها حرارياً وجود الكربيدات الأولية غير المذابة على حدود الحبيبات، بينما تترسب كربيدات دقيقة على حدود الحبيبات بعد التزمين أو الاستخدام لمدة (50) ساعة عند درجة حرارة (760) مئوية.

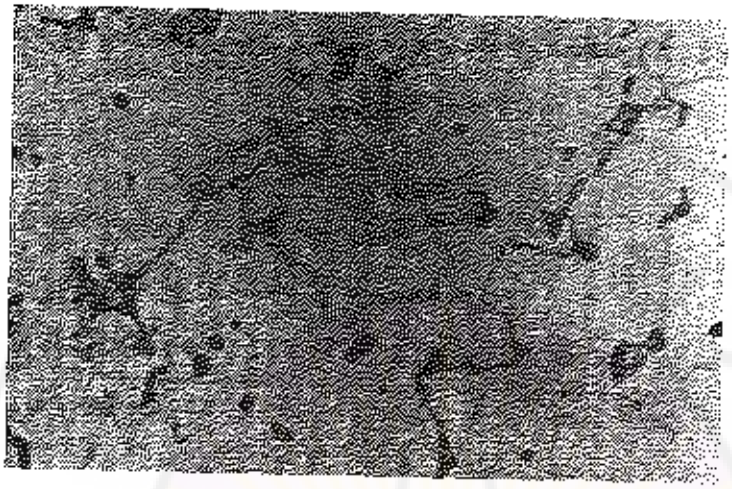


الشكل (4- 114): البناء الميكروسكوبي لسبيكة (HA-188) بعد تلدينها.

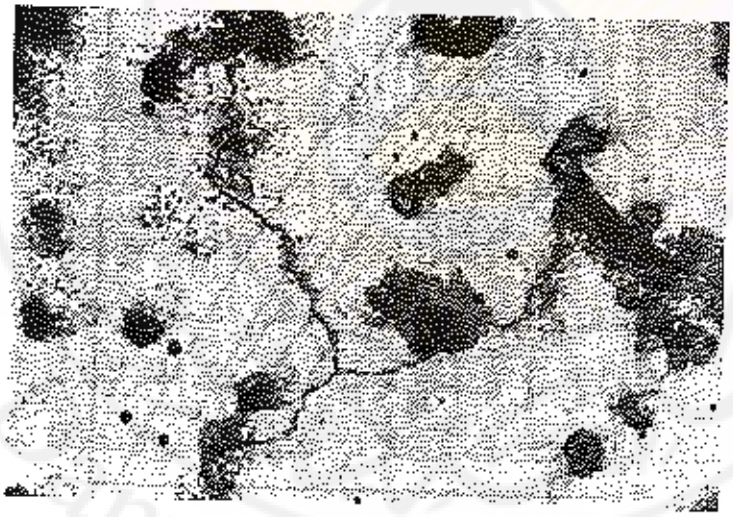


الشكل (4- 115): قطاع ميكروسكوبي للسبيكة الموضحة في شكل (4-114) - سبيكة (HA-188) بعد تلدينها، ثم معالجتها حرارياً لمدة (500) ساعة عند درجات الحرارة (760 °C).

كما يتضح من شكل (4-116)، بينما تترسب كربيدات دقيقة على حدود الحبيبات بعد التزمين أو الاستخدام لمدة (50) ساعة عند درجة الحرارة (760 °C)، كما هو موضح في شكل (4-117).



الشكل (4- 116): ترسيب الكربيدات على حدود حبيبات الكوبالت قبل التزمين.



الشكل (4- 117): إعادة توزيع الكربيدات في سبائك الكوبلت، حيث أنها تترسب داخل الحبيبات بعد التزمين، على العكس مما هو واضح في شكل (4-116) قبل التزمين.

وإضافة إلى التغير في التركيب البنائي الداخلي للسبائك نتيجة المعالجة الحرارية يصاحب هذا التغير ويلازمه تغير آخر في الخواص الميكانيكية، وهذا موضح في جدول (4-49) لعدد من سبائك الكوبلت المتفوقة، تم استخدامها أو تزمينها لفترات تتراوح ما بين (100) و (1000) ساعة عند عدة درجات حرارة مختلفة. ويعبر عن نتائج المعالجات الحرارية بعلاقة لارسون – ميللر والموضحة في المعادلة التالية:

$$P = T\,(20+\log t)$$

حيث:

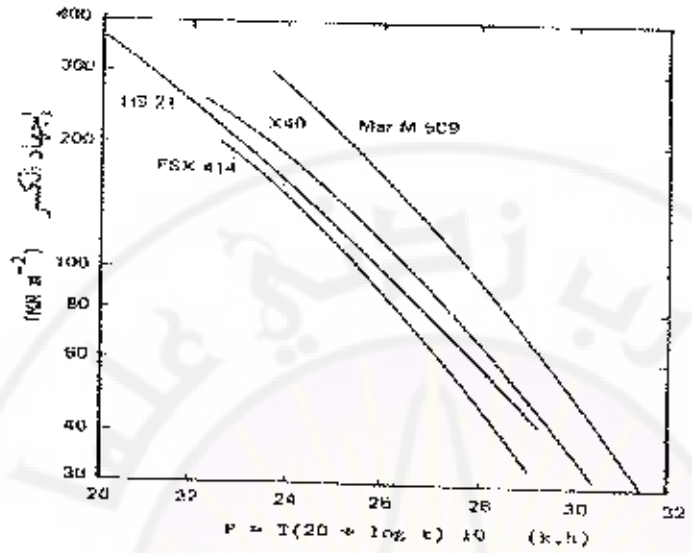
(T) درجة الحرارة بالمقياس المطلق K.

(t) زمن المعالجة أو الاستخدام بالساعة.

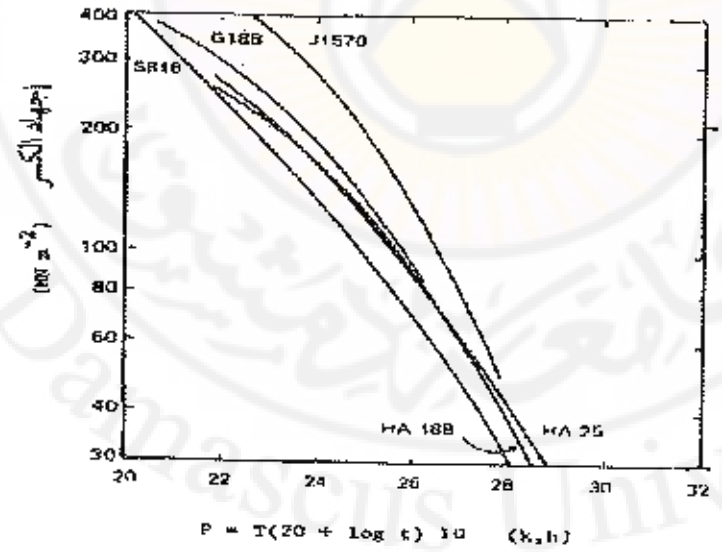
ويوضح الشكلان (4-118) و (4-119) هذه العلاقة لعدد من سبائك الكوبلت المتفوقة المصبوبة والطروقة.

إن خواص الشد لسبائك الكوبالت المتفوقة لا تعني كثيرا بالنسبة لاستخدامها، ولا تعطي أي مدلول عن تصرفات المادة عند درجات الحرارة العالية، لكن التعرف على قيم مقاومة الشد مفيد و يعطي دلالة – على الأقل – عن إمكانات تصنيعها.

وبجانب قيم مقاومة الشد فإن المطيلية من الخواص المهمة التي يجب التعرف عليها للتحكم في كمية التشكيل على الساخن أو البارد التي يمكن إجراؤها على السبيكة دون أن تنهار أو تفشل. ومما لا شك فيه أن كلا من مقاومة الشد والاستطالة تعتمد إلى حد بعيد على الشكل المطلوب تصنيعه والمعالجة الحرارية للمادة كما هو مبين في الشكل (4-120) لسبيكة (HS-21). ففي حالة السبيكة المصبوبة تبلغ الاستطالة حوالي (8 ٪) عند درجات الحرارة العالية، وتزيد إلى مقدار معقول بزيادة درجة الحرارة بعد التزمين لمدة (50) ساعة عند درجة الحرارة (740) مئوية، ولكن التصليد بترسيب الكربيدات يقلل المطيلية لتصل إلى (1٪) عند درجة الحرارة العادية، وتزيد المطيلية فقط عند درجات الحرارة الأعلى من درجة حرارة التزمين.

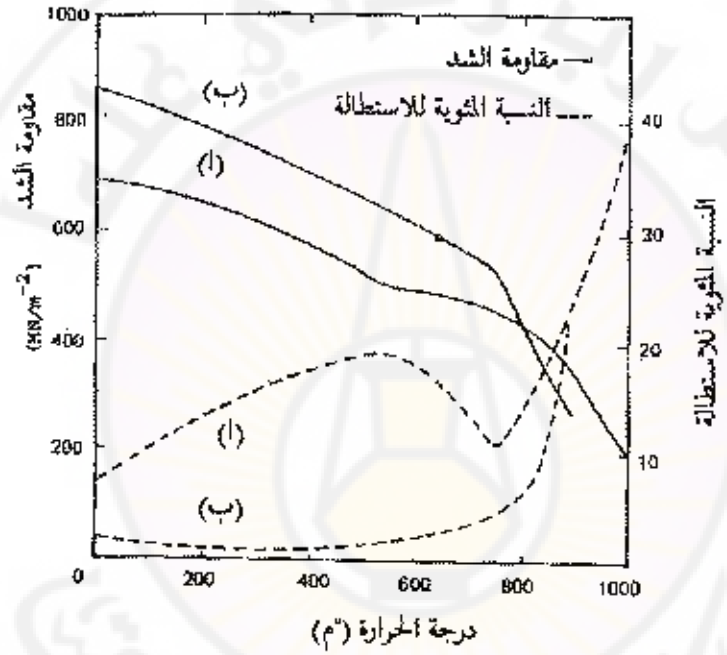


الشكل (4- 118): منحنيات لارسون – ميلر لبعض سبائك الكوبلت المتفوقة المصبوبة.



الشكل (4- 119): منحنيات لارسون – ميلر لبعض سبائك الكوبلت المتفوقة المطروقة.

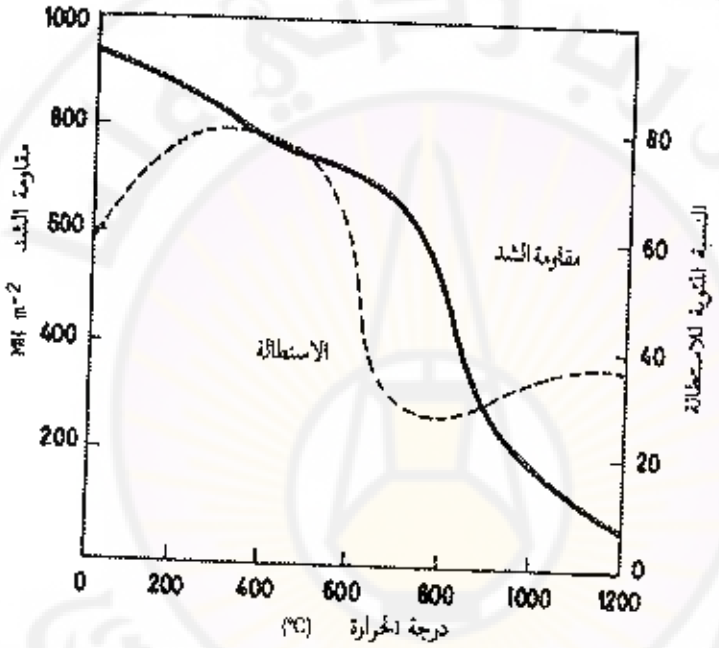
يتضح أيضا من الشكل (4-120) أن هناك اختلافاً بين السبائك المصبوبة والسبائك الطروقة، حيث إن السبائك الطروقة غالبا ذات مقاومة شد ومطيلية أقل من السبائك المصبوبة، وزيادة المطيلية لهذه السبائك تجعلها أفضل في تصنيع الأجزاء الفلزية في شكل ألواح من خلال التشكيل على البارد أو الساخن، ويمكن التعرف على كل الخواص المذكورة من دراسة خواص سبيكة (L 605) بعد المعالجة المحلولية الحرارية المبينة في الشكل (4-121).



الشكل (4- 120): خواص الشد لسبيكة (HS-21). (أ) في حالة الصب. (ب) بعد تزمين لمدة (50) ساعة عند درجة الحرارة (723 °C).

إن صلادة السبائك المتفوقة ليست على درجة كبيرة من الأهمية مثل الخواص الأخرى التي سبق ذكرها، ولكنها تستخدم فقط للدلالة على إمكانية التشغيل بالمكنات، كما تساعد على معرفة مدى قابلية المادة للتصليد بالترسيب، وبوجه عام فإن زيادة نسبة الكربون في السبيكة يزيد صلادة السبائك، ويظهر التأثير بصورة أوضح في السبائك المصبوبة عنه في السبائك الطروقة عند

درجات حرارة الاستخدام (العمل). وعلى سبيل المثال فإن سبيكة (X-40) (المصبوبة) رقم صلادتها على مقياس روكويل C للصلادة هو بين (R_c 30) و(R_c 34) عند درجة الحرارة العادية، يصل إلى (R_c 42) بعد التزمين عند درجة الحرارة (800) درجة مئوية، بينما تبلغ صلادة (L 605) (الطروقة) على نفس المقياس (R_c 24) ولا يتغير رقم الصلادة هذا كثيرا بالتزمين، لكن يزيد رقم الصلادة كثيرا ليصل إلى (R_c 57) بعد التشكيل على البارد وتخفيض المساحة السطحية بنسبة (50٪) ثم التزمين عند درجة الحرارة (600) مئوية.



الشكل (4- 121): خواص الشد لسبيكة (L 605) في شكل رقائق سمكها (2.8) مم بعد المعالجة المحلولية الحرارية عند درجة الحرارة (1200) درجة مئوية.

والخواص الميكانيكية الأخرى لسبائك الكوبالت المتفوقة ليست ذات أهمية، خاصة عند الاختيار أو الاستخدام، ولكن يلزم أحيانا التعرف عليها لأغراض التصميم وتصنيع الأجزاء والمركبات المختلفة. كما أن الخواص الفيزيائية لهذه السبائك ليست أيضا على قدر كبير من الأهمية، وهي لا تختلف كثيرا عن خواص سبائك النيكل المتفوقة المنافسة لها، ولهذا لا تؤثر الخواص الفيزيائية لسبائك الكوبالت المتفوقة من قريب أو من بعيد في عملية الاختيار لأي تطبيق، أو

غرض معين. وتتراوح كثافة سبائك الكوبالت المتفوقة بين (3□8 جم/سم^3) و (9□8 جم/سم^3)، وهي قيم مقاربة تماما لكثافة الكوبالت النقي، وفي حالة احتواء السبيكة على عنصر التنجستن تزيد الكثافة إلى قيمة أعلى من الرقم المذكور، كما أن معامل التمدد الطولي لسبائك الكوبالت المتفوقة مشابه لمعامل التمدد الطولي لسبائك النيكل، ويوضح جدول (4-49) معامل التمدد الحراري الطولي لسبائك الكوبالت عند درجات حرارة مختلفة، كما أن التوصيل الحراري لسبائك الكوبالت المتفوقة حوالي (15٪) من معامل التوصيل الحراري للكوبالت ، ويبين جدول (4-50) معامل التوصيل الحراري لسبيكة (HS-21) عند درجات حرارة مختلفة.

جدول (4-49): معامل التمدد الحراري الطولي لسبائك الكوبالت المتفوقة عند درجات حرارة مختلفة.

مدى درجة الحرارة (م°)	معامل التمدد الحراري الطولي $\times 10^6$ cm/cm.°C
200 – 20	13.1
650 – 20	15.3
760 – 20	15.8
870 – 20	16.2
980 – 20	16.6

جدول (4-50): علاقة معامل التوصيل الحراري لسبيكة (HS-21) بدرجات الحرارة.

درجة الحرارة (م°)	معامل التوصيل الحراري (W/mK)
200	14.5
300	16.0
400	17.5
500	19.0
600	20.5

4-8: الفلزات الثمينة وخلائطها:

4-8-1: تمهيد:

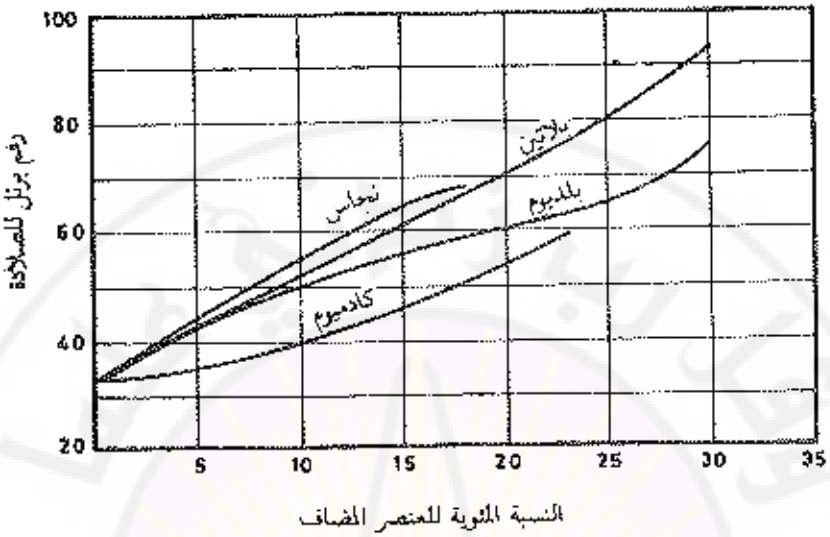
إن هناك فرقاً كبيراً بين الفلزات الثمينة (Precious Metals) والفلزات الكريمة (Hospitable Metals) ويحدث في كثير من الأحيان خلط بينهما يطلق البعض الأسماء دون تدقيق وتحديد. ولكي يكون الأمر واضحا للقارئ والباحث فقد رأينا أن نورد فقرة صغيرة عن تحديد معنى كل مجموعة وكذلك الصفات والخواص المميزة لكل منها. فالفلزات الثمينة هي العناصر

غالية الثمن ذات السعر المرتفع ويرجع ارتفاع أسعار تلك الفلزات إلى ندرتها في القشرة الأرضية إضافة إلى التكلفة العالية في عمليات استخلاصها ويتم غالبا استخدام هذه الفلزات في صناعة الحلي وأغراض الزينة نظرا لتمتعها بالمظهر الجذاب والبريق واللمعان الدائمين.

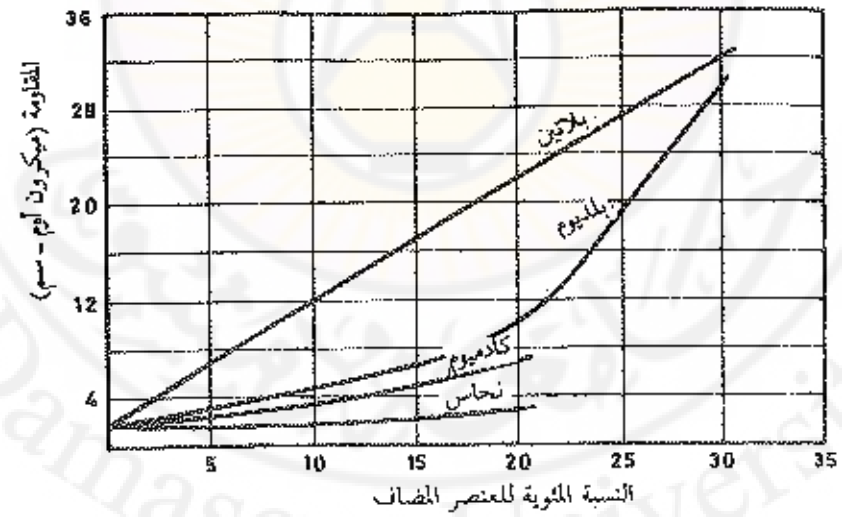
ويمكن أن تقسم الفلزات الثمينة إلى أربع مجموعات: الفضة وسبائكها، والذهب وسبائكه، والبلاديوم وسبائكه. وتضم الفلزات النفيسة العناصر الأربعة السابقة نفسها وتضاف إليها بعض العناصر الأخرى وسبائكها مثل الاريديوم، والأزميوم والروديوم، أي أنها عناصر مجموعة البلاتين نفسها في الجدول الدوري، وإن كان استخلاص الثلاثة الأخيرة أقل من الأربعة الأولى. أما تعبير الفلزات أو السبائك الكريمة فيطلق على أي فلز يقاوم التآكل تحت الظروف المختلفة أي أنها العناصر ذات الموقع المتقدم في السلسلة الكهروكيميائية. ومن المفارقات العجيبة أن جميع الفلزات الثمينة وسبائكها مقاومة للتآكل، فلذا تعد في الوقت نفسه من الفلزات الكريمة، ويحتمل أن يكون الخلط بين التسميتين قد نشأ من هذه النقطة.

تمتاز الفلزات الثمينة في حالتها النقية بطراوتها وليونتها وقابليتها العالية للطرق والسحب. كما أن الفلزات الثمينة ذات مقاومة ممتازة للتآكل في الأحماض العادية والكيماويات ومعامل توصيلها للكهرباء والحرارة جيد، ودرجة حرارة انصهارها منخفضة. ورغم ليونة الفلزات الثمينة وطراوتها فإن صلادتها تزيد كثيراً بإضافة عناصر السبائكية إليها، كما يتبين من الشكل (4-122) الذي يوضح تأثير عناصر السبائكية (أو الشوائب) على صلادة الفضة، كما تزيد عناصر السبائكية والشوائب من مقاومة هذه العناصر للتوصيل الكهربائي، كما هو مبين في الشكل (4-123) لعنصر الفضة، وبوجه عام فإن هذه الخاصية مهمة في تصليد الفلزات النفيسة، كما سيأتي ذكره عند الحديث عن الذهب.

تتمتع وسبائك الفلزات الثمينة – التي تتكون بإضافة عناصر سبائكية إلى الفلز الثمين – بمدى واسع من الخواص الفيزيائية، فعلى سبيل المثال، إن رقم برنل للصلادة لسبائك هذه الفلزات يتراوح ما بين 200 وأكثر من 600 طبقا لنوع وكمية الفلز المضاف. كما تغير عناصر السبائكية من درجة حرارة انصهار الفلزات النفيسة كثيراً، فمثلاً درجة حرارة انصهار فلز الفضة النقي هو(593) مئوية، وعند إضافة عنصر الأزميوم إليها تصل درجة حرارة الانصهار إلى أعلى من (2982) درجة مئوية.



الشكل(4-122): تأثير العناصر السبائكية المضافة للفضة على صلادتها.



الشكل(4-123): تأثير عناصر السبائكية المضافة على مقاومة الفضة.

4-8-2: البلاتين:

لقد حاول العديد من الباحثين والدارسين لعلوم الفلزات معرفة ما إذا كان فلز البلاتين قد عرف للإنسان الأول أم لا ؟ ولم تصل هذه الدراسات إلى قول قاطع. ولكننا هنا يمكن أن نقول إن هذا الفلز لم يعرف قديماً، ولم يستخدم في الحضارات الغابرة، وسبب ذلك عدم وجود أي أثر له في جميع الآثار القديمة، كما أنه لم يذكر في أي من الحضارات السابقة، ولم تدل أية دراسة بصفة قاطعة على تعدين هذا الفلز أو استخلاصه في تلك العصور إضافة إلى عدم ذكره في التاريخ القديم، على العكس من الذهب والفضة.

ليس من المعروف على وجه اليقين تاريخ أو مكان اكتشاف هذا الفلز، ولكن الاحتمال القوي أن البلاتين قد اكتشف في القرن السادس عشر الميلادي في أمريكا الجنوبية، ويستدل على ذلك أن البلاتين قد أخذ اسمه من العبارة "Platina del Pinto" وهي عبارة إسبانية ترجمتها بالعربية (الفضة القليلة من بنتو) وربما أطلق الاسم على ذلك العنصر الجديد، نظراً لأنه يشبه الفضة في الخواص الأخرى. وأول توصيف علمي للبلاتين كان عام (1751م) عندما عرفه (براونتج وواستون) (Browning and Waston). ولقد ظل هذا الفلز من ضمن الفلزات النادرة – غير المعروفة كثيراً – ولكن ظل الاهتمام به قائماً في محاولة التعرف عليه وتوصيف خواصه واستخلاصه بعد تعدين خاماته. وظل الأمر كذلك حتى جاء عام (1822م) حين تم التعرف على خامات هذا الفلز في جبال الأورال بالاتحاد السوفيتي (السابق). ولقد ظل الاتحاد السوفيتي (السابق) – منذ تم التعرف على الفلز واستخلاصه بصورة تجارية – من أهم الدول المنتجة والمصدرة له، بل يمكن القول إن الاتحاد السوفيتي (السابق) احتكر إنتاج البلاتين وتجارته لمدة طويلة.

وفي السنوات الأخيرة كسرت كندا احتكار الاتحاد السوفيتي (السابق) لإنتاج البلاتين، حيث ينتج الآن البلاتين في كندا كمنتج جانبي في عمليات استخلاص وإنتاج النيكل، وتعد كندا في الوقت الراهن هي المنتج الرئيسي لفلز البلاتين. كما ينتج البلاتين أيضاً في جنوب إفريقيا والتي يتوقع أن تكون منافساً كبيراً لكندا في القريب العاجل. كما ينتج البلاتين بكميات قليلة في الولايات المتحدة الأمريكية في ولايات: ألاسكا و كاليفورنيا و أورجون.

4-8-2-1: خواص البلاتين:

يعد البلاتين أهم وأكثر العناصر وجودا بين مجموعة البلاتين في الجدول الدوري، وتضم إضافة إلى البلاتين كلا من: الاريديوم، الأزميوم والروديوم، ومن أهم الخواص المميزة للبلاتين ما يلي:

1. درجة عالية لمقاومة التآكل، فهو من أكثر العناصر مقاومة للتآكل في الظروف المحيطة كافة.
2. درجة حرارة انصهار عالية، حيث تبلغ درجة حرارة انصهاره (1.769) مئوية.
3. لون أبيض جميل، ويحتفظ العنصر بلونه وبريقه في معظم الظروف المحيطة.
4. معامل مرونة مرتفع حيث يبلغ (14.4×10^4 MPa)

وبعض الخواص المميزة للبلاتين موضحة في الجدول (4-51)

4-8-2-2: استخدامات البلاتين:

مما لا شك فيه أنه دون البلاتين فإن كلاً من الكيميائي والصيدلي سيواجهان ما لا حد له من المتاعب، ولن يتمكن أي منهما من الحصول على المركبات المختلفة. كما أن البحث والدراسة لن تكون بصورتها الحالية ولن ترقى الأبحاث – الكيماوية منها على وجه الخصوص – إلى الدرجة نفسها من الدقة والإتقان. وباختصار شديد يمكن القول إنه لا يوجد بديل أو فلز مناظر للبلاتين في الاستخدامات الكيميائية والصيدلية، حيث إنه لا يدخل في التفاعلات الكيميائية، وبالتالي لا يؤثر في معدلاتها أو في طبيعة المنتج النهائي من العملية، وإضافة إلى ذلك فإن البلاتين يتحمل ظروف التفاعلات المختلفة من درجات حرارة عالية وضغط وغيرهما دون أن يتأثر أو يتغير ولا نظير للبلاتين في هذا الأمر.

وقد يبدو من النظرة الأولى للإنسان غير الخبير أن البلاتين غالي الثمن (المبدئي) أكثر من أي مادة أخرى، ولكن هذا ليس صحيحا نظرا لطول الفترة الزمنية للاستعمال والاستخدام الطويل، كما أن مخلفات البلاتين (خردة البلاتين) غالية جدا في ثمنها، وتقترب من الثمن الأصلي للعنصر. وكذلك استخدامه تحت ظروف كيميائية مختلفة لمدد طويلة دون أن يتأثر أو يتغير يجعله – تبعا لذلك – أرخص بكثير من غيره من الفلزات الأخرى التي لا تعمر طويلا، وتستخدم لفترة قصيرة، ثم يلزم الأمر عندئذ استبدالها بمادة جديدة.

جدول(4-51): بعض الخواص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية لفلز البلاتين.

الخاصيـــة	القيمـــة
الرمز الكيميائي	Pt, بلا
العدد الذري	78
الوزن الذري (الكتلة)	195.23 amu
الوزن النوعي	21.40
درجة حرارة الانصهار	1,774°C
درجة حرارة الغليان	4,300°C
معامل التمدد الحراري الطولي عند ٤٠°م	8.99×10^{-6}/°C
المقاومة الكهربائية عند درجة حرارة الصفر المئوي	9.97×10^{-3} ohms
التوصيل الحراري عند درجة الحرارة العادية	0.166 cal/cm/cm^2/°C/sec
الصلادة على مقياس مور	4.3
حرارة الانصهار	26.5 cal/g
الحرارة النوعية	0.0319
معامل المرونة في حالة الشد	14.48×10^4 MPa
معامل المرونة في حالة القص	5.52×10^4 MPa
نسبة بوازون	0.39

يستخدم البلاتين بكميات كبيرة في الصناعات الكيميائية وصناعة الأدوية. وعند استخدامه في صناعة حمض الكبريتيك المركز فإنه يستعمل دون أية مشاكل ولا تظهر فيه أية آثار للتآكل، كما يستخدم كمحفز – والبلاتين هو أشهر العوامل الحافزة – وبخاصة في العمليات الكيميائية والتفاعلات التي تتم في وجود حمض الكبريتيك،في صناعة حمض النيتريك، وكذلك في معظم الصناعات الكيميائية العضوية.

يستخدم حوالي (50٪) من الإنتاج العالمي من البلاتين في صناعة الحلي ويعد صناع الحلي استخدامه كثيراً، نظراً لما يتمتع به من خواص غيره من العناصر الثمينة الأخرى

وبخاصة مقاومته العالية والمطيلية، إضافة إلى أنه جذاب في شكله ولونه، كما يحبه الناس- وبخاصة النساء- كثيراً نظراً لارتفاع ثمنه. وانه لشيء عجيب هذا الإقبال الكبير و المتزايد على الحلي المصنعة من البلاتين رغم صعوبة التفريق والتمييز – وخاصة لغير ذوي الخبرة- بين البلاتين الحقيقي أو الذهب الأبيض أو سبيكة من الحديد- نيكل أو الفولاذ المقاوم للصدأ.

من التطبيقات المهمة للبلاتين استخدامه في صناعة مكوك وبكرات صناعة الحرير الطبيعي، نظراً لتأثر الحرير الشديد بأية شوائب معدنية، يمكن أن يكون مصدرها أي مادة فلزية بالقرب منه. ومن بين الاستخدامات الأخرى المهمة للبلاتين استخدامه في التوصيلات الكهربائية والتصوير وأسنان الأقلام و أنابيب الراديو والمفرقعات والأدوية وفي طب الأسنان والصياغة، كما يستخدم البلاتين بصورته المنفردة في صناعة المزدوجات الحرارية (thermocouple)المستخدمة لقياس درجات الحرارة العالية، وفي أحيان أخرى تتم صناعة المزدوجة الحرارية بعد إضافة بعض عناصر السبائكية للبلاتين، وذلك لتطوير خواصه والحصول على خواص أفضل، وبالذات زيادة مقاومة التآكل والصلادة، كما يصنع منه عناصر الترمومترات (ميزان الحرارة المقاومة للحرارة والبواتق (crucible) وبعض أجهزة ومعدات المعامل. ويستخدم البلاتين سواء في حالته النقية المنفردة – كطبقة مغلفة في صناعة الحلي وأعمال الزخرفة والديكور.

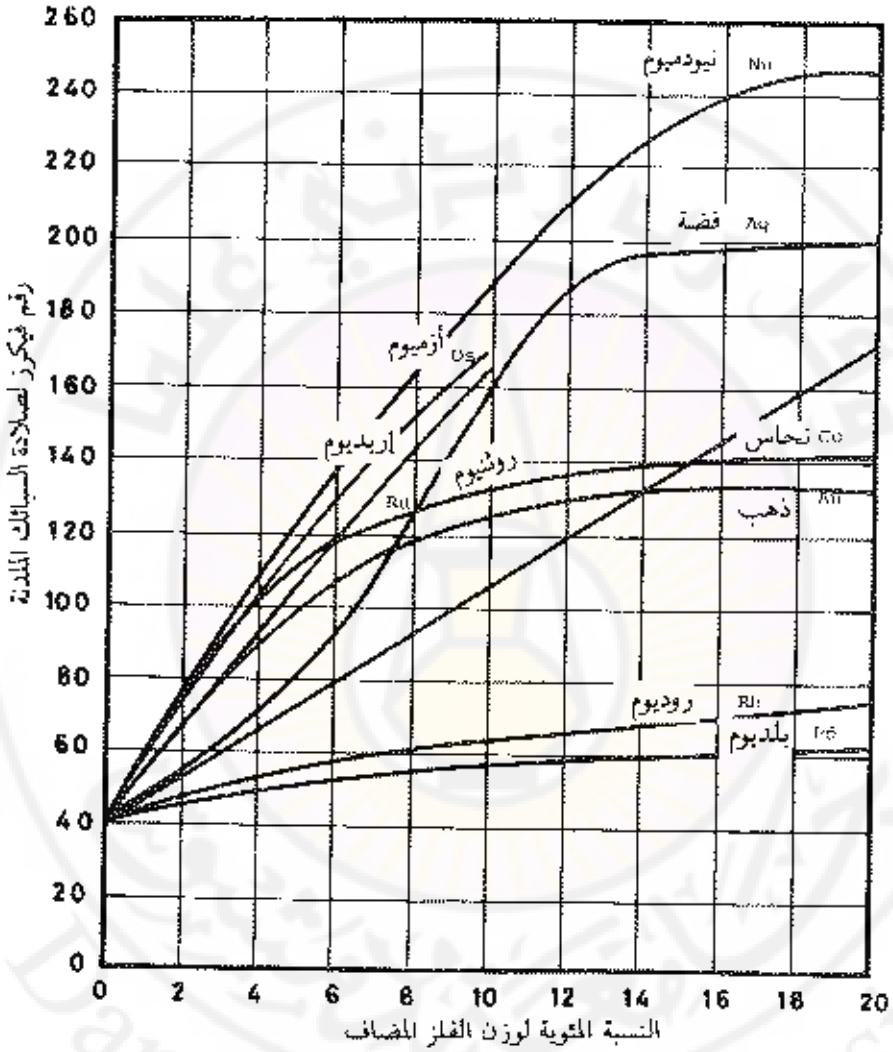
يكون البلاتين عدة سبائك – سيتم تناولها في الجزء التالي – ذات استخدامات متنوعة ومنها سبيكة البلاتين – بلديوم المستخدمة في صناعة المجوهرات والحلي، وفي أدوات وأجزاء التلامس الكهربائي (electrical contact). أما عند إضافة فلز الروديوم إلى البلاتين فتستخدم السبيكة الناتجة في الأغراض والتطبيقات التي تتطلب درجات حرارة عالية، وبالذات عندما يكون هناك احتمال للأكسدة. وتستخدم سبيكة البلاتين – روديوم – على سبيل المثال – في صناعة المزدوجة الحرارية لقياس درجات الحرارة والتحكم فيها حتى (1.950) مئوية. والسبائك القياسية لهذا الغرض هي سلك من البلاتين وآخر من سبيكة البلاتين – (10٪) روديوم وسيتم التعرض لاستخدامات مختلف السبائك في الجزء الخاص بسبائك البلاتين.

4-8-2-3: سبائك البلاتين:

على الرغم من أن أهم سبائك البلاتين هو مع عنصر الأرديديوم الذي يستخدم في الحرب الكيميائية والأعمال الكهربائية والحلي، إلا أن هناك سبائك أخرى مهمة أيضاً للبلاتين مع عناصر النيكل الأزميوم والروديوم والذهب وغيرها من العناصر الأخرى، وأهم سبائك البلاتين التجارية موضحة في الجدول (4-52)، وأفضل السبائك الثنائية للبلاتين هي تلك التي تكون المحلول الجامد – حيث يذوب العنصران في بعضهما تماماً في الحالة الجامدة– وفي هذه الحالة فإن عناصر السبائكية المضافة للبلاتين تزيد كلا من صلادة ومقاومة هذا العنصر. ويبين شكل(4-124) تأثير عناصر السبائكية المختلفة على صلابة ومقاومة هذا العنصر. وتأثير هذه العناصر على المقاومة يشبه تأثيره على الصلادة ونستعرض فيما يلي أهم السبائك الثنائية للبلاتين:

1- سبائك البلاتين – روديوم:

إن أهم سبائك هذه المجموعة هي تلك التي تحتوي على نسبة من الروديوم تتراوح ما بين (3.5٪) و (40٪)، والروديوم من عناصر السبائكية المفضلة في سبائك البلاتين المستخدمة عند درجات الحرارة العالية تحت الظروف المؤكسدة. وأشهر سبائك هذه المجموعة وأهمها هي التي تحتوي على (10٪) روديوم، وتستخدم هذه السبيكة كحافز لأكسدة الأمونيا في صناعة حمض النيتريك. وتتمتع هذه السبيكة بمقاومة ممتازة للزجاج المنصهر ولذا تستخدم في صناعة فوهات الأجهزة الزجاجية، وعند تصنيع هذه السبيكة وإنتاجها يحذر لكي يحافظ فيها على نسبة (90٪) بلاتين و (10٪) روديوم بالتمام، فإنها تستخدم في صناعة أشهر المزدوجات الحرارية وهي: أحد الطرفين بلاتين والآخر السبيكة المذكورة. أما سبيكة البلاتين –(3.5٪) روديوم، فتستخدم في صناعة البواتق المعملية كبديل للبلاتين النقي. وتستعمل سبائك البلاتين المحتوية على نسبة من الروديوم ما بين (10٪) و (40٪)، في صناعة أسلاك لف الأفران الكهربائية المستعملة عند درجات الحرارة العالية بين (1.540) درجة مئوية، و (1.800) درجة مئوية، نظراً لمقاومة هذه السبائك للأكسدة والتآكل الساخن عند تلك الدرجات العالية من الحرارة في الأوساط الصناعية.



الشكل(4-124): تأثير العناصر السبائكية على صلادة البلاتين.

جدول (4-52): سبائك البلاتين

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)							الخواص الميكانيكية						الحالة
	Pt	Ru	Rh	Pd	Ir	Ni	إضافات أخرى	مقاومة الشد		إجهاد الخضوع		الاستطالة ٪	رقم برنل الصلادة	
								MPa	ksi	MPa	ksi			
نقاوة تجارية	99.85							168	24	14	2	40	40	تلدين
بلاتين - روثينيوم	95.86	5.14						420	60			34	130	تلدين (١)
بلاتين - روديوم	96.5–60		3.5–40					214	30			35	70	تلدين (٢)
بلاتين - بلديوم	90.75			10.25				336	48				90	تلدين (٣)
بلاتين - إريديوم	95.65				5.35			280	40				130	تلدين (٤)
بلاتين - نيكل	95.80					5.20		651	93				133	تلدين (٥)
بلاتين - تنجستن	98.92						(2.8) W	784	112					تلدين (٧)
بلاتين - كوبلت	60.40						(40–60) Co							

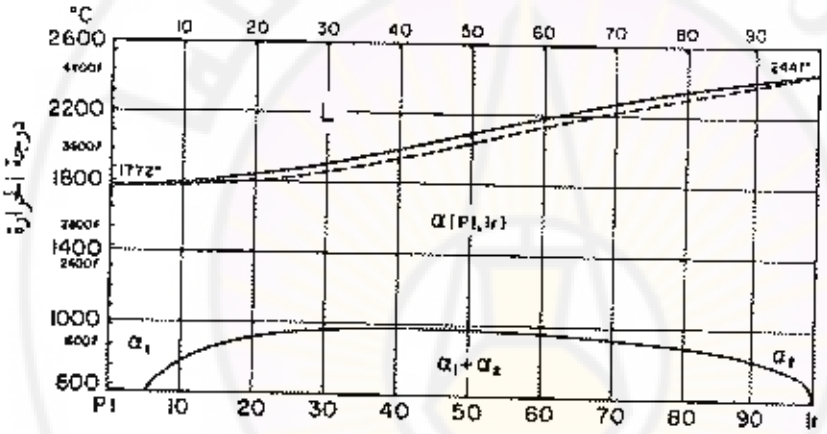
(١) الخواص لسبيكة تحتوي على ٥٪ روثينيوم.
(٢) الخواص مقدرة لسبيكة تحتوي على ٥٪ روديوم.
(٣) الخواص مقدرة لسبيكة تحتوي على ٥٪ بلديوم.
(٤) الخواص لسبيكة تحتوي على ٥٪ إريديوم.
(٥) خواص سبيكة تحتوي على ٥٪ نيكل.
(٦) قيست على مقياس فيكرز لقياس الصلادة.
(٧) الخواص مقدرة لسبيكة تحتوي على ٤٪ تنجستن.

2- سبائك البلاتين – إريديوم:

تستخدم سبائك البلاتين –إريديوم في المجالات الكيميائية والكهربائية التي تعمل عند درجات حرارة عالية،كما تستخدم في صناعة الحلي والمجوهرات، وهناك العديد من سبائك هذين العنصرين مستخدمة تجارياً. حيث تستخدم سبائك البلاتين المحتوية على نسبة صغيرة من الإريديوم فتتراوح ما بين (0.4٪) و (0.6٪) في صناعة البواتق والأجهزة المعملية الأخرى، وتمتاز هذه السبائك بلونها الفضي وخواصها الميكانيكية الجيدة ومقاومها الممتازة للتآكل في الظروف المختلفة، كما تحتفظ بمظهرها الجذاب دون أن تفقد بريقها. وهناك مجموعة أخرى من سبائك البلاتين – أريديوم الغنية بعنصر الإريديوم، حيث تبلغ نسبة هذا الفلز في البلاتين من (5٪) إلى (10٪)، وهذه المجموعة من السبائك صلبة ومحببة في صناعة المجوهرات والحلي نظراً لمظهرها الجذاب ولونها الأبيض الفضي الجميل. أما سبائك البلاتين المحتوية على نسبة أعلى من الاريديوم والتي يتراوح الإريديوم فيها ما بين (10٪) و (15٪) فيصنع منها قضيب اللمس (اللحام الكهربائي) الإريديوم اللازم للأغراض الخاصة الموثوق فيها كجهاز إحداث الشرارة الكهربائية في آلات الاحتراق الداخلي، والمرحلة (أداة تتلقى الرسائل البرقية أو البرامج الإذاعية وتنقلها بقوة كبيرة، وبذلك تضاعف المسافة المنقولة إليها)، كما يصنع منها كذلك الترموستات (منظمات درجات الحرارة) المستخدمة عند درجات الحرارة العالية، وتمتاز سبيكة البلاتين –(10٪) إريديوم باستقرارها وثباتها في ظروف الاستخدام، ولذا فلقد صنع منها القضيب القياسي المستخدم لمعايرة وحدة الطول والوزن المحتفظ بهما في معهد المعايرة والمقاييس الأمريكي (American Bureau of Standardization)، أما مجموعة سبائك البلاتين المحتوية على نسبة مرتفعة من الاريديوم في مدى من (25٪) إلى (30٪) فتستخدم في إبر الحقن تحت الجلد و كأدوات في شمعة إشعال الطائرات. يوضح الشكل (4-125) منحني الاتزان الحراري للبلاتين – أريديوم وهو من منحنيات الذوبانية التامة للعناصر.

3- سبائك البلاتين – روثينيوم:

تشبه سبائك هذه المجموعة سبائك مجموعة البلاتين – إريديوم، ولكن تفوق مجموعة سبائك البلاتين – روثينيوم في التصليد بالتشكيل، وتبلغ أقصى قيمة إضافة من عنصر الروثينيوم (25٪)، وذلك للوصول إلى أقصى قيمة تشكيل مناسبة. وتستخدم سبيكة البلاتين – (5٪) في صناعة الحلي والمجوهرات وقضبان اللمس متوسطة الجودة أما سبيكة البلاتين (10٪) روثينيوم، فتستخدم في صناعة قضبان اللمس عالية الجودة. كما في مغناطيس الطائرات، أما سبيكة البلاتين – (14٪) روثينيوم فتستخدم في التوصيلات عالية الكفاءة وهي كثيرة الاستخدام وتستخدم جميع سبائك هذه المجموعة في صناعة إلكترود شمعات إشعال الطائرات، وإبرة الحقن تحت الجلد وطرف سن الأقلام الجديد.



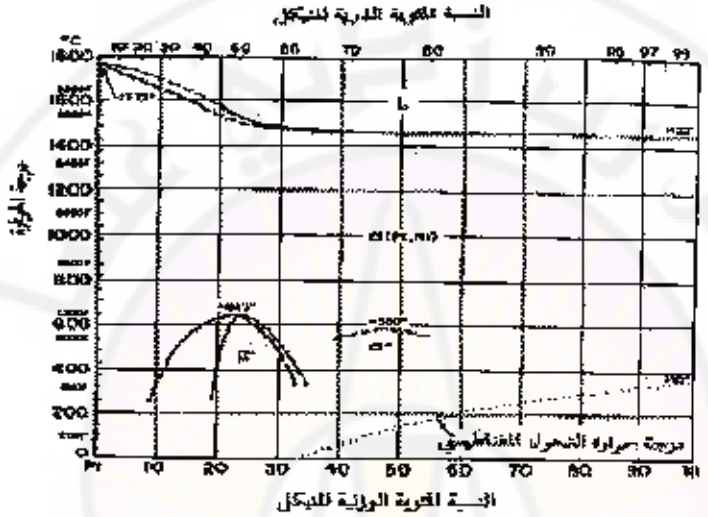
النسبة المئوية الوزنية للإريديوم

الشكل(4-125): منحني الاتزان الحراري للبلاتين – إريديوم.

4- سبائك البلاتين – نيكل:

إن سبائك البلاتين . النيكل الأكثر استخداما هي التي تحتوي على نسبة من النيكل تتراوح ما بين (5%) و (20%). وتمتاز مجموعة سبائك البلاتين [(20%) نيكل] بمقاومة عالية عند درجات الحرارة العالية. وتستخدم سبيكة البلاتين [(5%) نيكل] في صناعة أسلاك الكاثود المغلفة بالأكسيد المستخدمة في الأنابيب الإلكترونية، وتمتاز مثل هذه الأنابيب بطول عمر استخدامها.

تتأكسد هذه السبائك عند درجات الحرارة العالية، فإذا كانت الأكسدة أمراً غير مرغوب فيه عند درجات الحرارة العالية فلا يجب استخدام هذه السبائك. ومنحني الاتزان الحراري للبلاتين – نيكل موضح في شكل (4-126)، وهو من منحنيات المحلول الجديد الذي تكون ذائبية العنصرين في بعضهما البعض تامة.



الشكل(4-126): منحني الاتزان الحراري للبلاتين – نيكل.

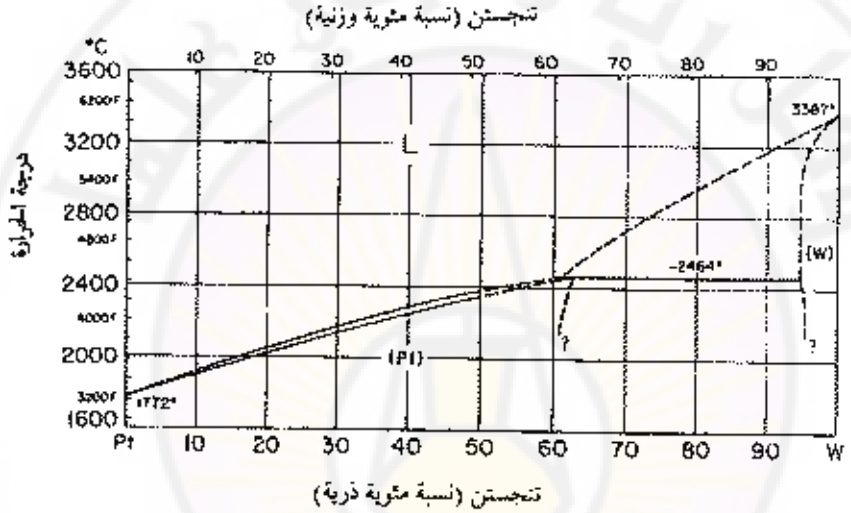
5- سبائك البلاتين – تنغستن:

يوضح الشكل(4-127) منحني الاتزان الحراري لهذه المجموعة من السبائك، وأشهر سبائك هذه المجموعة هي التي تحتوي على نسبة من التنغستن تتراوح ما بين (4%) و (6%) وأهم خواص ومميزات هذه المجموعة من السبائك مقاومتها العالية للتحات الميكانيكي والبري، ومقاومة الاحتكاك ومقاومة جيدة للتآكل. وأهم استعمالات هذه السبائك هي في صناعة:

- الكترودات إشعال الطائرات وقضبان اللمس الكهربائي والشبكات المسعية في أنابيب قوى الرادار، نظرا لما تمتاز به هذه السبائك من انخفاض مستوى الضجيج والضوضاء.

- أسلاك قياس فرق الجهد،حينما يكون المتطلب الأساسي هو مقاومة التحات الميكانيكي.
- أسلاك قياس الانفعال، نظراً لخواصها الفيزيائية الجيدة عند درجات الحرارة العالية.
- مجامل المعدات المتينة المقاومة للتآكل.

ولا ينصح أو حتى يمنع استخدام هذه السبيكة تحت ظروف مؤكسدة، نظراً لمعدل أكسدتها العالي عند درجات الحرارة العالية، ويرجع ذلك إلى ارتفاع معدل أكسدة التنجستن المضاف للبلاتين.



الشكل(4-127): منحني الاتزان الحراري للبلاتين – تنغستن.

6- سبائك البلاتين – كوبلت:

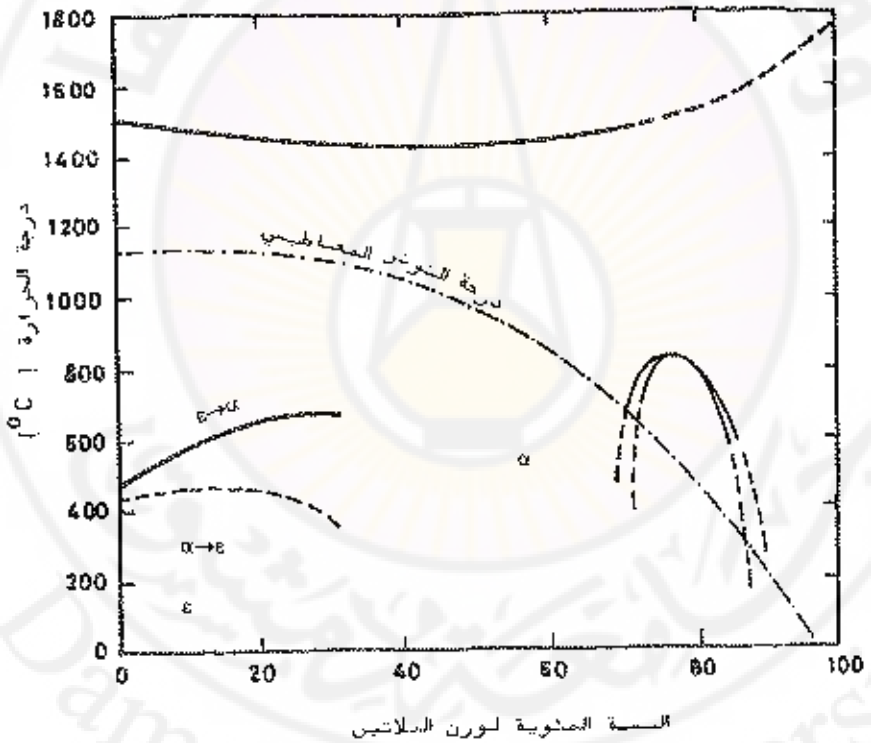
يبين شكل(4-128) منحني الاتزان الحراري لنظام البلاتين – كوبلت، وأشهر سبيكة في هذه المجموعة هي تلك التي تحتوي على (33%) كوبلت، وهذه السبيكة ذات خواص مغناطيسية غير عادية.

تستعمل هذه السبيكة في صناعة المغناطيسيات الدائمة في المعدات الصغيرة حيث يكون المطلوب هو مغناطيس قصير وذا أبعاد صغيرة، وتفي هذه السبيكة بالمتطلبات المذكورة.

4-8-3: البلديوم:

يماثل البلديوم فلز البلاتين في كثير من الخواص والتصرفات، فالعنصرين تقريباً الخواص الفيزيائية نفسها، ولكن البلديوم أخف وأقل كثافة من البلاتين،وكذلك يستخدم الفلذان في التطبيقات والاستخدامات نفسها، ولكن البلديوم يقع بعد البلاتين في الأهمية والتكلفة، وأهم ما يميز البلديوم عن البلاتين هو رخص ثمنه، كما يحتفظ البلديوم ببريقه ولمعانه ولا يفقدهما على الإطلاق. وأهم خواص البلديوم مبينة في جدول(4-53).

أهم التطبيقات وأكثر الاستخدامات للبلديوم تكون في وصلات التليفونات، وفي نقط التوصيل الكهربائي في المحولات الصوتية والضوئية،حيث يتطلب الأمر بهذه الحالة خلوها التام من الضوضاء، ويساعد على ذلك عدم تعرض البلديوم للأكسدة.



الشكل(4-128): منحني الاتزان الحراري للبلاتين ـ كوبلت.

يستخدم أيضاً كعامل حافز لإزالة الأوكسجين من جو المعالجة الحرارية، كما يستعمل كمرشح لتنقية غاز الهيدروجين.

من مميزات البلديوم إمكانية تشكيله على البارد أو على الساخن أو يصنع على شكل أوراق في غاية الدقة، وتستخدم أوراق البلديوم في الزخرفة والديكور وفي تجليد الكتب والرسومات والزينة والزخرفة على الزجاج.

وتشكيل البلديوم على البارد يزيد كثيراً من مقاومته للشد، فتصل هذه المقاومة إلى حوالي (280 MPa) عند تخفيض (80%) من المساحة السطحية.

جدول(4-53): بعض الخواص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية لفلز البلديوم.

الخاصيـــة	القيمـــة
الرمز الكيميائي	Pd, بلد
العدد الذري	46
الوزن الذري (الكتلة)	106.7 amμ
الوزن النوعي	12.16
نقطة الانصهار	1,553°C
نقطة الغليان	2,200°C
معامل التمدد الحراري عند ٤٠°م	–
المقاومة الكهربائية النوعية عند صفر °م	10.78×10^{-3} ohms
التوصيل الحراري عند درجة الحرارة العادية	0,.168 cal/cm/cm^2/ oc/sec.
الصلادة على مقياس موز	4.8
حرارة الانصهار	27.2 cal/gm
الحرارة النوعية ما بين صفر و ١٠٠°م	0.0590
معامل المرونة في حالة الشد	11.72×10^4 MPa
معامل المرونة في حالة القص	4.83×10^4 MPa
نسبة بوازون	0.39

4-8-3-1: سبائك البلديوم:

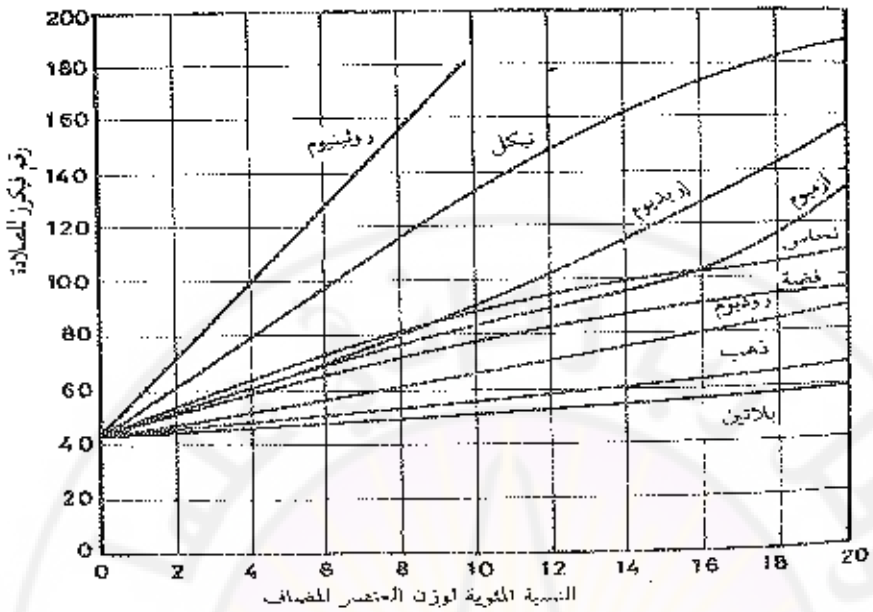
يشبه البلديوم- كما ذكرنا- عنصر البلاتين، حيث يكون محلولاً جامداً مع معظم عناصر السبائكية التي تضاف إليه. وبتأثير عناصر السبائكية على تصليد البلاديوم موضح في الشكل (4-129). ويتضح من الشكل أن أكثر العناصر تأثيرا على صلادة البلديوم هما الروثينيوم والنيكل بينما البلاتين أقلها أثرا. وأهم سبائك البلديوم التجارية موضحة في جدول(4-54)، وفيما يلي نستعرض أهم هذه السبائك وكذلك خواصها المختلفة واستخداماتها.

1- البلديوم - فضة:

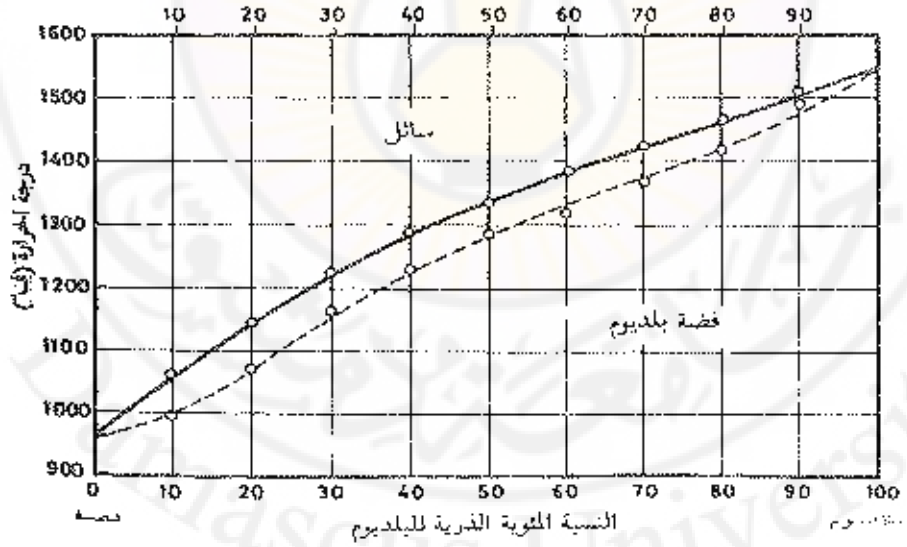
يوضح شكل(4-130) منحني الاتزان الحراري لسلسلة سبائك البلديوم - فضة وهي مجموعة من المحاليل الجامدة. وعند إضافة الفضة إلى البلديوم نحصل على مجموعة من السبائك الجيدة،نظراً لأن السبائك الناتجة تحتفظ بجميع مميزات البلديوم والقليل من مساوئ الفضة. تستخدم السبائك المحتوية على البلديوم بنسب مئوية قدرها (1),(3),(10),(40),(50),(60) بكثرة في نقط الوصل الكهربائية. وتستخدم السبيكة المحتوية على (60%) بلديوم في نقط الوصل الكهربائية في الأسلاك الكهربائية الحاملة لكمية كبيرة من التيار، وأسلاك المقاومة الكهربائية ذات الدقة المتناهية، وأسلاك المقاومة اللازمة للقياسات العلمية الدقيقة جداً. أما السبائك التي تحتوي على نسبة صغيرة من البلديوم فتستخدم في وصلات الكهرباء المرحل ذي الجهد المنخفض وفي المنظمات. ونظرا لأن المقاومة النوعية للبلديوم ($280\times10^{-7}[\Omega/m^2]$)، ومعامل تمدده الحراري: ($6,3\times10^{-6}$) لكل درجة بين (0-100)°C)) فإن السبيكة المكونة من [(10%) بلديوم- (90%) فضة] تستخدم فقط كسبيكة لحام لتوصيل سبائك الأنكونيل والنيكل وأي سبائك أخرى مقاومة للحرارة.

جدول (4-54): تركيب سبائك البلاديوم وخواصها.

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)					الخواص الميكانيكية						الحالة
	بلاديوم	فضة	نحاس	ذهب	روثينيوم	مقاومة الشد		إجهاد الخضوع		الاستطالة	رقم فيكرز الصلادة	
	Pd	Ag	Cu	Au	Ru	MPa	ksi	MPa	ksi			
بلاديوم نقي	99.85					294	42	210	30	5	105	تلدين عند درجة حرارة (٢٦٠°م)
بلاديوم ـ فضة	60	40				525	322	46			180	تلدين
بلاديوم ـ نحاس	60		40				75					تلدين
بلاديوم ـ فضة ـ نحاس	40	40	20								450	ترمين
بلاديوم ـ فضة ـ ذهب	40	40	20								80	ترمين
بلاديوم ـ روثينيوم	99.5				0.5	560	80	273	39	25	152	تبريد من (١٠٠٠°م)



الشكل(4-129): تأثير عناصر السبائكية على صلادة البلديوم.



الشكل(4-130): منحني الاتزان الحراري للفضة – بلديوم.

2- البلديوم- فضة- نحاس:

تستخدم هذه السبائك في نقط التوصيل الكهربائية المستخدمة واللازمة للدوائر الكهربائية العامة في مدى صغير جدا من التيار في حدود الميللي أمبير، والحلقات المنزلقة، حيث يحتاج الأمر في هذه الحالة إلى مادة صلدة تستخدم في الفُرش(Brushes). ومنحنى الاتزان الحراري للبلديوم - نحاس موضح في شكل (4-131) وهي من أنواع منحنيات المحاليل الجامدة.

3- البلديوم- فضة- ذهب:

تشبه مجموعة سبائك (البلاتين- فضة- ذهب) سبائك (البلديوم- فضة- نحاس)، وكلتا المجموعتين من السبائك قابلة للتصليد بالتزمين وتعطى خواص ميكانيكية عالية بعد المعالجة الحرارية. وتستخدم هذه المجموعة من السبائك مثل المجموعة السابقة في نقط التوصيل الكهربائي المعرض للتآكل الكيميائي، كما تستخدم كلتا المجموعتين في طب الأسنان، وتستخدم سبيكة (البلديوم- فضة- ذهب) في الوصلات الكهربائية عالية المقاومة، كما تستخدم كمادة مغلفة للفزات الأخرى. وتمتاز مجموعة سبائك: البلديوم – فضة – ذهب بسهولة التشكيل والتشغيل، كما أنها مقاومة جيدة للتآكل. وعند إضافة الروثينيوم إلى هذه المجموعة من السبائك فإنها تستخدم في صنع المجوهرات، وكذلك الوصلات الكهربائية. ومنحنى الاتزان الحراري للبلديوم – ذهب موضح في شكل(4-132)، وهو نوع من منحنيات المحاليل الجامدة.

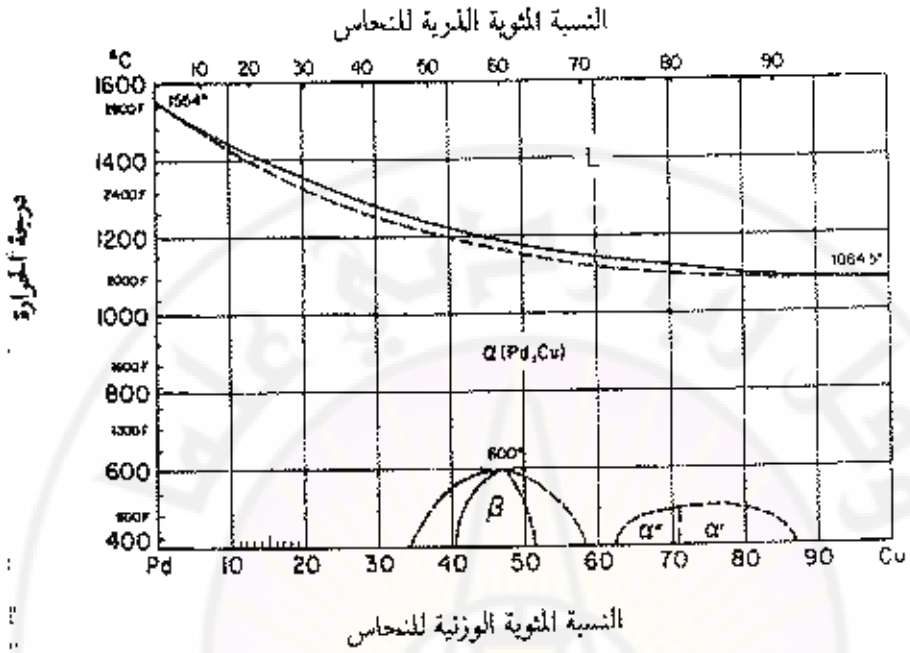
4-8-4: الذهب:

تشير كثير من المعلومات إلى أن الذهب أول فلز عرفه الإنسان،ولقد ساعد على ذلك توافر هذا الفلز في القشرة الأرضية في حالة أولية،وغير متحد مع أي عنصر آخر.

ولا بد أن بريق ولون هذا الفلز المميز قد استرعيا انتباه الإنسان عندئذ، ولقد ساعد على ذلك عدم وجود فلزات أخرى معروفة في ذلك الوقت،وهذا الفلز لا يفقد بريقه أو لمعانه ولا يسود ولا يتحول للون الداكن حتى عند وضعه في النار.

ويعتقد أن لون الذهب المميز و بريقه الجميل قد أغرت الإنسان الأول كثيراً، وليس هنالك خلاف في أن الكثير من الصراعات الدامية قديماً قد حدثت بسبب الذهب و الحصول عليه.

فقد أغوى الذهب المصريين القدماء لركوب البحار العاصفة (في قوارب ضعيفة هشة) لأماكن عديدة و بعيدة في أفريقيا للحصول على هذا الفلز عندما نضب في مصر القديمة.



الشكل(4-131): منحني الاتزان الحراري للبلديوم – نحاس.

وكانت مصر آغنى دولة منتجة للذهب في العالم القديم، حيث طور قدماء المصريين طرقاً متقدمة بالكشف عن الذهب وتنقيته.

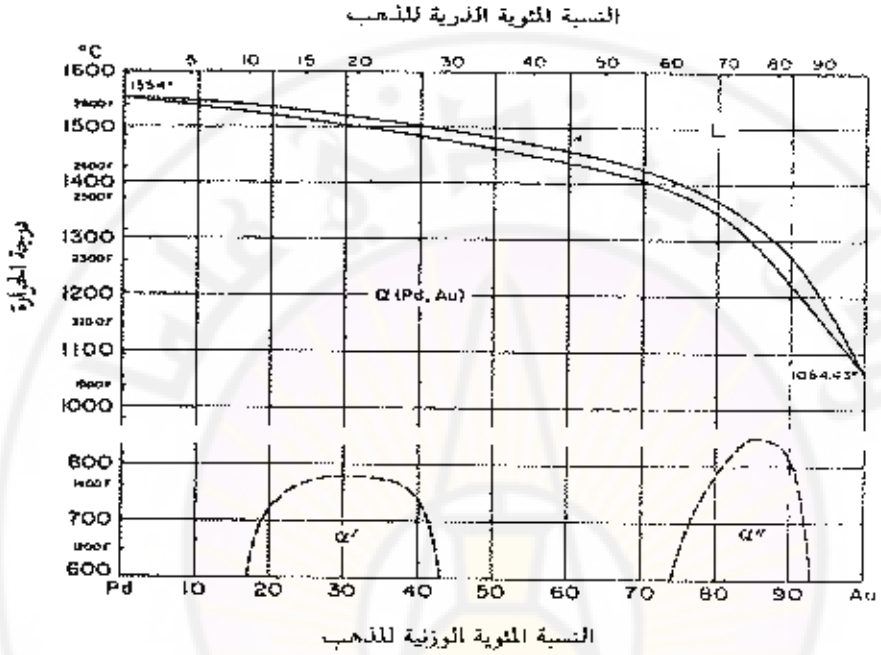
ولم يكن المصريون القدماء الوحيدين في بحثهم عن الذهب والحصول عليه، فقد اندفع الإغريق والفينيقيون إلى أطراف العالم البعيدة للبحث عن الذهب والحصول عليه.

ويقال أن كريستوفر كولومبس (Christopher Columbus) عندما وصل لأمريكا مكتشفاً لها، كان أول ما سأل السكان الوطنيين عنه ((أين الذهب؟)).

4-8-4-1: استخلاص الذهب:

يتم الحصول على الذهب إما كمنتج أساسي من خاماته أو كمنتج جانبي في استخلاص بعض الفلزات الأخرى، كما في صناعة النيكل أو الرصاص أو الزنك أو غيرها. وفيما يلي تفصيل

الطريقة الأولى (الحصول على الذهب من خاماته)، وتنطبق هذه الطريقة تماماً على الفضة مع بعض الاختلافات البسيطة التي سيتم ذكرها بعد شرح كيفية الاستخلاص. كما سيتم مناقشة استخلاص الذهب (الفضة) كمنتج جانبي من إنتاج الرصاص. يستخلص الذهب (الفضة) من خاماته بإحدى الطريقتين:



الشكل(4-132): منحنى الاتزان الحراري للبلاديوم – ذهب.

- الإلغام (أو الإدماج)(Amalgamation).
- السيندة (Cyanidation).

قبل استخدام أي من هاتين الصفتين لابد من تجهيز الخام تجهيزا جيدا،وأهم أركان التجهيز هو طحن الخام جيدا إلى حبيبات دقيقة جدا، وبهذا نضمن أفضل تعرض لسطح الحبيبات سواء للزئبق أو للسيانيد. ويوصى دائما أن يكون حجم الخام المستعمل هو الذي يمر من فتحة منخل(200) أي حجم حبيباته أقل من عدد ميكرونات. وإذا احتوى خام الذهب (الفضة) على أي من آثار الزرنيخ (الذي يضر ويؤثر على مفعول السيانيد) فيجب بهذه الحالة تحميص الخام للتخلص من هذه الشوائب قبل عمليات الطحن.

1- طريقة الإلغام (أو الإدماج):

أساس هذه العملية هو درجة الذائبية العالية للذهب(الفضة) في الزئبق، وتصل هذه الدرجة إلى حوالي (15%) عند درجة الحرارة (100°C). ويوضح شكل(4-133) خطوات استخلاص الذهب (الفضة) بالإذابة في الزئبق، وكما هو واضح فبعد عمليات الكسر والطحن يتم الإلغام بين الذهب (الفضة) والزئبق على ألواح، ويجمع ناتج الإلغام في صرة من الجليد، يتم بعد ذلك عصرها وضغطها في مكنة ضغط هيدروليكية صغيرة، وتسخن نواتج العصر في معوجات، حيث يتبخر الزئبق تاركاً خلفه الذهب (الفضة). وهذه العملية سهلة وبسيطة، كما أن كفاءتها عالية.

2- طريقة السيندة:

قامت هذه العملية على أساس الحقيقة العلمية وهي مقدرة سيانيد البوتاسيوم أو الصوديوم على إذابة الفلزات الثمينة (الذهب والفضة) من خاماتهما المطحونة دون أي تأثير على بقية الخام أو الشوائب الأخرى طبقا لمعادلة التفاعل:

$$4Au + 8NaCN + O_2 + 2H_2 \rightarrow 4[Na\ Au(CN)_2] + 4NaOH$$

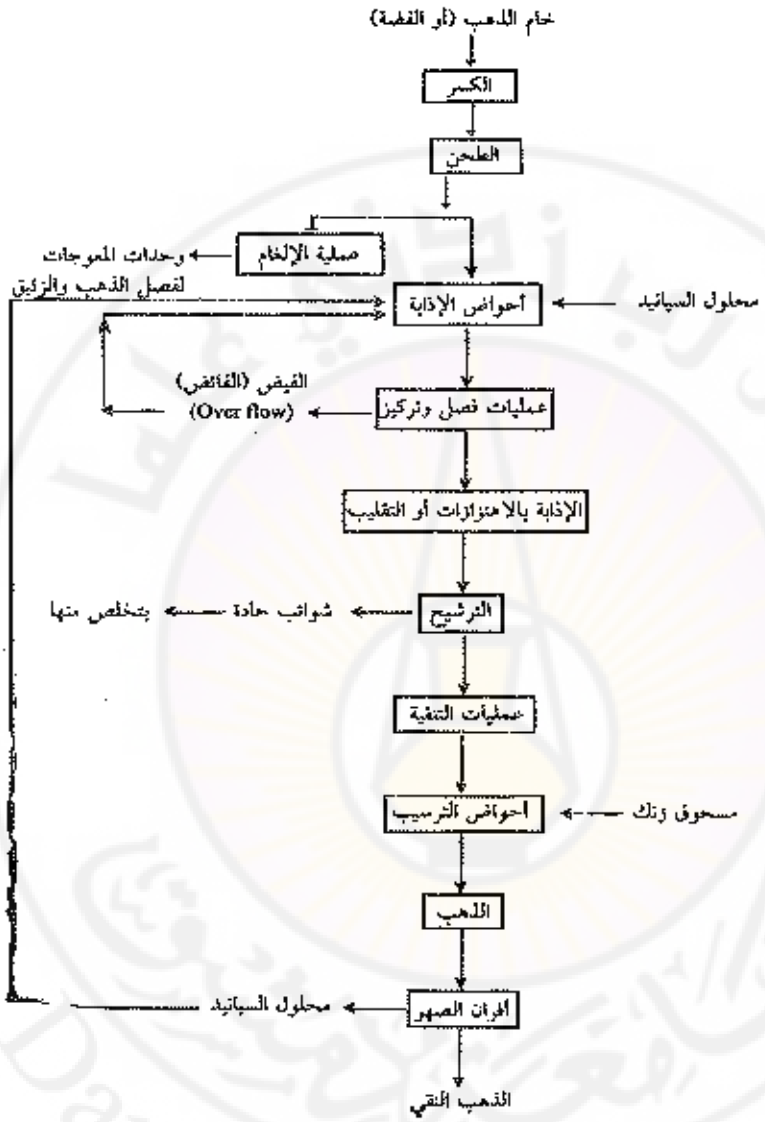
تتم الإذابة في عدد من الأحواض المتتالية وعند الانتهاء من إذابة الفلز يفصل المحلول الغني بالذهب (الفضة) عن بقية المواد غير المذابة من خلال إحدى عمليات الفصل المختلفة وعندئذ يضاف الزنك (في صورة مسحوق) إلى المحلول الغني بالفلز حيث يتم ترسيب الذهب (الفضة) طبقا للمعادلة:

$$2NaAu(CN)_2 + Zn \rightarrow NaZn(CN)_4 + 2Au$$

ويمثل الشكل (4-133) إحدى الوحدات الصغيرة لإنتاج الذهب بالإذابة في محلول السيانيد. وفيما يلي نستعرض إنتاج الفضة أو الذهب كمنتج جانبي عند إنتاج فلز الرصاص.

3- إنتاج الفضة والذهب من الرصاص:

تحتوي سبيكة الرصاص (lead bullion) المعروف أيضا باسم مركز الرصاص – ويطلق هذا التعبير على الرصاص الناتج من صهر واختزال خامات أكسيد الرصاص- على الفضة والذهب ويمكن إنتاج هذين الفلزين من هذه المادة كمنتجات جانبية ويتم ذلك من خلال عدة خطوات هي:



الشكل(4-133): رسم تخطيطي لإحدى الوحدات الصغيرة لاستخلاص الذهب.

آ- الكدارة (الرغوة) (drossing): تتم تطرية سبيكة الرصاص وتليينها بتسخين السبيكة وتحويلها إلى الحالة السائلة لفترة طويلة بما فيها لكفاية لتسمح للشوائب: الزنك والقصدير والنحاس والبزموث والأنتيمون بالطفو على سطح السبيكة حيث يجرى عندئذ نزعها من السبيكة وكشطها.وأحيانا يمرر الهواء في السبيكة السائلة أو يضاف الكبريت حيث تتكون الأكاسيد أو مركبات الكبريت التي تطفو على السطح أو تترسب في القاع تبعا لوزنها النوعي ومن ثم تتم إزالتها.

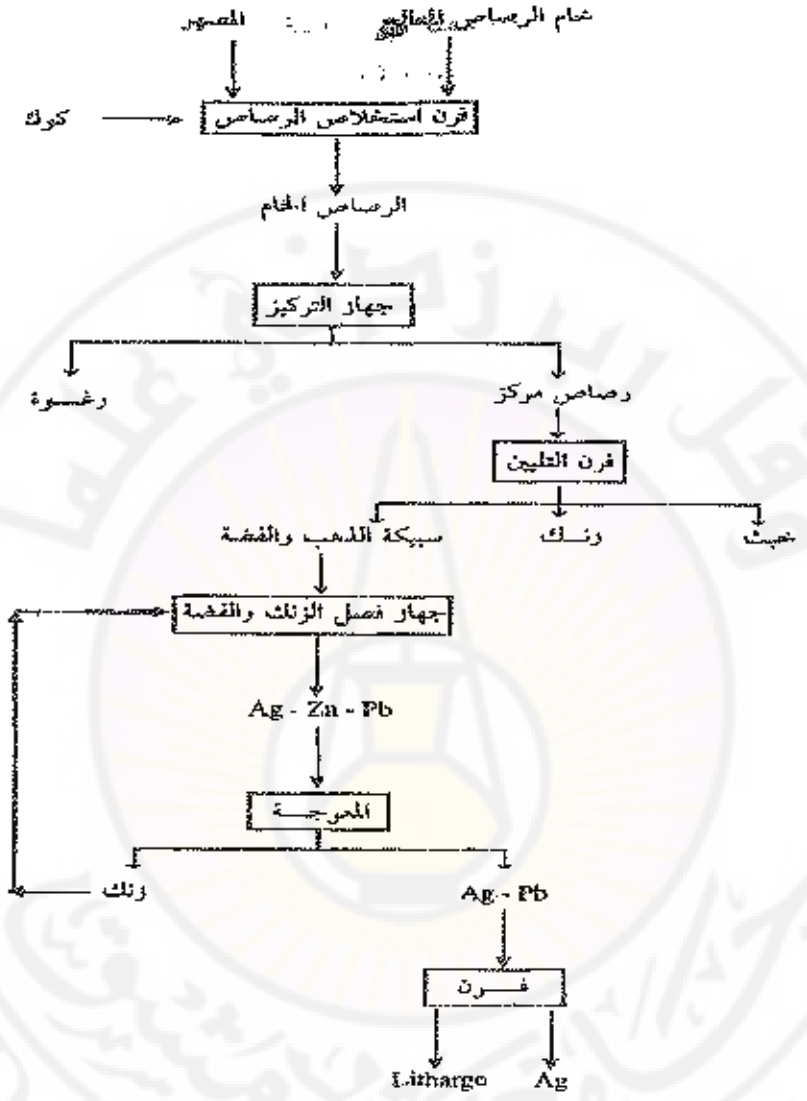
(ب) الحصول على الفلزات النبيلة: يظل في سبيكة الرصاص بعد إزالة الكدارة منها فقط الفضة والذهب، ويتم الحصول عليهما عن طريق تفاعلهما-سواء في الحالة السائلة أو المنصهرة- مع الزنك. ويكون الزنك المضاف مع الفلزات النبيلة مركبات فلزية تطفو على السطح المنصهر حيث تزال هذه المركبات وتنزع من السطح ليتم بعد ذلك معالجتها لفصل الزنك عن الذهب والفضة.

يتم بعد ذلك معالجة الرصاص المتبقي للتخلص من أي زنك زائد كما جاء في الكدارة ويصبح الرصاص عندئذ جاهزا للاستخدامات التجارية. وتفاصيل هذه العملية موضحة في الشكل(4-134).

4-8-4-2: خواص الذهب:

ينفرد الذهب من بين الفلزات الأخرى بالعديد من الخواص التي نورد منها ما يلي:

1. مقاومة عالية جدا للتآكل فلا يؤثر فيه أي حمض منفرد ولكنه يتأثر قليلا بالأكسجين حيث يتأكسد في وجود الهالوجينات (halogens) والقواعد المنصهرة.
2. يحتفظ ببريقه ولمعانه ويحافظ على مظهره الجميل حتى عند درجات الحرارة العالية فلا يصيب سطحه أي كدر (tarnish) ولا يفقد لمعانه ولا ينطفئ بريقه، ولهذا فإن الذهب إضافة إلى أنه من مجموعة الفلزات الثمينة فهو أيضا يدخل تحت مجموعة الفلزات الكريمة حيث لا يتفاعل مع أي العوامل المحيطة.
3. موصل جيد للتيار الكهربائي ويسهل استخدامه في التغليف الكهروكيميائي ولهذا فإن الذهب مناسب لعملية التقنية الكهروكيميائية وقد ساعدت هذه الخاصية على استخدامه في كثير من التطبيقات الهندسية كما سيأتي عند الحديث عن استخدامات الذهب.



الشكل(4-134): رسم تخطيطي لكيفية الحصول على الفضة كمنتج جانبي من عمليات إنتاج الرصاص.

4. قابلية عالية جدا للطرق إضافة إلى مطيلية متفوقة وليونة عالية فيمكن طرق الذهب إلى رقائق سمكها (0,0000126) سم كما يمكن سحبه في أسلاك دقيقة جدا. فعلى سبيل المثال يمكن أن يسحب غرام واحد من الذهب في صورة سلك رفيع جدا يصل طوله إلى (2000) متر.
5. يكون بعض السبائك مع كميات مختلفة من العناصر الأخرى وبوجه خاص النحاس والفضة والزنك وهناك عدد آخر من الخواص المهمة للذهب مبينة في الجدول(4--55).

4-8-4-3: استخدامات الذهب:

بجانب التطبيقات المعروفة لكل إنسان- حيث يستخدم الذهب في صناعة العملات الذهبية والمجوهرات والحلي فإن الذهب ذا النقاوة التجارية يستخدم في المنتجات اللازمة لطب الأسنان – وبعض سبائك الذهب المستخدمة في طب الأسنان مبينة في جدول(4-56) - إضافة إلى أعمال الزينة والديكور. ويستخدم الذهب (ذو الدرجة العالية من النقاوة) في صناعة فتيل الأمان لحماية الأفران الكهربائية وكهدف (target) في الأنابيب المولدة للأشعة السينية كما يستخدم الذهب في صورة طبقة رقيقة على سطح الزجاج كمرشح اختياري لبعض الضوء.ونظرا لمقاومة الذهب للتآكل فإنه يستخدم في التطبيقات الكهربائية كما في خطوط توجيه الموجات وكطلاء لتغطية أسلاك الشبكات المتسامتة. ويستخدم الذهب لتغليف وتبطين الأجهزة الكيميائية كما تستخدم سبائك الذهب في تطبيقات عديدة وسيتم استعراضها عند الحديث عن هذه السبائك.

4-8-4-4: سبائك الذهب:

إن الذهب – مثله مثل الفضة - يكون دائما في صورة سبائكية وليس في صورة فلز نقي حيث إن الذهب النقي طري جدا ولأبعد الحدود كما أنه غالي الثمن ومكلف جدا. وعندما يكون الذهب(الفضة) في الصورة النقية فإنه غير عملي ولا يناسب التطبيقات الصناعية المختلفة. ولحسن الحظ تحتفظ سبائك الذهب بخواص العنصر نفسها ولهذا فإنه في بعض الأحيان لا ينظر إليها من مفهوم أو منطلق سبيكة ولكن من منطلق أنها درجات أو مراتب من الذهب (الفضة).

جدول(4-55): بعض خواص الذهب الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية.

الخاصيـــة	القيمـــة
الرمز الكيميائي	Au, ذ
العدد الذري	79
الوزن الذري (الكتلة)	197.2 amu
نصف قطر الذرة	1.44×10^{-10}m
التكافؤ	أحادي Au^+
نصف قطر الأيون Au^+	1.37×10^{-10}m
النظائر Au^{199}	نصف العمر من يوم إلى عشرة أيام.
Au^{198}	نصف العمر من عشرة أيام إلى مئة يوم.
اللون في الضوء	أصفـر.
التركيب البلوري	مكعب متمركز الوجه FCC
ثابت البلورة (a)	3.923×10^{-10}m
المسافة بين أقرب ذرتين	2.88×10^{-10}m
الكثافـة	19.32×10^3 kg/m^3
درجة حرارة الانصهار	1,336°K (1,063°C)
درجة حرارة الغليان	2,803°K (2,530°C)
الحرارة النوعية عند درجة الصفر المئوي (273°k)	0.316 cal/g/°C
التوصيل الحراري	0.7003 cal/cm s°C
المقاومة الكهربائية	2.25×10^{-3}ohm
الجهد القياسي	1.5 v
معامل ينج للمرونة في حالة الشد	70.3×10^6psi (49×10^4MPa)
معامل ينج للمرونة في حالة القص	3.8×10^6psi (28×10^3MPa)
نسبة بوازون	0.42
الصلادة على مقياس مور	2.5
حرارة الانصهار	16.3 cal/g

جدول(4- 56): سبائك الذهب المستعملة في طب الأسنان.

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)						الخواص			المعالجة
	ذهب Au	فضة Ag	بلاتين Pt	بلديوم Pd	نحاس Cu	مقاومة الشد ksi (MPa)	إجهاد الخضوع ksi (MPa)	النسبة المئوية للاستطالة	رقم برنل للصلادة	
	أسلاك الأسنان									
1	30		50	30		180 (910)	150 (714)	15	245	تبريد بطيء
2	60	11	18	8	14	130 (1,260)	102 (1,050)	22	190	
3	50	8	12	25	12	150 (1,050)	120 (840)	10	230	
4	64	16	18	6	14	115 (805)	80 (560)	26	195	
5	60	15	7	15	18	120 (840)	73 (511)	20	200	
6	63	25	5	5	18	100 (700)	58 (406)	28	170	
7	28	30	25	37	21	180 (1,260)	115 (805)	20	225	
8		41	1	44	17	110 (770)	87 (609)	24	200	

تابع جدول(4- 56): سبائك الذهب المستعملة في طب الأسنان.

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)					الخـــواص			الحالة
	ذهب Au	فضة Ag	بلاتين Pt	بلديوم Pd	نحاس Cu	مقاومة الشد ksi (MPa)	إجهاد الخضوع ksi (MPa)	النسبة المئوية للاستطالة	رقم برنل للصلادة	
سبائك الأسنان الذهبية المصبوبة (١)										
صفراء 1	8.25	12	0.5	0.5	4.5	45 (315)	15 (105)	37	70	تبريد فجائي
صفراء 2	78	14.5	1	6	10	55 (385)	25 (175)	35	90	تبريد فجائي
صفراء 3	78	26	3	4	11	82 (574)	58 (406)	20	166	تزمين
صفراء 4	71.5	20	8.5	5	16	120 (840)	92 (644)	6	235	تزمين
بيضاء 5	70	12	4	12	10	75 (525)	45 (315)	12	170	تزمين
بيضاء 6	65	15	8	10	8	120 (840)	83 (581)	3	260	تزمين
بيضاء 7	30	30	7	20	25	120 (840)	100 (700)	3	280	تزمين

(١) النيكل بمقدار (١٪ إلى ٢٪).

وفي سبائك الذهب الخاصة لا يعبر عن العناصر بنسب مئوية كما في حالة الفلزات الأخرى ولكن يعبر عنها بالقيراط (carat) أو بطريقة أخرى هي درجة نقاوة الذهب (fineness). فالذهب تام النقاوة يعرف بأنه (1000) غرام وعندما نقول (900) غرام يعني ذلك أن السبيكة تحتوي على (90%) من الذهب. وعندما يكون القيراط هو أساس القياس فإن الذهب النقي (الخالص) يشار إليه باسم (24) قيراطا أما الذهب الذي يطلق عليه عيار (18) قيراطا فيعني أن سبيكة ذلك الذهب تحتوي على (75%) ذهبا أو (750) غراما والبقية عناصر سبائكية. والعملات الذهبية في الولايات المتحدة الأمريكية هي (900) غرام أما في المملكة المتحدة فهي (916,66) غرام.

غالبا ما تكون المجوهرات والحلي المصنوعة من الذهب (14) و (16) و (18) و (21) قيراطاً. وهناك أنواع أقل جودة وأقل سعرا تحتوي على ثمانية أو عشرة قراريط أما بقية مكونات هذه السبائك من العناصر الأخرى فتتكون من الفضة أو النيكل أو النحاس. وعدد من سبائك الذهب موضحة في جدول (4-57).

أ- سبائك الذهب – الفضة – النحاس:

تستخدم هذه المجموعة من السبائك في الحلي والديكور والزينة والزخرفة والأغراض المختلفة في طب الأسنان.ويعتمد لون السبيكة على نوع وكمية العنصر المضاف.فالذهب (18) قيراطا – أي أن السبيكة تحتوي على (75%) ذهب – يمكن أن يكون لونه أخضر أو أحمر أو أصفر. وتكون السبيكة خضراء اللون عندما تكون الفضة هي العنصر المضاف للذهب، ومن أهم مميزات هذه السبيكة أنها طرية وتستخدم في التطبيقات العامة ويمكن استخدامها كطلاء فلزي. أما إذا كان النحاس هو عنصر السبائكية فيكون اللون عندئذ أحمر، وتستخدم سبائك الذهب هذه في صناعة العملات المعدنية، ومن أهم خصائص سبائك الذهب – نحاس أنها عالية الصلادة ويصعب تشكيلها. أما إذا تم إضافة كل من الفضة والنحاس فيصبح لون السبيكة عندئذ أصفر و يتصف الذهب في هذه الحالة. وفي سبائك (10) و (14) قيراطا تكون النسبة المتبقية من الفضة والنحاس. وتستخدم سبيكتا (14) و (22) قيراطا ذهبا في أعمال طب الأسنان. ومنحنيات الاتزان الحراري للذهب – نحاس وللذهب – فضة موضحة في شكلي (4-135) و (4-136) على التوالي، وكلاهما من نوع المحلول الجامد.

2- الذهب الأبيض:

يمكن أن يكون الذهب الأبيض من عيار (18) أو (14) أو (10) قراريط. وهذه السبائك عبارة عن الذهب – حسب نسبته – مضافاً إليه كل من النيكل والنحاس والزنك. والتحكم في النسبة المئوية لعناصر النحاس – النيكل – الزنك هو الذي يعطي اللون المميز للسبيكة، فقد يعطي لوناً أبيض أو أخضر مائلاً للبياض أو اللون القرنفلي أو الوردي. اللون الوردي هو لون سبيكة الذهب عيار (12) قيراطاً.

في بعض الأحيان يطلق تعبير – الذهب الأبيض – على سبيكة (75 %) ذهب- (25%) بلديوم، ويمكن الحصول على سبيكة من الذهب الأبيض بلون سبيكة الذهب -- بلديوم نفسها، ولكن بسعر أقل وذلك بإضافة الزنك إلى الذهب بنسبة تتراوح ما بين (14%) و (19%). وتحتوي سبائك أسلاك الأسنان على نسبة تتراوح ما بين (57%) و (65%) ذهباً والباقي خليط من عناصر الفضة والنحاس والبلاتين والبلديوم، بينما تحتوي السبائك المصبوبة للأسنان على ذهب ما بين (80%) و (100%)، ونظراً لزيادة تكلفة الأسنان الذهبية ; لارتفاع سعر الذهب وكثافته العالية، فإن هناك محاولات مستمرة لإيجاد بديل للذهب بشرط أن يكون خفيف الوزن وبسعر أقل. ولكن لم تلق تلك المحاولات نجاحاً يذكر حتى الآن، ويبدو أن الحل الوحيد حتى الآن هو اختيار فلز رخيص وخفيف وتغطيته بطبقة من الذهب.

3- سبائك الذهب – بلاتين:

منحنى الاتزان الحراري للذهب – بلاتين مبين في شكل (4-137)، واهم سبيكة في هذه المجموعة هي تلك التي تتكون من (70 %) ذهب و (30 %) بلاتين، وتتجمد هذه السبيكة عند درجة الحرارة (1228) مئوية. وتستخدم هذه السبيكة في لحام التوصيل وخاصة لفلز البلاتين عند درجات الحرارة العالية.

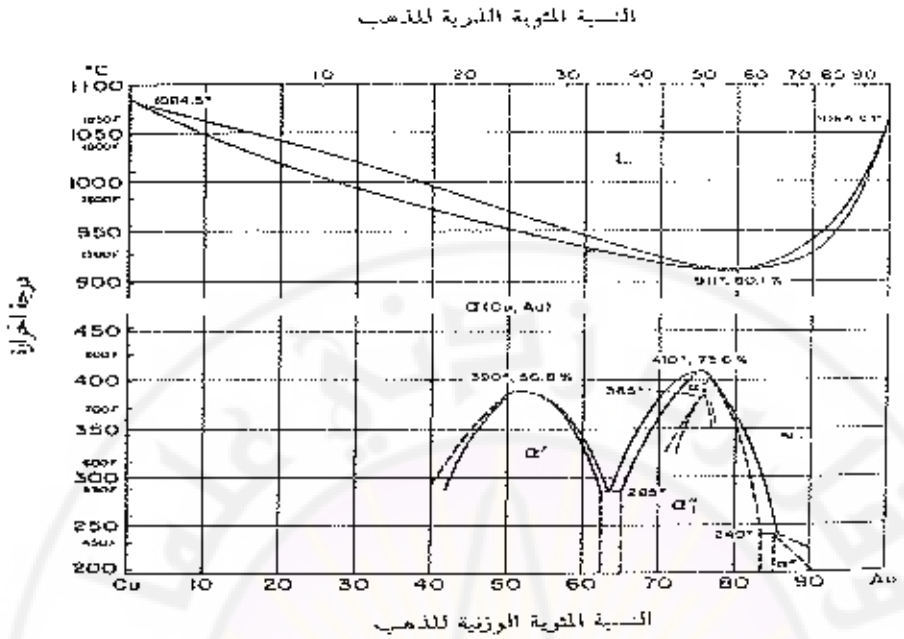
جدول(4- 57): بعض سبائك الذهب، تركيبها وخواصها.

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)					الخـــواص				الحالة
	ذهب Au	نحاس Cu	نيكل Ni	زنك Zn	إضافات أخرى	مقاومة الشد ksi (MPa)	إجهاد الخضوع ksi (MPa)	النسبة المئوية للاستطالة	رقم برنل للصلادة	
ذهب نقي	99.99									
ذهب بنقاوة تجارية	99.95					32 (224)	30 (210)	4	58	
ذهب ـ فضة ـ نحاس:										
١٨ قيراطًا ـ خضراء اللون	75	5			20 Ag				100 (1)	تزمين
١٤ قيراطًا ـ صفراء اللون	58.3	21.7			20.0 Ag				275 (1)	تزمين
عشرة قراريط ـ حمراء اللون	41.7	33.7			20.0 Ag				310 (1)	تزمين
ذهب ـ نيكل ـ نحاس ـ زنك:										
١٨ قيراطًا ـ ذهب أبيض	75	2.23	17.3	5.47					380	تزمين
١٤ قيراطًا ـ ذهب أبيض	58.3	23.5	12.2	6.0					170	تلدين
١٤ قيراطًا ـ ذهب أبيض	58.3	22.2	10.8	8.7					165	تلدين
عشرة قراريط ـ ذهب أبيض	41.7	32.8	17.1	8.4					150	تلدين

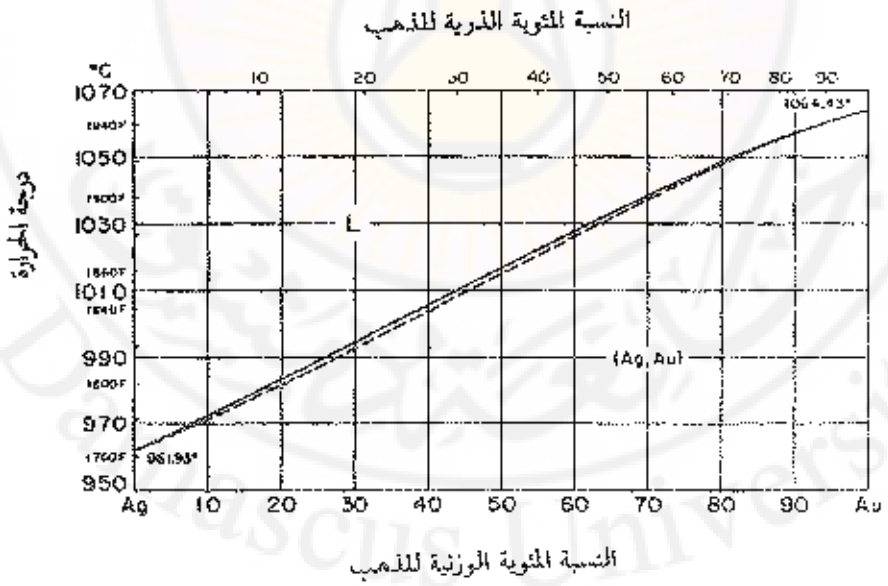
تابع جدول(4-57): بعض سبائك الذهب، تركيبها وخواصها.

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)						الخصائص			الملاءمة
	ذهب Au	نحاس Cu	نيكل Ni	زنك Zn	إضافات أخرى	مقاومة الشد kg/mm² (MPa)	إجهاد الخضوع kg/mm² (MPa)	النسبة المئوية للاستطالة	رقم برنل للصلادة	
عشرة قراريط ـ ذهب أبيض	41.7	30.8	15.2	12.3					140	تلامين
ذهب بلاتين	70				30.1% Pt	92.7	82.5		169	صفر ٩٩٪ أحمر (١) ذو أنصع لمعة
ذهب ـ بلاديوم ـ حديد	49.5				40.5 Pd 10Fe	280	490			المقاومة الكهربائية

(١) رقم نيكرز للصلادة.



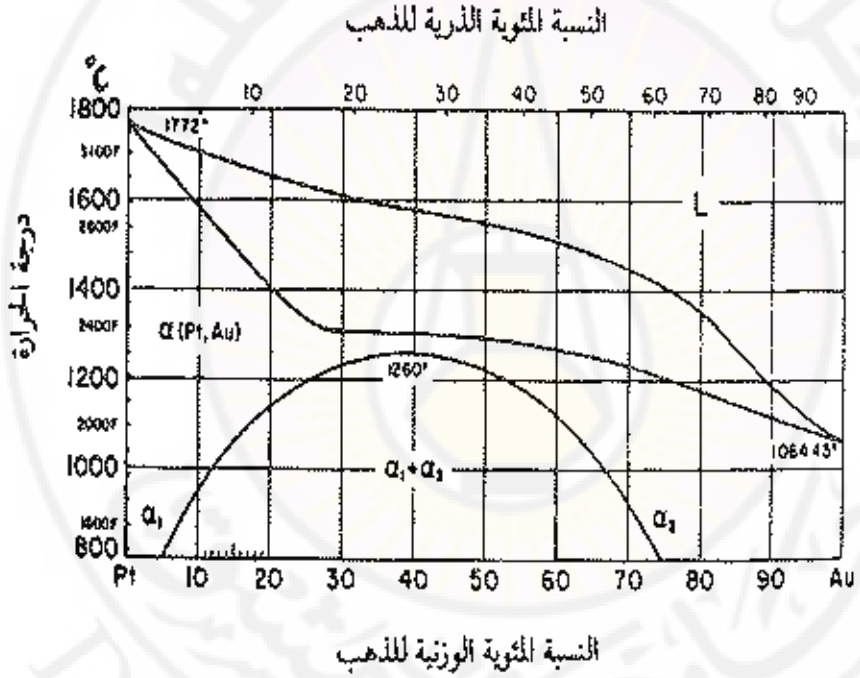
الشكل(4-135): منحني الاتزان الحراري للنحاس – ذهب.



الشكل(4-136): منحني الاتزان الحراري للفضة – ذهب.

4- سبائك الذهب – بلديوم – حديد:

تمتاز هذه السبائك بأنها ذات مقاومة نوعية كهربائية عالية، وتصل إلى هذه الدرجة العالية من المقاومة الكهربائية من خلال المعالجة الحرارية المناسبة، وتستخدم هذه السبائك في صناعة أسلاك مقياس الجهد. وأعلى سبائك الذهب – بلديوم – حديد مقاومة كهربائية هي التي تحتوي على (49,5%) ذهباً و (40,5%) بلديوم، و (3,567) ميكرو أوم / ملي متر بعد تلدينها لمدة ساعة.



الشكل(4-137): منحني الاتزان الحراري للذهب .. بلاتين.

4-8-5: الفضة:

يعتقد المؤرخون المهتمون بتاريخ اكتشاف الفلزات واستخدامها أن أوائل الفلزات التي استخلصها الإنسان الأول واستخدمها كانت الذهب والنحاس والفضة بالترتيب. وكمية خامات هذه الفلزات في الوقت الحالي قليلة مقارنة بالعناصر الأخرى، وربما يرجع النقص في مقدار وكمية خامات تلك العناصر الثلاثة إلى توسع الإنسان القديم في استغلال هذه الفلزات واستخدامها لأغراض مختلفة مما أدى إلى شحها في الوقت الحالي.

يوجد الذهب في القشرة الأرضية بصورة منفصلة – فلز منفرد – كما سبق ذكره، لهذا تعرف الإنسان الأول عليه نتيجة تميز لونه ومظهره الجذاب، وبالتالي كان الذهب أول العناصر المكتشفة والمستخدمة. أما النحاس فكان موجوداً بكثرة أي بكميات كبيرة، ولكن تركيزه كان قليلاً في معظم الترسبات الفلزية الأخرى، كما كان النحاس مؤكسداً ووسخاً ومظهره الخارجي لم يكن مغرياً، وربما كانت تلك العوامل هي التي دفعت الإنسان عندئذ للتعرف عليه، ثم استخدامه.ولم تكن الفضة على الدرجة نفسها من الوضوح سواء بوجودها منفردة أو متحدة مع خامات عناصر أخرى، حيث تكون الفضة مختفية في صورة كبريتيدات أو موجودة مع الرصاص. وهناك احتمال قوي أن حدوث الحرائق واحتراق جزء من الغابات كمواد عضوية في ذلك الوقت مع وجود التيارات الهوائية القوية أدت إلى اختزال وإنتاج فلز الرصاص وسبائك الفضة، ثم كان إنتاج الفضة من خلال عملية إخضاعها لدرجة حرارة عالية في البوتقة. وتحتاج هذه العملية فقط أن يظل الرصاص مصهوراً لفترة بوجود تيار من الهواء، وهذا يؤدي إلى فصل الفضة ذات اللمعان الواضح التي أمكن طرقها إلى الأشكال المختلفة فيما بعد ذلك.

من أوائل الأشياء المصنوعة من الفضة التي تم العثور عليها عقدٌ كان مصنوعاً من حبيبات الفضة في الأسرة السالكة المصرية الثانية عشرة (في حوالي عام 2400 قبل الميلاد) وأشهر أعمال التنقيب عن الفضة تمت في شرق آسيا حوالي عام 2000 قبل الميلاد، قام بها الحيثيون عند خط الجدي ويشير الكثير من الدلائل القوية إلى قيام حضارة متقدمة في تلك المنطقة حيث ثبت أن الحلي والمجوهرات قد صنعت من الفضة إضافة إلى الفلزات الأخرى التي استخدمت على نطاق واسع في هذه المنطقة.

وكما ربط المكتشفون القدماء بين لون الذهبي وقرص الشمس فإنهم كذلك قد ربطوا بين اللون الأبيض الفضي الجميل لفلز الفضة المتميز وضوء القمر، وقد أطلقوا على الفضة أسماء مرتبطة بالقمر وأعطوها رمز الهلال (المراحل الأولى من القمر) ثم جاء بعد ذلك الاسم

اللاتيني للفضة وهو Argantum (ومنها جاء الرمز الكيميائي لفلز الفضة Ag) وهذا الاسم اللاتيني كان تحويراً للكلمة اللاتينية القديمة معناها الأبيض اللامع أو الناصع.

4-8-5-1: استخلاص الفضة:

كما ذكر في استخلاص الذهب هناك طريقتان أساسيتان للحصول على الفضة (الذهب) إما من خاماتها كمنتج أساسي أو من بعض عمليات استخلاص الفلزات الأخرى (مثل النحاس – الرصاص – النيكل) كمنتج جانبي. وعملية استخلاص الفضة كمنتج جانبي من الرصاص موضحة في الشكل (4-134). وكما سبق ذكره فإن استخلاص الفضة من خاماتها بعملية السيندة يشبه تماماً استخلاص الذهب، ولكن هناك بعض نقاط الاختلاف البسيطة يمكن إجمالها فيما يلي:

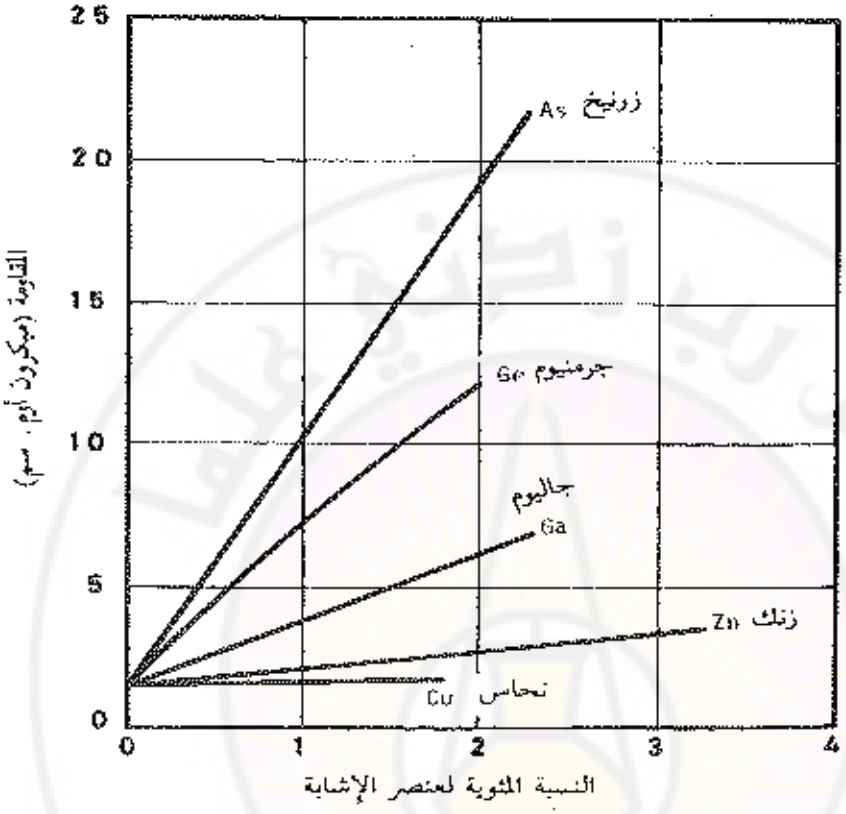
1. يجب أن يكون تركيز محلول السيانيد المستخدم مع الفضة أعلى بكثير من ذلك المستخدم مع الذهب نظراً لاختلاف الوزن الذري فالوزن الذري للفضة أكبر بكثير من الوزن الذري للذهب.
2. ينطبق ما جاء في (1) على الزنك المستخدم في عملية ترسيب الفضة المحلول الغني بها، حيث يلزم في حالة الفضة كمية مضاعفة من الزنك للكمية المستخدمة مع الذهب، ويرجع ذلك مرة أخرى لارتفاع الوزن الذري للفضة مقارنة بالذهب.
3. يجب طحن خام الفضة إلى حجم أصغر بكثير من ذلك المتبع مع الذهب.
4. يجب زيادة وقت الإذابة إلى فترات أطول من تلك التي يحتاجها الذهب
5. يفضل أن يحل الألمنيوم محل الزنك في ترسيب الفضة من محلول السيانيد، كما في التفاعل التالي:

$$6[Na_2Ag(CN)_2]+6NaOH+2Al \rightarrow 6Ag+12NaCN+2Al(OH)_3$$

4-8-5-2: خواص الفضة:

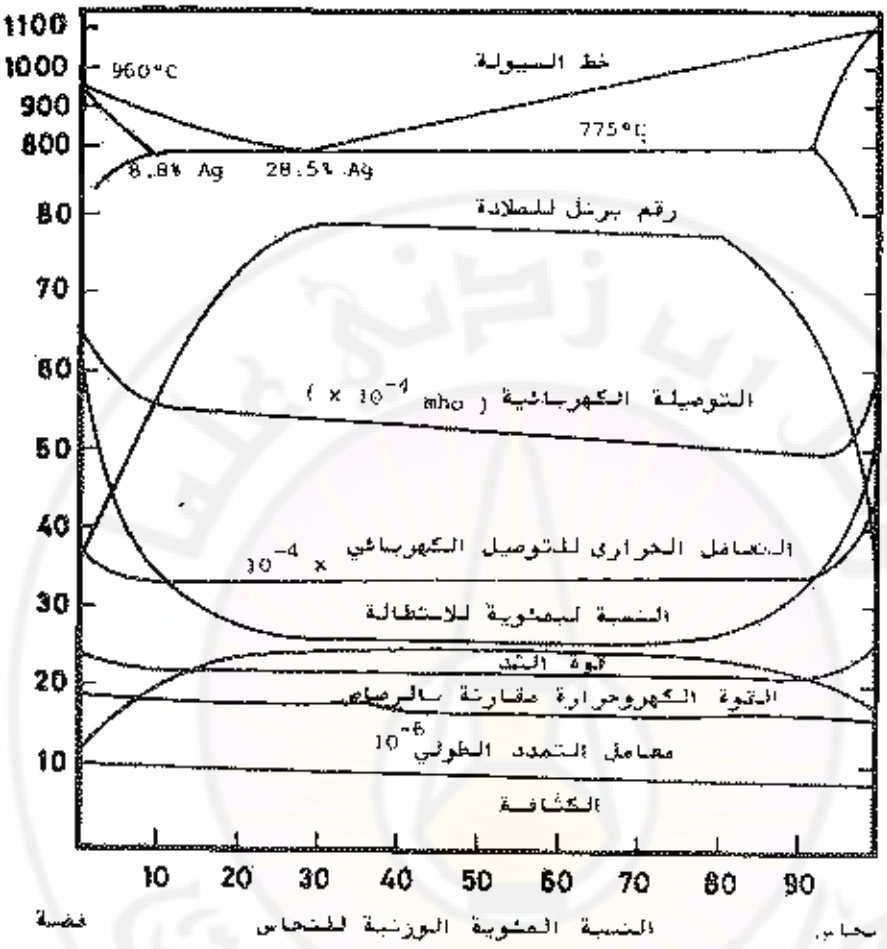
بالرغم من أن الفضة عنصر غال ومكلف تجارياً – يأتي ترتيب ثمن وحدة الفضة الثالث في سعر الفلزات – إلا أن الفضة تتمتع بالكثير من الصفات والمميزات الخاصة بها، وهي تتفوق في كثير من الخواص على الكثير من الفلزات الأخرى، ومن أهم خواص الفضة المميزة ما يلي:

1. الفضة ذات لون أبيض مميز وجميل ومحبّب كثيراً للنفس، وهناك الكثير ممن يفضلون الفضة عن الذهب كحلي وزينة.
2. مقاومة عالية للتآكل، ويمكن القول إن مقاومة الفضة للتآكل هي أهم خاصية يعتد بها، ويستخدم الفضة لذلك في صناعة كثير من أجهزة ومعدات الصناعات الكيميائية، وإضافة لذلك تستخدم الفضة في العملات المعدنية وأعمال طب الأسنان وغيرها مما سيأتي ذكره فيما بعد. والجهد القياسي للفضة هو (0.8+) فولت، أي أن الفضة هي العنصر الثالث في السلسلة الكهروكيميائية، فهي تلي البلاتين في الجهد القياسي (1.36+) فولت. وفي أي دائرة كهربائية – فيما عدا الذهب والبلاتين – فإن الفضة ستكون هي الكاثود، بينما الفلز الآخر هو الأنود الذي سيتآكل عندئذ.
3. معامل التوصيل الكهربائي والحراري للفضة عال، وتتفوق الفضة على جميع العناصر في توصيل الكهرباء والحرارة. وتوصيل الفضة للكهرباء يفوق توصيل النحاس للتيار الكهربائي بحوالي (8%)، كما أن توصيلها الحراري أعلى بكثير من توصيل النحاس بحوالي (33%) ولكن يجب تذكر أن معامل التوصيل الكهربائي والتوصيل الحراري يعتمدان كثيراً على درجة نقاوة الفضة وعلى نوع الشوائب الموجودة، كما هو مبين في الشكل (4-138) و (4-139)، حيث يقل التوصيل كثيراً بوجود الشوائب.



الشكل(4-138): تأثير الشوائب على مقاومة الفضة عند درجة حرارة (18) مئوية.

4. فلز الفضة النقي مطيل والفضة ذات قابلية متفوقة للطرق، ولكنها في ذلك أقل من الذهب.
5. تحتفظ الفضة بصلادتها إلى حد كبير عند درجات الحرارة العالية، وهي تتفوق في ذلك على معظم العناصر الفلزية.

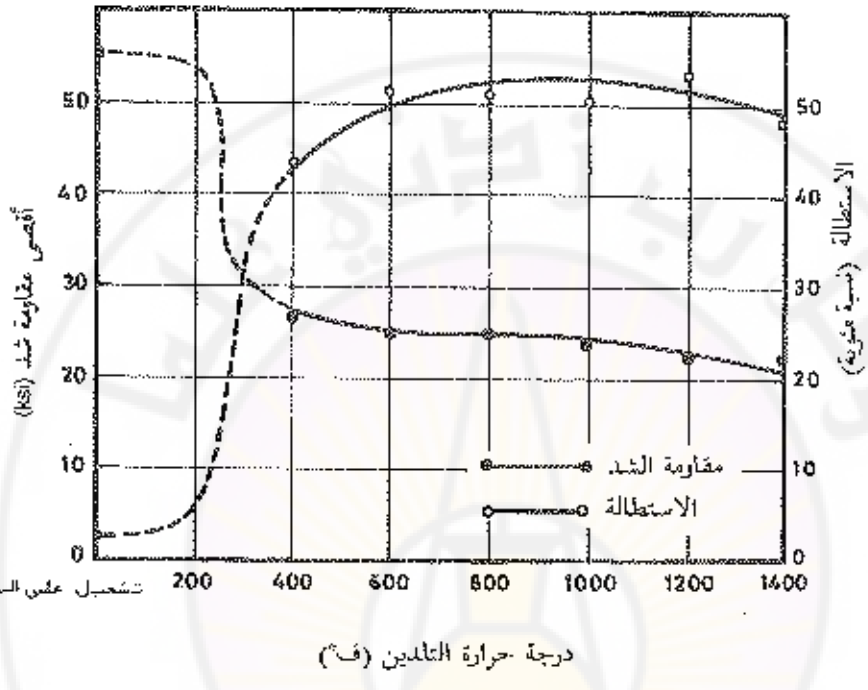


الشكل(4-139): علاقة الخواص بتركيب سبائك الفضة ـ نحاس فضة.

6. الخواص الميكانيكية الفضة حساسة، وتتوقف على تاريخ وظروف التشكيل وكمية الشوائب وحجم الحبيبات. وتأثير درجة حرارة التلدين على مقاومة الشد والصلادة مبين في الشكل (4-140) و(4-141) على الترتيب، حيث يقل مقدار كل من مقاومة الشد والصلادة بزيادة درجة حرارة التلدين، ويرجع ذلك إلى سرعة إعادة بلورة حبيبات الفضة.

7.تكوّن الفضة مع كثير من العناصر الفلزية الأخرى الكثير من السبائك سنتعرض لها لاحقا.

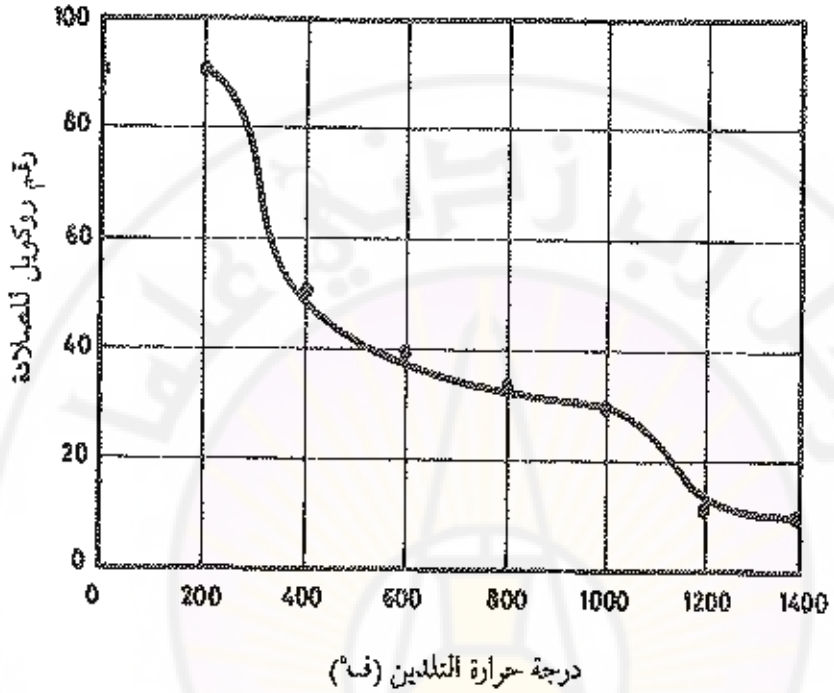
ويوضح الجدول (4-58) أهم الخواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للفضة.



الشكل(4-140): تأثير درجة حرارة التلدين على مقاومة الشد والمطيلية التجارية.

4-8-5-3: استخدامات الفضة:

تستخدم الفضة في كثير من الأغراض والتطبيقات المهمة، فهي تستخدم في أجهزة الصناعات الكيميائية والعملات المعدنية، وفي أغراض مختلفة في طب الأسنان، كما تستخدم في نقط التوصيل الالكترونية، نظرا لمقاومتها للأكسدة ومعامل توصيلها العالي للكهرباء، وفي تغطية النحاس وسبائك النحاس الأصفر والنيكل والحديد المستخدم في التوصيل الكهربائي.



الشكل(4-141): تأثير درجة حرارة التلدين على رقم روكويل لصلادة الفضة تجارية النقاوة.

أدت التطورات الحديثة في الوقت الراهن إلى استخدام الفضة كمادة مغلفة للزجاج والسيراميك والميكا، وعن طريق ترسيب الفضة تتحول المواد العازلة إلى مواد موصلة، وهذه مفيدة كثيراً في عمليات التغليف الكهربائي في المعدات والأجهزة الالكترونية. و مقدرة الفضة العالية على عكس الضوء، وكذلك سهولتها في التغليف الكهروكيميائي جعلا الفضة عنصراً على جانب كبير من الأهمية في صناعة العاكسات والأدوات المنزلية والحلي. وتكوّن الفضة العديد من السبائك ذات الاستخدامات المتعددة، سيتم ذكرها عند الحديث عن كل سبيكة.

4-5-8-4: سبائك الفضة:

هناك العديد من سبائك الفضة مبينة في جدول (4-59)، وفيما يلي نستعرض عدداً من هذه السبائك ومكوناتها وخواصها:

جدول (4-58): *بعض خواص الذهب الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية للفضة*

الخاصية	القيمة
الرمز الكيميائي	Ag
العدد الذري	47
الوزن الذري(الكتلة)	107.88
نصف قطر الذرة	1.44×10^{-10} m
التكافؤ	أحادي Ag^{+} ، ثنائي Ag^{+2} وثلاثي Ag^{+3} ولكن أهم مركبات الفضة أحادية التكافؤ
نصف قطر الأيون Ag^{+}	1.13×10^{-10} m
النظائر Ag^{107} Ag^{108}	نصف العمر 44 ثانية نصف العمر 40 ثانية
اللون عند انعكاس الضوء	أبيض فضي
التركيب البلوري	مكعب متمركز الوجه Fcc
ثابت الشبكية (a)	2.88×10^{-10} m
الكثافة	10.5×10^{3} Kg/m^3
درجة حرارة الانصهار	1234 k° (971 °C)
درجة حرارة الغليان	2228 k°(1900 °C)
الحرارة النوعية عند درجة حرارة 20م°	0.0558 cal/g °C
معامل التوصيل الحراري	0.0974 cal/cm. s. °C
معامل التمدد الحراري عند درجة حرارة 20م°	19.1×10^{6}/°C
المقاومة الكهربائية	1.622×10^{-1}ohms
الجهد القياسي	0.2225v
معامل ينج للمرونة في حالة الشد	10.3×10^{6} psi (27×10^{3}Mpa)
معامل ينج للمرونة في حالة القص	3.8×10^{6} psi (27×10^{3} Mpa)
نسبة بوازون	0.37
الصلادة على مقياس موز	2.7
حرارة الانصهار	24.3cal/g

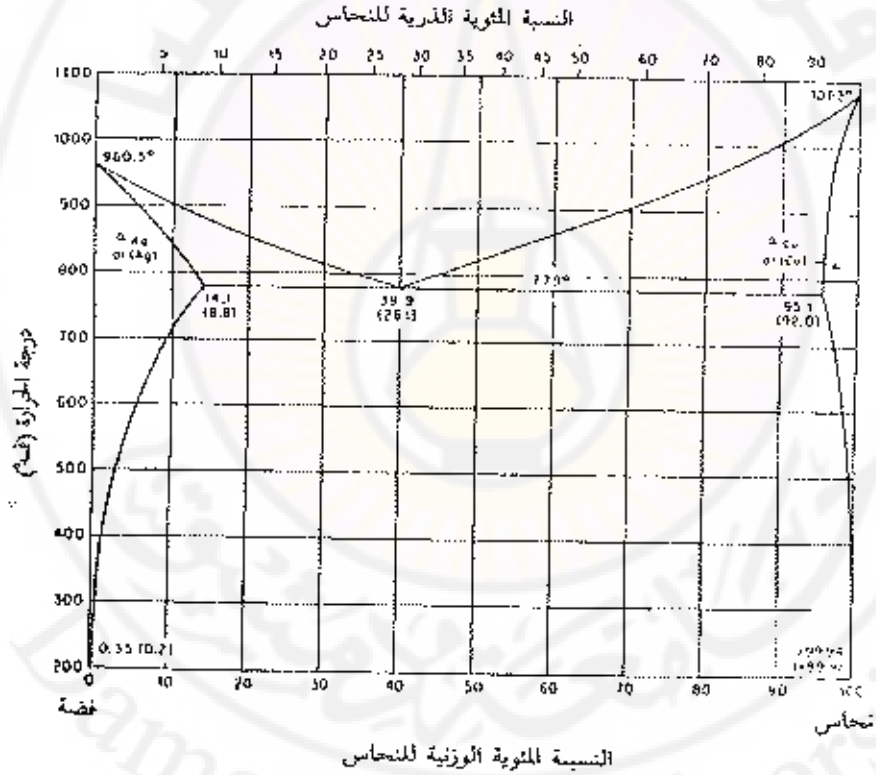
جدول(4- 59): تركيب بعض سبائك الفضة وخواصها الميكانيكية.

السبيكة	التركيب الكيميائي (٪)					الخواص الميكانيكية						الحالة
	فضة Ag	نحاس Cu	نيكل Ni	زنك Zn	إضافات أخرى	مقاومة الشد		إجهاد الخضوع		النسبة المئوية للاستطالة	رقم برنل للصلادة	
						MPa	ksi	MPa	ksi			
فضة نقية	99.99					128	18.2	55.3	7.9	54	(1)27	ملدنة ثم مبردة
فضة ذات نقاوة تجارية	99.90					350	50				90	فجائيا ثم تزمين
سبيكة سترلنج	92.5	7.5				364	52				90	لمدة (١٧) ساعة
سبيكة عملات	90.0	10.0				364	52				90	عند درجة الحرارة
سبيكة لحام عند نقطة الأيوتكتيك	72.0	28.0										(٢٨٠°م) مبردة
سبيكة كهرباء	99.55		0.2		0.25 Mg	490	70	406	58	15	68	فجائيا ثم تزمين
سبائك الأسنان	33.0	2.0		0.5	52.0 Hg 12.5 Sn	35	5	350	(٢)50		(٣)90	لمدة (١٧) ساعة عند (٢٨٠°م) مبردة فجائيا ثم تزمين لمدة (١٧) ساعة عند (٢٨٠°م)

(١) رقم فيكرز للصلادة (٢) إجهاد خضوع الانضغاط (٣) اختبار صلادة كنوب

أ- سبائك الفضة- نحاس:

يبين الشكل (4-142) منحني الاتزان الحراري لنظام سبائك الفضة- نحاس، وهو نظام أيو تكتيكي بسيط، تقع فيه نقطة الأيو تكتيك عند (28.1%) نحاس ودرجة الحرارة (780 درجة مئوية). وأقصى قيمة لذوبانية النحاس في الفضة هي (8.8%)، ويوضح اتجاه خط الإذابة إمكانية التصليد بالتزمين لعدد محدد من هذه السبائك. وتحتوي سبيكة الفضة المعروفة باسم "سترلنج" (sterling) على (7.5%) نحاس، ويمكن تصليد السبيكة المحتوية على (10%) نحاس بالتزمين، ولكن تطبيق هاتين السبيكتين واستخداماتها العملية والتجارية محدودة. والتركيب البنائي لسبيكة الاسترلنج مبين في الشكل (4-143)، ويتضح من الشكل انتظام توزيع النحاس فيها.



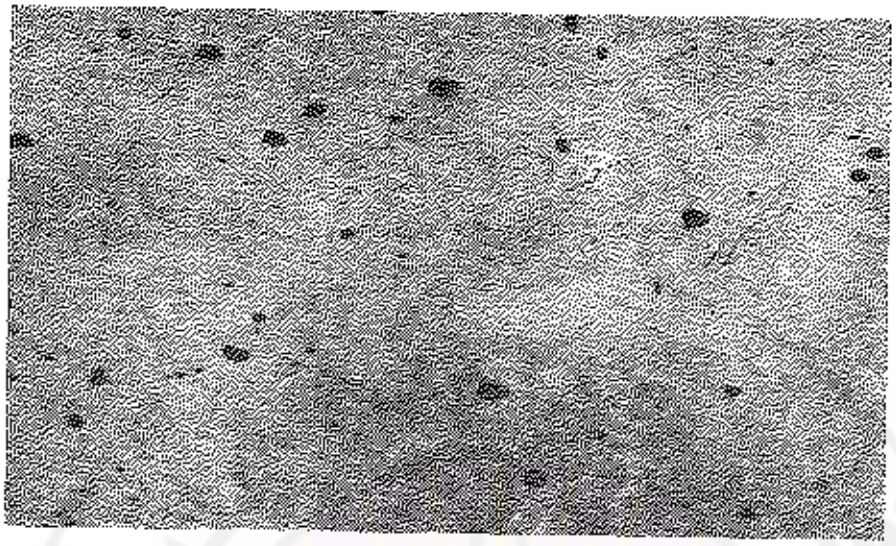
الشكل(4-142): منحني الاتزان الحراري للفضة - نحاس.

وتمتاز سبيكة استرلنج بقوة انعكاس ضوئي عالية، مما يجعلها مفيدة في صناعة الحلي وأدوات المائدة، وكذلك تستخدم في تغطية الزجاج وصناعة المرايا، وذلك لشدة وانتظام انعكاس الضوء عليها. أما سبيكة (90%) فضة (10%) نحاس، فتصنع منها العملات المعدنية، والتركيب البنائي لهذه السبيكة موضح في الشكل (4-144)، و (4-145). ويظهر أكسيد النحاس في بعض المناطق من البنية الداخلية، وهناك احتمال أن أكسيد النحاس قد تكون نتيجة تفاعل النحاس مع الأكسجين أثناء التصهر والصب.



الشكل(4-143): قطاع ميكروسكوبي في سبيكة الاسترلنج (925) غراما بعد نمشها كهروكيميائيا.

إن أهم سبائك الفضة – نحاس وأكثرها استخداماً هي السبيكة التي تتكون من (72%) فضة – (28%) نحاس (سبيكة الأيوتكتيك). ويبين الشكل (4-146) التركيب البنائي الميكروسكوبي لسبيكة النحاس – فضة عند نسبة نحاس أقل من الايوتكتيك، ويبين الشكل (4-147) عند نقطة الأيوتكتيك. وتستخدم سبيكة الفضة – نحاس الأيوتكتية في اللحام بالمونة (brazing)، وتمتاز سبائك الفضة- نحاس بالخواص والميزات التالية:



الشكل(4-144): التركيب الميكروسكوبي بدون نمش لسبيكة الفضة ـ نحاس (800) غرام فضة موضحا به أكاسيد النحاس (Cu_2O).



الشكل(4-145): التركيب الميكروسكوبي لسبيكة الفضة ـ نحاس (800) غرام فضة بعد النمش، ويظهر فيها حبيبات أكسيد النحاس (Cu_2O).

(أ)- مقدرة عالية على تبلل الأسطح المختلفة عند درجات حرارة منخفضة نسبياً وأقل بكثير من درجة حرارة انصهار الفلز المراد توصيله.

(ب)- لا تثيب ولا تسبب تأكل سبائك الفولاذ في الظروف العادية.

(ج)- عالية المطيلية بل متفوقة المطيلية، وهذه الخواص مبينة في الشكل (4-138)، ومن ثم تكون الوصلات الناتجة عن اللحام مطيلية وتقاوم الصدمات والاهتزازات.

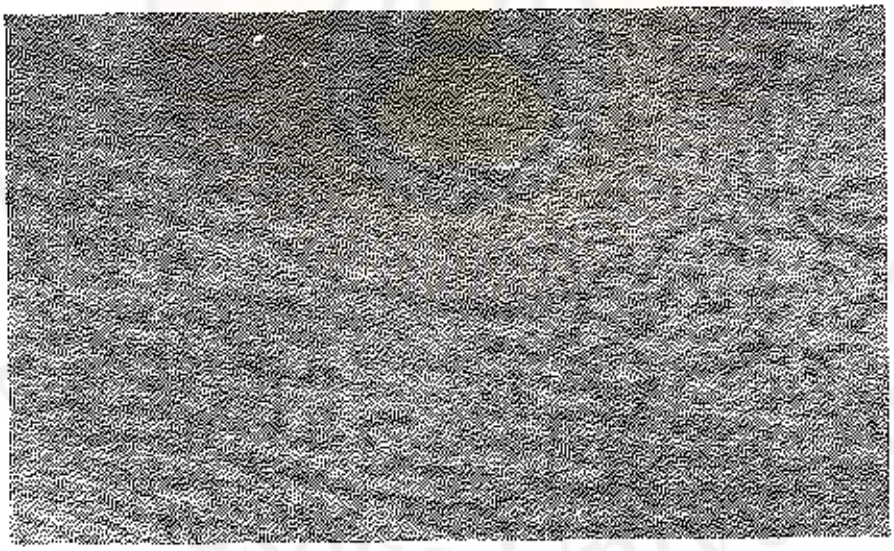
(د)- قابلية السبائك للطرق عالية، وبهذا يمكن تشكيلها في أي شكل وبأية أبعاد.

(هـ)- يمكنها توصيل العديد من المواد الفلزية معاً حتى غير المتشابهة منها.

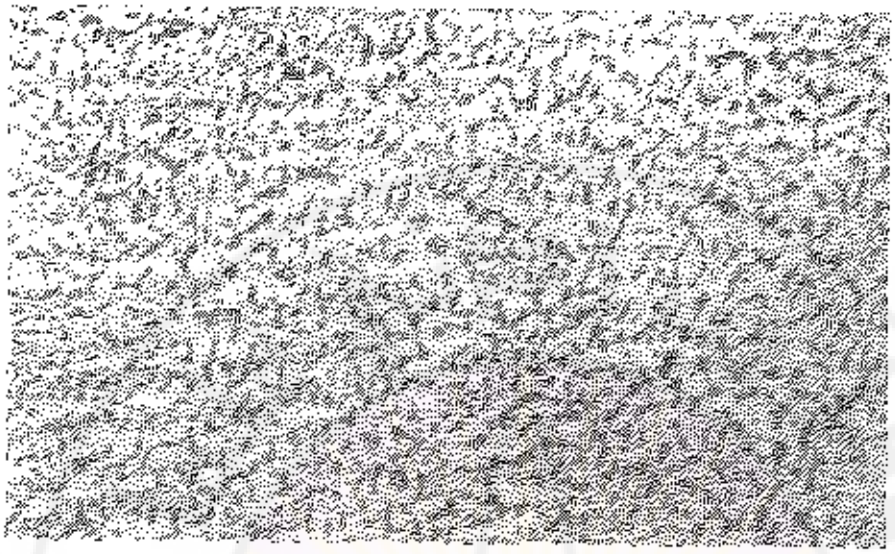
(و)- يتغير التوصيل الكهربائي لهذه السبائك حسب التركيب، وبعضها يكون معامل توصيله من (50 -70%) من معامل التوصيل القياسي للنحاس، ولهذا فإنها تضيف قدراً ضئيلاً من المقاومة للدوائر الكهربائية.

(ز)- ذات مدى واسع من التوصيل الحراري تبعاً لتركيب السبيكة، ويمكن اختيار التركيب المناسب للغرض الذي ستستخدم فيه.

يضاف في بعض الأحيان النيكل أو الكادميوم أو البلديوم أو الزنك أو القصدير أو الفسفور للحصول على خواص معينة للاستعمال في الأغراض الخاصة طبقاً لخواص السبيكة. وتستخدم هذه السبائك بتوسع في وصلات اللحام الكهربائية ; نظراً لمقاومتها للأكسدة.



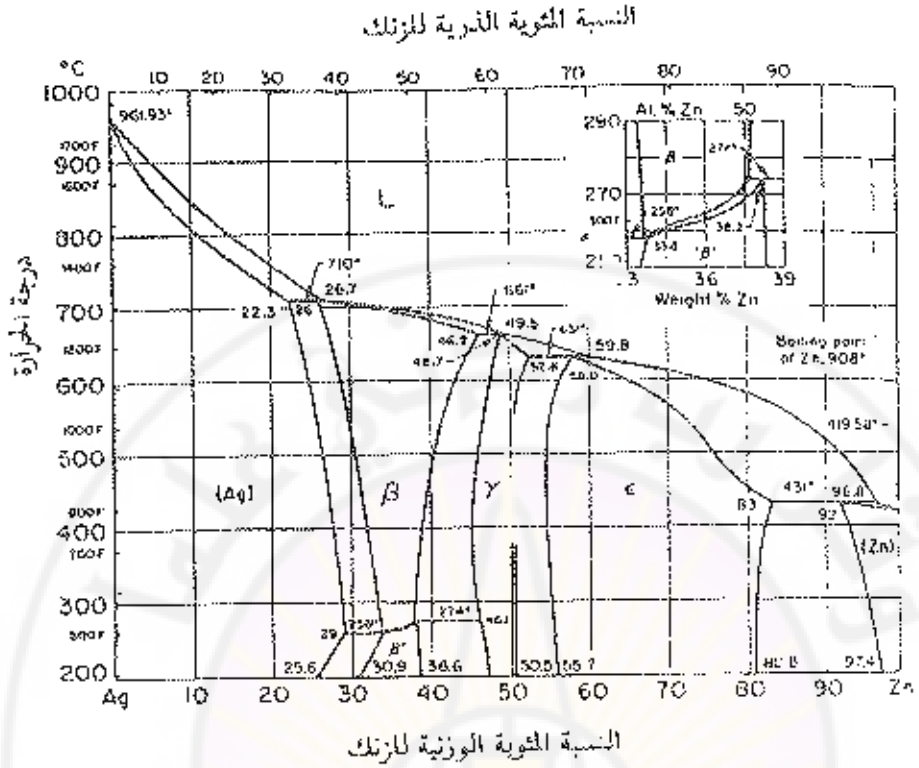
الشكل(4-146): التركيب البنائي الميكروسكوبي بدون نمش لسبيكة فضة ـ نحاس عند نسبة نحاس أقل من نقطة الإيوتكتيك (28% نحاس).



الشكل(4-147): مقطع ميكروسكوبي في سبيكة الفضة ـ نحاس بعد التعتيق عند نقطة الإيوتكتيك (28% نحاس).

2- سبائك الفضة – نحاس – زنك:

تعرف سبائك الفضة – نحاس – زنك باسم سبائك الفضة الحام، وإضافة إلى عنصري النحاس و الزنك، فإن السبيكة تحتوي غالباً على الكادميوم والقصدير، وفي عمليات التوصيلات بلحام الموجة، فإن نظام الربط أو التوصيل يشبه اللحام الطري لسبائك القصدير عدا أنها تحدث عند درجات حرارة عالية، ولا يحتاج اللحام في هذه الحالة إلى صهر المواد المراد توصيلها، حيث يتم الربط عن طريق انتشار مادة اللحام وتخللها لسطحي فلزية المواد المراد وصلها. والخاصية المهمة في هذه السبائك هي انخفاض درجة حرارة انصهارها، مما يجعل هذه المادة تنساب بحرية إلى نقطة الاتصال. ومنحنى الاتزان الحراري للفضة – زنك موضح في شكل (4-148) وهو من النظم المركبة التي يتكون فيها العديد من الأوجه.



الشكل(4-14%): منحني الاتزان الحراري للفضة ـ زنك.

3- سبائك الفضة – قصدير – زنبق:

تمتاز سبائك الفضة – قصدير – زنبق بخاصية مهمة جداً، وهي عدم حدوث تغير – أو تغير طفيف جداً – في الأبعاد عند تجميدها من الحالة السائلة، مما يشجع كثيراً على استخدام هذه السبائك في تطبيقات طب الأسنان، ولكن هناك محاذير معينة لا بد من أخذها بعين الاعتبار، فيجب التأكد من أن التركيب الكيميائي صحيح كما أن هذه السبائك ذات حساسية شديدة جداً للظروف المحيطة فمثلاً زيادة الرطوبة والزئبق المضاف أثناء عملية التملغم يسبب تمدد المادة أثناء التجمد، وإذا كانت عملية التملغم غير كافية أو غير مكتملة، فإن عملية حشو الأسنان تصبح غير مضبوطة وغير صحيحة، ويؤدي ذلك إلى تآكل السبيكة ومن ثم تلف الأسنان أو الوصلات (الأسلاك) المصنوعة من هذه السبيكة.

وقل رب زدني علما
Damascus University

الفصل الخامس

مدخل لتطبيقات الحاسوب في سباكة المعادن

Introduction to Computer Applications in Metal Casting

5-1: مقدمة:

تصف الفقرات في هذا الفصل بعض التطورات الحاصلة في مجال تطور الحوسبة في تقنية السباكة. فقد أصبح الحاسب مستخدماً بشكل متزايد في تصميم النماذج والمسبوكات والمهام الأخرى في صناعة السباكة، وسنركز في هذا القسم على النمذجة الحاسوبية للظواهر المتعلقة بتجمّد المعادن المنصهرة.

تصف الفقرة الأولى من هذا الفصل نمذجة انتقال حرارة التجمد" ازدياد تطبيقات الحاسوب في المقياس الماكروي لنمذجة تجمد المصبوبة، أي انتقال جبهات التجمد. وتنظر الفقرة الأخيرة "نمذجة تطور البنية البلورية" في القضية التي تطورت حديثاً – النمذجة الميكروية والماكروية– حيث يمكن استنتاج تطور البنية البلورية منها.

على الرغم من تقدم علم وفن نمذجة التجمد فقد أصبح واضحاً أنه من غير الممكن دراسة البنية الميكروية أو الماكروية في جميع التطبيقات الممكنة دون الأخذ بالحسبان ظواهر انتقال الحرارة سواء الحرة أو القسرية في مناطق المعدن السائلة أو السائلة جزئياً. ولهذا السبب ينظر الباحثون بعناية في مسألة نمذجة جريان المعدن المنصهر في نظام الصب والتبادل الحراري الحاصل أثناء الانتقال الحراري الحر والقسري. وهكذا تصف الفقرة الثانية من هذا الفصل "نمذجة جريان المائع" كيفية تطبيق الحوسبة لدراسة جريان المعدن عبر نظام التمرير داخل قحوة قالب الصب.

توضح الفقرة الثالثة "النمذجة المشتركة لجريان المائع وانتقال الكتلة / الحرارة" كيف أن الفعل المشترك لجريان المائع وانتقال الكتلة / الحرارة الذي يحدث أثناء سكب وملء السبائك يمكن أن يؤثر على توزع الحرارة الأساسي للمعدن المنصهر.

إن الطرائق المتبعة حالياً في جميع أنماط التحليل هذه تتطلب بشكل عام زمناً يؤخذ بالحسبان من أجل الإعداد والتشغيل الذي يتبع بدوره لقدرة الحوسبة في الآلات المتوفرة حالياً. وبما أن هذا المجال يتطور باستمرار فلم يأخذ المؤلفون على عاتقهم النظر فيما هو مجد اقتصادياً في الوقت الحاضر. وعلى العكس نظروا إلى تزايد الطرائق الفعالة في المستقبل القريب ويقصد هنا تقدم المعلومات والحاسوب. ويؤكد كل مؤلف المبادئ الأساسية والنتائج الفنية في المسألة بدلاً من تقديم معالجة عالية الدقة لتفاصيل التحليل والنظرية المتعلقة به، ويمكن إيجاد هذا الأخير في المراجع المتوفرة في نهاية كل فقرة.

ج- 2: مزايا النمذجة الحاسوبية:

يقدم التصميم بمساعدة الحاسب (CAD) والتصنيع بمساعدة الحاسب (CAM) والهندسة بمساعدة الحاسب (CAE) عدداً من المزايا في السباكة، وتتضمن:

زيادة مردود السباكة في الباوند المعدن المسكوب.

- تحسين جودة السبائك (غياب الفجوات الغازية)
- رفع إنتاجية نظام السباكة.
- تؤمن النماذج الهندسية بيانات عن حجم المسبوكة ووزنها ومساحة سطحها، الأمر الذي يسرع تقدير كلفتها ويسمح بالتصميم الأمثل لنظام الصب.
- محاكاة انتقال الحرارة وهذا ما يسمح بزمن تصميم أقصر.
- تخفيض التكاليف عن طريق أتمتة تشغيل النماذج
- قلة النماذج التجريبية؛ وأزمنة قيادة أقصر من وضع فكرة التصميم حتى الحصول على المنتج النهائي.
- سهولة في تجهيز الأدوات وتقييم التغيرات الهندسية.
- رفع قيمة إنتاجية المسبوكات مختلفة التصاميم في نظام الإنتاج بالدفعات.

القضايا التي سنحيط بها:

- دمج نمذجة التجمد مع حركة المائع في الأبعاد الثلاثة.
- تحفيز المستخدم للتعامل مع أنظمة المحاكاة والنمذجة.
- إغلاق حلقة التغذية الراجعة في التحكم بعملية السباكة.

5-3: نمذجة انتقال حرارة التجمد:

5-3-1: مقدمة:

أصبح للحاسوب الرقمي بصورة استثنائية أثر هام في التصميم الهندسي للمنتجات المعقدة متعددة المكونات وذات القيمة المضافة العالية (على سبيل المثال: المنشآت الفضائية). وقد امتدت تطبيقات هذا الجهاز في بداية الستينيات في مسائل انتقال الحرارة وتحليل الإجهاد لتشمل العديد من الصناعات الأخرى التي تتضمن الإنشاءات البحرية، وتصنيع أوعية الضغط وعدد الآلات وتصميم قطع السيارات.

إن تطبيق الحاسوب في هندسة العمليات وعلى وجه التحديد في إنتاج المسبوكات بقي محدوداً في بعض مؤسسات سباكة المعادن الكبرى حول العالم. وهذا مفاجئ حيث كانت قدرة الآلات الحوسبة جيدة في بدايات الأربعينيات، حيث أجريت وبتمويل من شركة (American Foundrymen) دراسات باستخدام الحاسوب التماثلي للتنبؤ بظهور نماذج التجمد في المسبوكة. ومن الصعب معرفة سبب عدم اكتراث الشركة بهذا العمل ضمن خبراتها في سباكة المعادن، ومع ذلك من الواضح فعلاً أن محاكاة تجمد المسبوكات لأي معقد باستخدام شبكات من المقاومات والمكثفات المستخدمة في التقنية التماثلية هي أمر غير عملي.

ولاشك أن أول مرجع منشور عن استخدام الحاسوب في التطبيق المتعلق بالسباكة عام 1962 لـ (Fursund) في الدانمرك حيث درس انتشار الحرارة في رمال السباكة وتأثيرها على إنهاء السطوح في مسبوكات الفولاذ. وقد ظهر تطبيق التنبؤ بنماذج التجمد متأخراً في عام 1965 باستخدام برنامج انتقال الحرارة اللحظية المطور سابقاً من أجل البرنامج الفضائي الأميركي. ويناقش (Hanzel & Keverian) التطبيق الناجح لطريقة التفاضل المنتهي (FDM) لإنتاج مسبوكات الفولاذ المتين.

وقد ذهبت لجنة انتقال الحرارة في شركة (American Foundry men) إلى أبعد من ذلك في تطبيقات الحاسوب في أواخر الستينيات، وأسفر تمويل البحث في جامعة (Michigan) عن عدة منشورات هامة. ومن ذلك محاكاة المسبوكات التي نفذت من قبل (Pehlk, Wilkes) حيث سكبت من مواد متنوعة (الفولاذ الكربوني، الألمنيوم، السيلكون، النحاس المعالج بالرصاص) وجميعها كانت مسبوكات بالرمل. وقد تم الحصول على نتيجة مرسومة هامة، وذلك في الوقت

الذي كانت فيه توقعات برنامج (FDM) تركز بشكل تام على الخصائص الفيزياحرارية للقولبة ووسائط السباكة.

وبالتزامن مع هذا البحث قام فريق نرويجي بالتوسع في أعمال (FDM) على قضبان الألمنيوم المسبوكة بالرمل لتشمل القالب الدائم (قالب الثقالة) وقوالب السباكة بالضغط المنخفض.

وقد ظهر ازدياد ملحوظ في عدد المنشورات ضمن هذا المجال منذ بداية الثمانينيات، ونتج العديد من هذه المنشورات عن فرق البحث المشكلة خصيصاً بهدف دراسة تقنيات المحاكاة الحاسوبية واستخدامها كأدوات في إنتاج المسبوكات المعدنية في العالم. وهناك جهود مشتركة ملحوظة في هذه الأبحاث مثل: (Sahm, Hansen, Coworkers) في أوربا، و(Ohnaka, Aizawa, Colleagues) في اليابان، و (Desai, Present authors) في الولايات المتحدة. وتتضمن جلسات المؤتمر الدولي الأخير تقارير مختصرة عن تقدم معظم فرق البحث الناشطة حالياً في نمذجة التجمد (التصلب). وقد حدث الكثير من التقدم في هذا المجال على التوازي مع التقدم في حقل محاكاة الملحام والموجودة في جلسات المؤتمرات الناجحة المنشورة المتعلقة بنمذجة المسبوكات والقطع الملحومة التي تمت بتمويل من المؤسسة الهندسية.

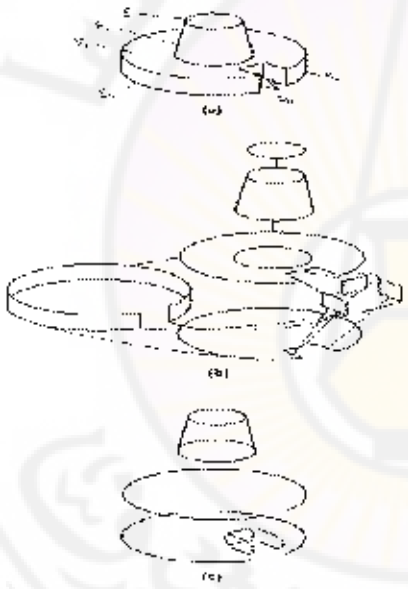
5-3-2: التجزيء والتوصيف الهندسي:

تعطى صيغ المعادلات التفاضلية التي تصف انتشار الحرارة داخل قالب الصب مع تقدم التجمد في المسبوكة في الفقرة "نمذجة تطور البنية البلورية" في هذا الجزء. لمعرفة مسيرة التجمد في المسبوكات الصناعية المعقدة، يجب أن تعطى الصيغة ثلاثية البعد، كما يجب أن تحدد الشروط الحدية الصحيحة. وتوجد قبل ذلك بعض الأسباب اللازمة للتعريف الدقيق والواضح بالخصائص الهندسية والسطحية للمسبوكة ونظام الصب الخاص بها وهي:

- إجراء التحليل لتوليد التصميم المبدئي للأدوات.
- تقدير التكاليف الإجمالية لإنتاج المسبوكة بهدف التسعير.
- تحديد قدرة الصهر وتجهيزات القولبة اللازمة في خطة السكب.
- تجهيز الأشرطة المغناطيسية أو وسائط تخزين المعلومات الأخرى المطلوبة لقيادة أدوات الآلة اللازمة في تصنيع النماذج وعلب النوى ومغطس نموذج الشمع والقالب الدائم وقوالب السباكة القابلة للفتح.

تتبع الحاجة إلى توفر هذا التمثيل الهندسي وربطه الصيغة المختارة للتمثيل بعملية التجزيء، من تكون الوحدة المتكاملة من أجزاء منفصلة. وهو ما تم تمييزه في البدايات من قبل عدد محدود من فرق البحوث، لتلتفت أولاً إلى مسألة الخصائص الهندسية الإجمالية والتي يمكن الحصول عليها باختبار كفاءات العديد من المنمذجات الهندسية المتوفرة حالياً. وفيما يلي الأنماط الثلاثة الأكثر استخداماً في التمثيل الهندسي: شكل(5--1).

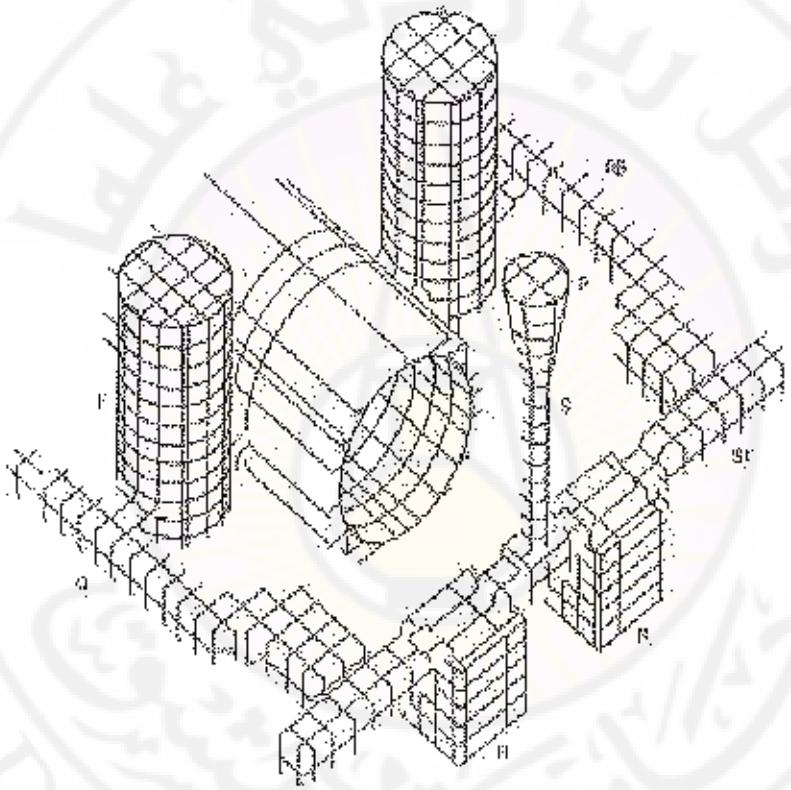
- التمثيل الإنشائي المصمت (أو التمثيل الحجمي) (csg)
- التمثيل السطحي (b-rep)
- التمثيل بشبكة الخطوط (wf)



الشكل (5-1): الأنماط الثلاثة للتمثيل الهندسي ثلاثي الأبعاد لعينة سباكة.
(a): تمثيل إنشائي مصمت،
(b): تمثيل سطحي،
(c): تمثيل بشبكة الخطوط.

لا يعد منمذج شبكة الخطوط منمذجاً مصمتاً حقيقياً ولكنه يصنف كشكل من أشكال النمذجة الهندسية لكونه جزءاً هاماً من الترميز الحاسوبي لحزم البرمجيات التجارية الخاصة بتحليل العناصر المنتهية. أما كل من التمثيل الحجمي والسطحي فيأتي غالباً مدمجاً ضمن حزم برمجيات التصميم بمساعدة الحاسب (CAD). ويبين الشكل(5--2) نموذجاً من نوع csg لمقطع جزئي في مسبوكة ثخينة الجدران مع نظام الصب. ولا تكتفي

صيغ النمذجة المعاصرة بإزالة الخطوط المخفية فحسب بل تسمح أيضاً باستخدام الألوان والظلال. ويبين الشكل(5-3) تمثيلاً لمسبوكة صغيرة تستخدم في الطيران. وقد يكمن الاختبار الحقيقي لفائدة حزمة برامج النمذجة في قابليتها على تمثيل مجالات الأشكال المعقدة كافة الموجودة ضمن السباكة التجارية. ويعد دمج الزوايا (fillet) السمة الأكثر ظهوراً في جميع أشكال السباكة الشائعة وهي ضرورية في صنع النموذج وتشاهد عند تقاطع مجسم مع مجسم آخر. الشكل(5-4).

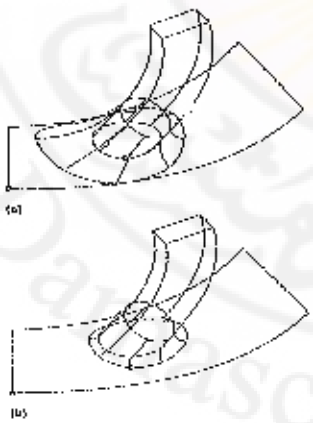


الشكل(5-2): قسم من النموذج الهندسي لمسبوكة مع نظام الصب باستخدام نمذجة csg. حيث F مرضع (مغذي)، G فتحة توزيع، P حوض الصب، R حجرة ارتداد، RB قناة فرعية، S قناة الصب الرئيسية، ST مجمع الخبث.

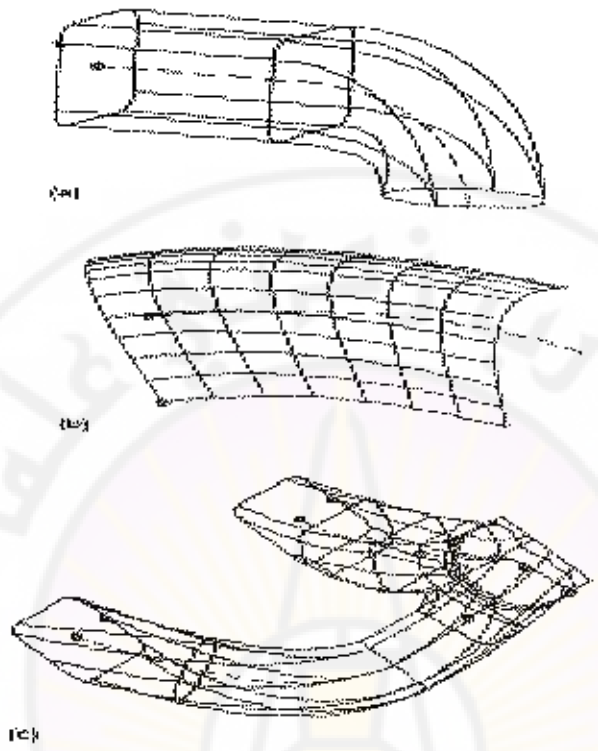


الشكل(5-3): نموذج هندسي ثلاثي الأبعاد مقطوع جزئياً لمسبوكة صغيرة مستخدمة في الطيران. [Hill & J.T. Berry] من جامعة الباما.

على الرغم من أن تقنية النمذجة السطحية لا تؤمن توصيفاً هندسياً تاماً للكائن، إلا أنها تشكل أساساً لإحدى أنجح المحاولات البعيدة للربط بين التصميم والتصنيع بمساعدة الحاسب في صناعة سباكة المعادن، ويعد برنامج DUCT الذي نظمته جامعة Cambridge قادراً على توليد نماذج سطحية انطلاقاً من محور مركزي ومجموعة من المقاطع المتعامدة معه، الشكل(5-5) ويمكن لهذه المعلومات أن تنقل إلى آلات تصنيع النماذج وصناديق الذوى على أسس رقمية.



الشكل (5-4): دمج السطوح مع بعضها البعض باستخدام خاصية دمج الزوايا (Fillet) عند تمثيل نماذج صنع القوالب أو عند دراسة المحاكاة. (a) دمج عادي مع حدود الحوافد، (b) دمج بنصف قطر ثابت.



الشكل(5-5): الطريقة التي يتم فيها استخدام برنامج النمذجة السطحية DUCT لبناء النموذج انطلاقاً من محور مركزي (الخط المنقط) وسلسلة من المقاطع العرضية المتعامدة. تتصل المقاطع العرضية بوساطة منحنيات (Bezier). وقد استخدمت هذه الطريقة في إنتاج السيارات المتنوعة. (a) نموذج DUCT مفرد مغلق، (b) نموذج DUCT مفرد مفتوح، (c) مزاوجة بين عدة نماذج DUCT مغلقة.

يجب على مهندس طرائق السباكة امتلاك صورة دقيقة عن مواقع وأبعاد المكونات المختلفة لنظام الصب (الممرات والأنظمة الفرعية للتوزيع) التي ستستخدم أثناء السكب، وذلك قبل وذلك قبل بناء النموذج الموصف أو الدخول في محاكاة التجمد. ويوجد منهجان متباعدان كبديلين عن الفن القديم في القص والتجريب. وتستند هاتان التقنيتان كلاهما إلى الحاسوب، إحداها على وجه الخصوص الاستخدام السهل المتوفر على الحاسوب الشخصي بدلاً من الحاسب المركزي

الضخم الذي تتطلبه كل من برامج التمثيل الهندسي (cgs, b-rep) والحوسبة الرقمية (FDM, FEM) وتعرف هاتان التقنيتان بـ:

- برامج هندسة أنظمة الصب في السباكة ذات الأغراض الخاصة
- برامج الأنظمة الخبيرة ذات الأساس المعرفي

5-3-3: برامج الأغراض الخاصة:

تندرج العديد من البرامج تحت فئة برامج الأغراض الخاصة. وأحد هذه الأنواع هو برنامج Novacast الذي يحسب حجوم المرضعات باستخدام قاعدة Chvorinov المعروفة كما يحدد موقع تلك المرضعات باستخدام العديد من قواعد خط التغذية المستنتجة تجريبياً. ويقوم البرنامج أيضاً بتقريب الخصائص الهندسية لنظام صب باستخدام تقريب برنولي وبعض البديهيات التجريبية. وقد لاقى هذا البرنامج قبولاً واسعاً نسبياً على مستوى مصانع السباكة في العالم. وفي الولايات المتحدة تستخدم برامج شركة AFSoftware وغيرها من البرامج المطورة في جامعة Wisconsin على نطاق واسع.

1- النظم الخبيرة ذات الأساس المعرفي: وهي برامج للحواسيب الصغيرة مثل التي تحدثنا عنها أعلاه وتستخدم بشكل وافٍ في تصميم أنظمة الصب في المسبوكات ذات الطبيعة غير الحرجة نسبياً. والمستخدمة كأجزاء في أنظمة الطيران أو أنظمة الأمان في أوعية الضغط وعندما تكون المقاييس الهندسية ضرورية.

وفي مثل هذه الحالات تبرز الحاجة إلى النظام الخبير ذي الأساس المعرفي وقاعدة البيانات المرتبطة به. حيث تتلاشى الخبرات العملية في ممارسة صناعة السباكة في مؤسسة متخصصة مع الموظفين المتقاعدين أو الذين يتركون العمل. ومع أنه لا يوجد حل وحيد لمسألة نظام الصب الخاص بمسبوكة ما، تتوفر للأخذ بالحسبان العديد من الآراء القيمة والمتضاربة أحياناً. وقد بدأت هذه النقاشات بالظهور في أدبيات هذا المنهج في تحضير تصميم نظام الصب الذي سيختبر فيما بعد بالمحاكاة. ومن المتوقع تزايد انتشار هذه التقنية في السنوات العشر القادمة.

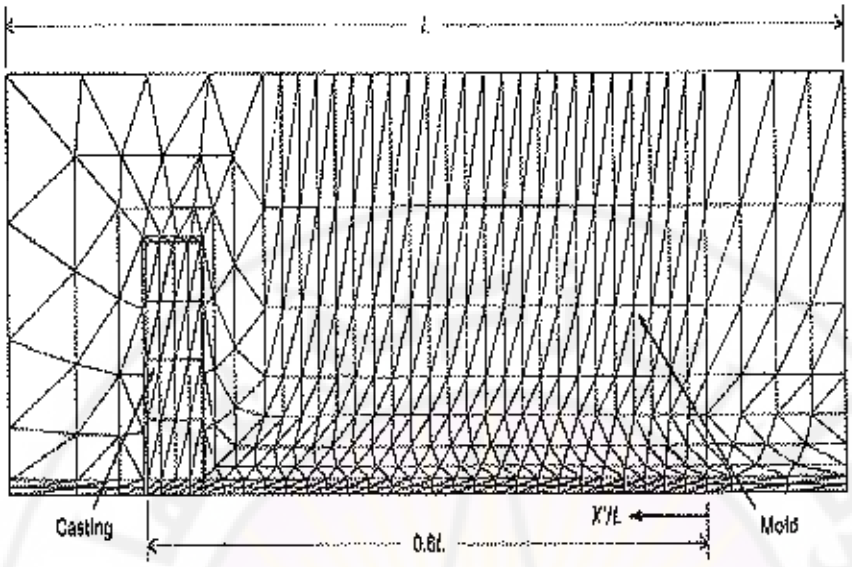
2- برامج طريقة العناصر المنتهية (FEM): وتهتم بمسألة تجزيء الحجم داخل وحول المسبوكة (فجوة القالب والقالب نفسه) ويوجد العديد من البرامج التي تنفذ تقسيم جزئي وتحضر

على التوازي ملفات تصف ذلك التجزيء (عدد العناصر والعقد وغيرها). يتوافر حالياً العديد من مخططات التشبيك التجارية، التي تسمح بتطبيق شبكات عالية الكثافة في المناطق التي يتوقع فيها تدرج حراري عال، وهنالك مثال عينة تشبيك لكل من القالب وفجوة القالب مبينة في الشكل(5-6). لم تجر محالة خاصة لتنويع كثافة الشبكة في مواقع مخصصة. وتجدر الإشارة أن هذه الهيئة مبينة بالشكل(5-6) وهي تمثل كائناً ثنائي الأبعاد. وعلى الرغم من ذلك يوضح الشكل(5-6) كيف أن قدرة النظام الحاسوبي على حفظ الملفات تزداد بشكل سريع مع تعقد تصميم المكونات.

3: نظام الحوسبة: لقد استخدمت العديد من البرامج عمومية الأغراض والكبيرة المقياس المتوفرة تجارياً، في المحاكاة الناجحة للمسبوكات. ويصنف الجدول (5-1) خصائص بعض البرامج الكبيرة المقياس من منطلق استخدامها في حل مسائل انتقال الحرارة. وانطلاقاً من هذه القيود فقد اختارتها بعض فرق البحث لبناء برامج المحاكاة أو الحل الخاصة بها. وقد خصص ترميز FEM المعد للأغراض الخاصة لتطوير هذا النوع من البرامج، وهذا النظام المخصص (MSS) المسمى محاكي ميتشيغن للتجمد كتب خصيصاً لنمذجة مسائل الحالة المستقرة العاسة أو انتقال الطاقة اللحظي المواد ذات الخصائص غير الخطية والتحول الطوري وحقول السرعة للجريان الحجمي المفترض.

ويمكن أن تدعم هذه البرامج عناصر من النمط الديكارتي ثنائي الأبعاد أو الأسطواني أو الديكارتي ثلاثي الأبعاد (بما في ذلك عناصر مقاومة التماس السطحي)، أي بالمحصلة ثلاثة أنماط من نظم الإحداثيات وعشرة أنماط من العناصر. ويسمح المحاكي عند حل المعادلات الحاكمة الأساسية باستخدام الشروط الحدية التالية:

- تحديد درجة حرارة
- تحديد تدفق حراري
- تحديد انتقال الحرارة بالإشعاع
- تحديد انتقال الحرارة بالحمل



الشكل(5-6): يبين كيفية تشبيك القالب المراد سكبه مع الريزر مع فجوة القالب.

جدول(5-1): مقارنة برامج ANSYS و MARC و MITAS-II مع الهدف المثالي لبرنامج محاكاة سباكة المعادن.

الخاصية	الهدف المثالي	ANSYS	MARC	MITAS-II
سهولة الإعداد والاستخدام	سهل	صعب	متوسط الصعوبة	متوسط الصعوبة
تكلفة التشغيل	منخفضة	مرتفعة	مرتفعة	متوسطة
قابلية الحساب المباشر للحرارة الكامنة	نعم	لا	نعم	نعم
ترميز مخصص لانتقال الحرارة	نعم	لا	لا	نعم
الدقة	جيدة	جيدة جداً	جيدة جداً	جيدة جداً
مقدرات المعالجة السابقة واللاحقة	جيدة	جيدة	جيدة	مبنة

وبما أن التعبيرين الواردين في الشرطين الحديين الثالث والرابع يملكان الصيغة الرياضية نفسها، يطلب فقط ثلاثة تعبيرات لتمثيل الشروط الحدية الأربعة. يجب حالياً أيضاً تحديد الحقل الحراري الابتدائي الموحد. وتدخل الحوسبة في استخدام طريقة Galerkin للأوزان المتبقية. تتضمن عملية تجزيء الشكل الهندسي استخدام المثلثات والمستطيلات الملتوية وذلك بالتوافق مع المسبوكات ثنائية أو ثلاثية الأبعاد التي تتم نمذجتها. وتتم في الوقت الحاضر تقسيم مجال معين بشكل يدوي. ويباشر تحقق البرنامج أولاً: باستخدام الحالات التي يوجد فيها حلول تحليلية وبشكل أساسي من أجل انتقال الحرارة اللحظي الأحادي والثنائي والثلاثي الأبعاد بوجود شروط حدية متنوعة ولكن دون التجمد، ثانياً: في الحالة التي تتضمن حداً للحرارة الكامنة ولكن حرارة عظمى صفرية، والتي يوجد من أجلها حل تحليلي، وأخيراً من أجل مجموعة من الأمثلة المتناظرة محورياً والثلاثية الأبعاد التي تتضمن تجمداً فعلياً للمعادن، حيث يباشر التحقق تجريبياً من مقاييس مزدوجات حرارية أو من التقطيع.

تتم محاكاة المسبوكات الفعلية التالية:

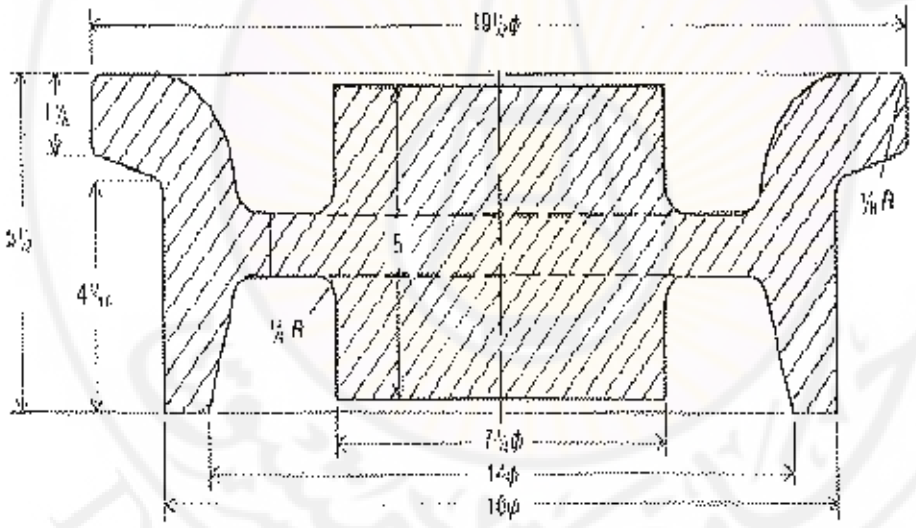
- سبائك حديد الصب الرمادي الأسطوانية المصبوبة في الرمل الجاف
- سبائك الألمنيوم Al-13Si الأسطوانية المصبوبة في الرمل الجاف
- سبائك الفولاذ الكربوني لعجلات القطار
- صفائح المسبوكات الخلائطية IN-100

يتم الحصول على توافق بين التجريب والمحاكاة في الحالات الثلاث الأولى.

لقد اختيرت مسبوكة عجلة القطار كمثال لمسبوكة صناعية. ولا تتوفر معطيات مزدوجات حرارية تجريبية ولكن تتوفر مقاطع في المسبوكة وصور شعاعيه تسمح باستنتاج نماذج التبريد وتحليل سبعة خصائص شكلية مختلفة للمسبوكة موضوع البحث. وفي الفقرة الحالية تم اختيار اثنين من تلك الخصائص الأفضل توثيقاً (أشكال المسبوكات C, F في الشكل (5-7)). وتملك مسبوكة العجلة F المبينة في الشكل (5-7) جزء عنكبوتي (شبكي) موسّد من الوجهين بمعدن إضافي بسماكة 13mm (1/2 in.). جدول (5-2).

جدول(5-2): تفاصيل مسبوكات العجلات الاختيارية.

المسبوكة	قطر المرضع		ارتفاع المرضع		درجة الصب	حرارة	سمات خاصة
	mm	in.	mm	in.	C°	F°	
A	190	7.5	165	6.5	1675	3050	...
B	215	8.5	180	7.0	1675	3050	...
C	190	7.5	230	9.0	1610	2930	...
D	150	6.0	230	9.0	1610	2930	جلبة مرضع ثخينة 25mm(1in.)
E	190	7.5	230	9.0	1610	2930	سماكة 75mm(3in.)من رمل الكروميت الوجهي حول الإطار والشفة
F	190	7.5	230	9.0	1605	2920	شبكة توسيد معدني بسماكة 50mm(2in.)

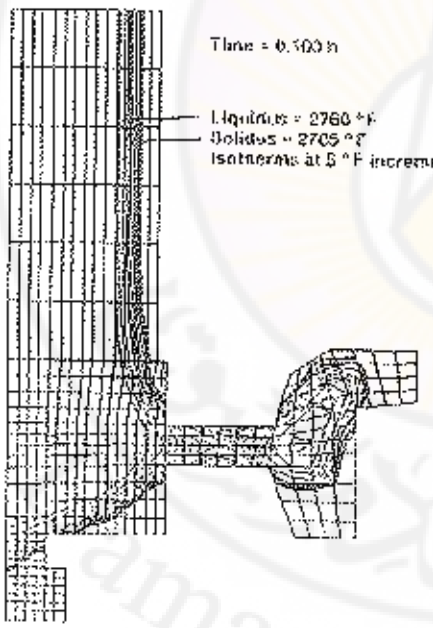


الشكل (5-7): مقطع عرضي في مسبوكة عجلة قطار أبعادها معطاة بالإنش. تم صبها من الصلب الكربوني الصرف. ويفصل الجدول (5-2) مجموعة من الخصائص الشكلية للمرضع المستخدم في المصنب. (الشكلين (5-8) و (5-9)).

لقد رسمت نتائج تحليل العناصر المنتهية كخطوط تماثل درجة الحرارة في الشكل(5-8)، وهي خط السيولة (1515 °C = 2760 ° F) وخط التجمد (1485 °C =2075 ° F). تحوي الشفة حوضاً من المعدن السائل المقتطع من المرضع بوساطة الشبكة المتصلبة. ونستطيع توقع رؤية عيوب في المسبوكة المقطوعة بالقرب من هذه النقطة، وفي الواقع توجد عيوب في هذه المنطقة متوقعة بوساطة المحاكاة الرقمية.

أجريت المحاكاة نفسها لمسبوكة من الشكل F التي لديها توسيد معدني إضافي من كلا جانبي الشبكة العنكبوتية بمقدار 13mm(1/2in.) ويبين الشكل (5-9) المستويات الحرارية لهذه المسبوكة ويشير إلى أن المسبوكة يجب أن تكون سليمة مناسبة للتجمد الموجه. كما تبين مقاطع المسبوكة F عدم وجود عيوب تقلص وهذا مطابق للمحاكاة.

إن محاكاة صفيحة مسكوبة عملية أكثر تعقيداً لأن محيطات التطويق تلعب دوراً فيها. ويتعلق التوافق في هذه الحالة بالشرط المفترض لتبادل الحرارة بالإشعاع بين قشرة الطوق/ الخلاف الغضاري والبيئة المحيطة (فرن مخلى من الهواء). وعلى وجه الخصوص تبدو عوامل الإشعاع أكثر أهمية.

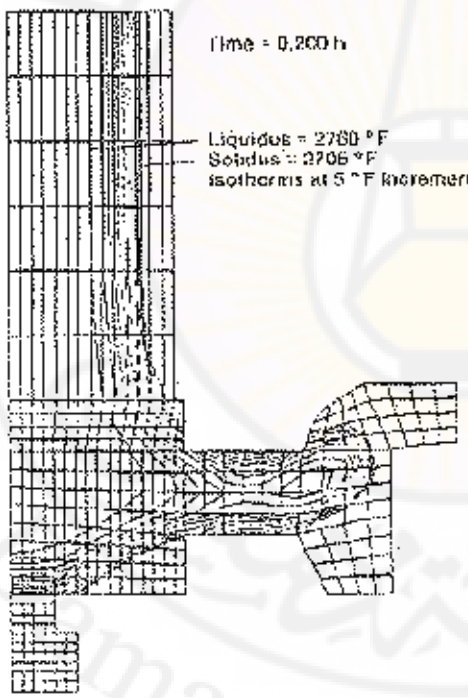


الشكل (5-8): نتائج محاكاة FEM لمسبوكة عجلة القطار باستخدام الصيغة الشكلية C المرضع. يفترض نموذج السويات الحرارية للسيولة وللتجمد أن التقلص سيحدث في الإطار.

لا تشكل طريقة العناصر المنتهية النظام الوحيد المستخدم لإجراء المحاكاة لتجمد المسبوكات الشكلي. وقد نجحت العديد من النماذج السابقة في العمل باستخدام طريقة التفاضل المنتهي، بينما تصف المنشورات الأحدث طريقة عناصر الإطارات، والتطورات الجديدة في طريقة التفاضل المنتهي. وفي الوقت الحاضر لا تزال تقنيات FEM تعمل بمرونة كبيرة جداً.

وعلى الرغم من ذلك، على القارئ أن يتمعن في المنشورات التي تصف مناهج حوسبة جديدة وبديلة. ويجب أن يركز على النقاط التالية:

- قابلية معالجة تعقيدات الشكل الخارجي
- قابلية معالجة مجمل الأجزاء المغلقة في القالب مثل النوى
- الروابط المؤمنة برامج المعالجة السابقة واللاحقة، وعلى وجه الخصوص توفر نمذجات هندسية تستند لأنظمة CAD



الشكل (5-9): نتائج محاكاة FEM لمسبوكة عجلة القطار باستخدام الصيغة F للمرضع (الشكل (5-7)) وقد تمت زيادة سماكة الشبكة بين المحور والإطار ويظهر أن المسبوكة يجب أن تكون سليمة.

5-3-4: قاعدة البيانات:

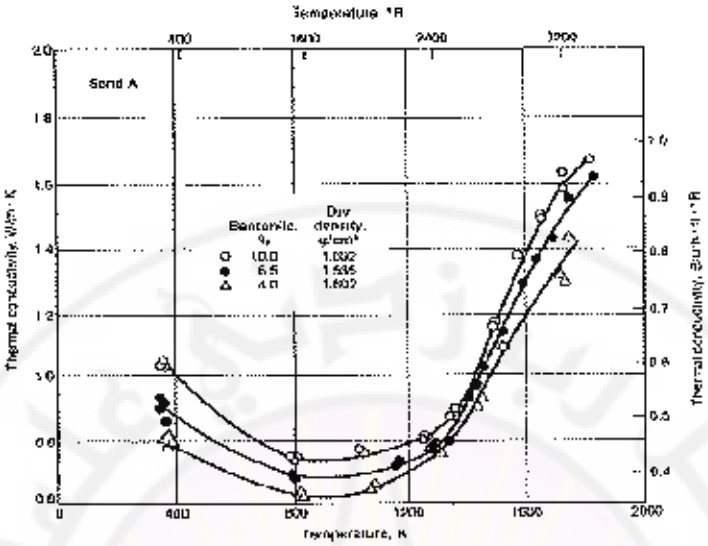
يجب أن تعالج جميع النماذج الرياضية لعملية التجمد:

- تمثيل دقيق للشكل الهندسي.
- المعالجة الكافية لتحول الحرارة الكامنة.
- التحسس للخصائص الفيزياحرارية للمواد المشتركة في هذه العملية.

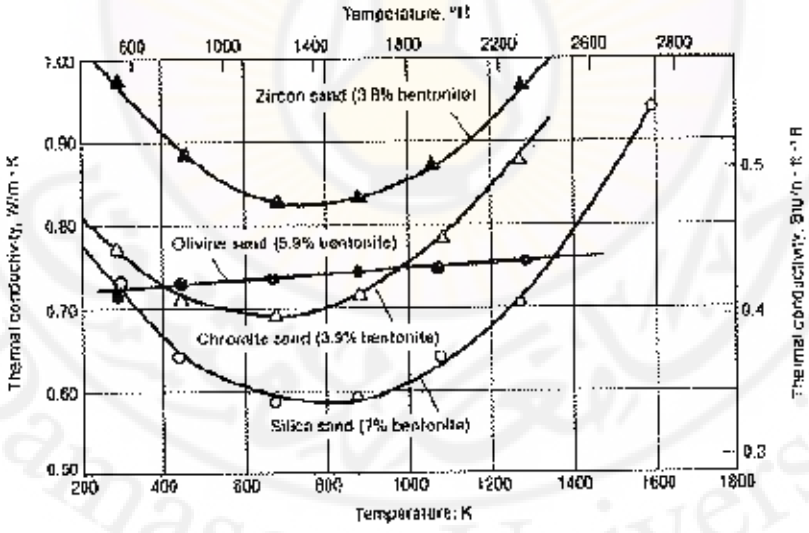
إن قاعدة بيانات الخصائص الفيزياحرارية لنمذجة التجمد ضخمة لكنها تشغل أحياناً مناطق متناثرة. على اعتبار أن مادة النمذجة الأكثر شيوعاً في المباكة المشكّلة (البنتونيت المتماسك مع رمل السيليكا) وبشكل خاص العلاقة بين الناقلية الحرارية k ودرجة الحرارة التي يمكن أن تزيد جزء المسألة المرتبط بتطوير أو توسيع قاعدة البيانات. وكما هو مبين في الشكل (5-10) فإن k هو تابع معقد لدرجة الحرارة، أضف إلى ذلك وجوب أخذ محتوى الرطوبة بالحسبان (حتى عند اعتبار الرمل جاف)، وكثافة الزك، متوسط نعومة الحبيبات، ومصدر الرمل. إن العمق المحتمل لقاعدة البيانات يبدو غير محدود تقريباً عند تمييز عدد الانتشار لمواد القالب التي تحتوي حالياً الزيركون و الأوليفين ورمال الكروماييت. وتنشأ العديد من هذه البيانات التي تتضمن منحنيات العلاقات التوافقية التي تربط درجة الحرارة مع الناقلية الحرارية والحرارة المحددة والخصائص الأخرى للنمذجة ووسائط المباكة. وإذا لم تتوافر هذه البيانات بسهولة يتم تقديرها. ويصح ذلك من أجل الخصائص الفيزياحرارية المعادن والخلائط التي تقع فوق نقاط انصهارها.

وقد تمت الإشارة سابقاً إلى أن معظم مشاكل النمذجة في هذا المجال عند استخدام التحليل العددي هي عدد العناصر (أو العقد) المتوضعة داخل القالب نفسه بفوق تلك الواقعة داخل المسبوكة. وقد بذلت في السنوات الأخيرة جهود محددة من قبل بعض العاملين لاستبدال القالب في هذه المحاكاة إما بخارطة معطيات تدفق حراري أو بسلسلة مجدولة من قيم معاملات انتقال الحرارة وهكذا يتم تغيير الشروط الحدية.

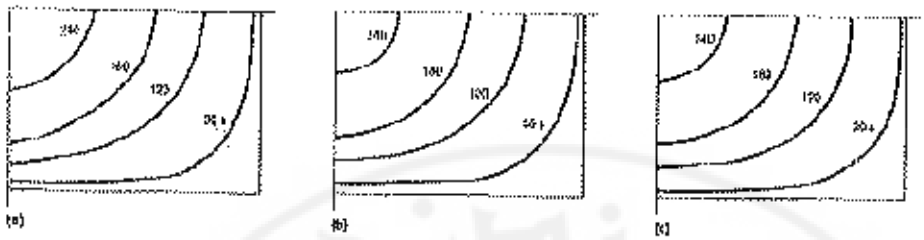
وقد اقترح هذا المنهج بشكل مستقل من قبل Niyama و Berry ، ومع الأخذ بالحسبان النجاح العملي لـ Dantzig وشركائه في العمل. ويقارن الشكلان (5-12) و (5-13) بين الطريقة التقليدية (تشبيك مقيد للقالب) والحسابات البديلة (تدفق حراري للإطار أو منحنيات إطارات محكومة).



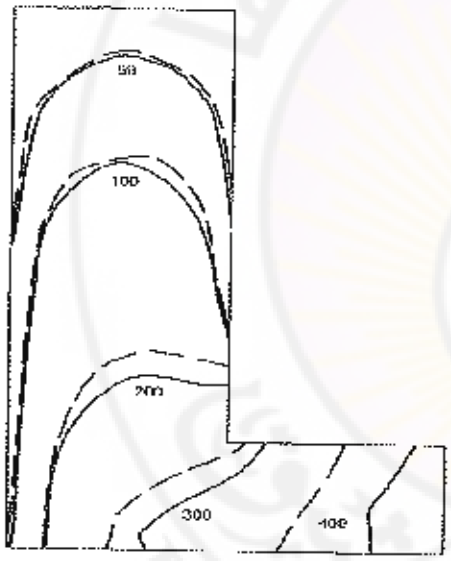
الشكل (5-10): تغير الناقلية الحرارية الظاهرة مع درجة الحرارة لعينة مضغوطة من رمل السيليكا الحاوي على مواد رابطة.



الشكل (5-11): الناقليات الحرارية لأربع عينات من رمال القولبة المتماسكة مع الصلصال.



الشكل (5-12): انتقال محوسب لجبهة التجمد للألمنيوم الصافي في قالب رملي. يظهر أحد ارباع مقطع قضيب مستطيل (a) نتائج نمذجة FDM باستخدام المنهج التقليدي حيث تم تشبيك القالب وتعلق خصائص القالب بدرجة الحرارة. (b) مثل (a) باستثناء افتراض أن خصائص القالب ثابتة. (c) القالب غير مشبك والتدفق الحراري q محدد في وجه القالب / المعدن.

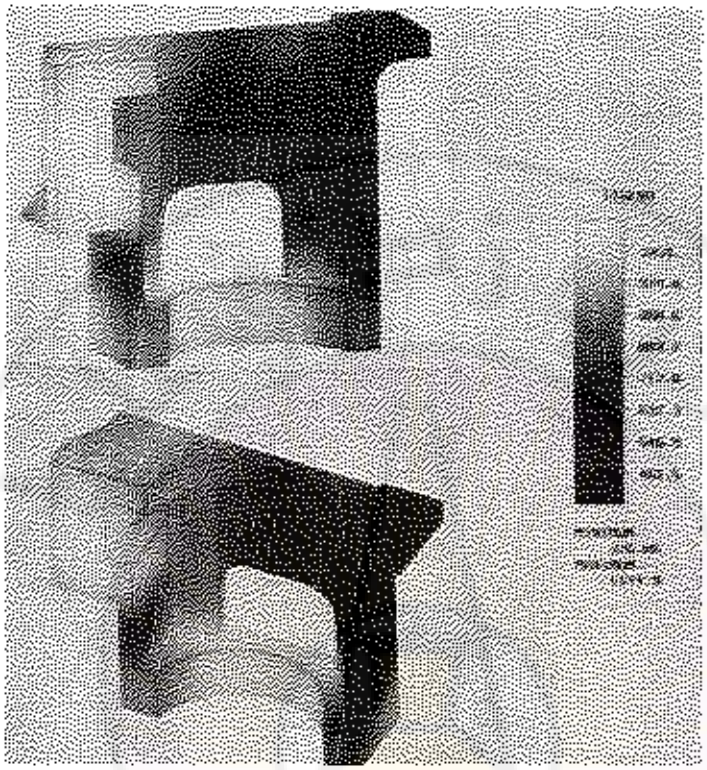


الشكل (5-13): الأوضاع الجيدة لخطوط التجمد في ربع مقطع في سبيكة ذات مقطع بشكل حرف H (الفولاذ منخفض الكربون في الرمل). الزمن مقدر بالثواني، H نصف الارتفاع هو 50mm(2in.) ونصف العرض هو 30mm (1.2in.) وتمت مقارنة النتائج الحاصلة باستخدام طريقة FEM القياسية مع تلك التي تم الحصول عليها طريقة منحنيات الإطارات.

5-3-5: ترجمة خرج المحاكاة الحاسوبية:

يكمن ضعف معظم تطبيقات الحاسوب الأولى في هندسة التصميم، في عدم قدرة البرنامج على تلخيص معاني العديد من الخطوط المنبثقة كمخرجات منبثقة من البيانات. وقد أدى ذلك إلى ظهور برامج معالجة لاحقة قادرة على الإظهار، مثلاً: مخططات ثنائية أو ثلاثية الأبعاد للإجهاد

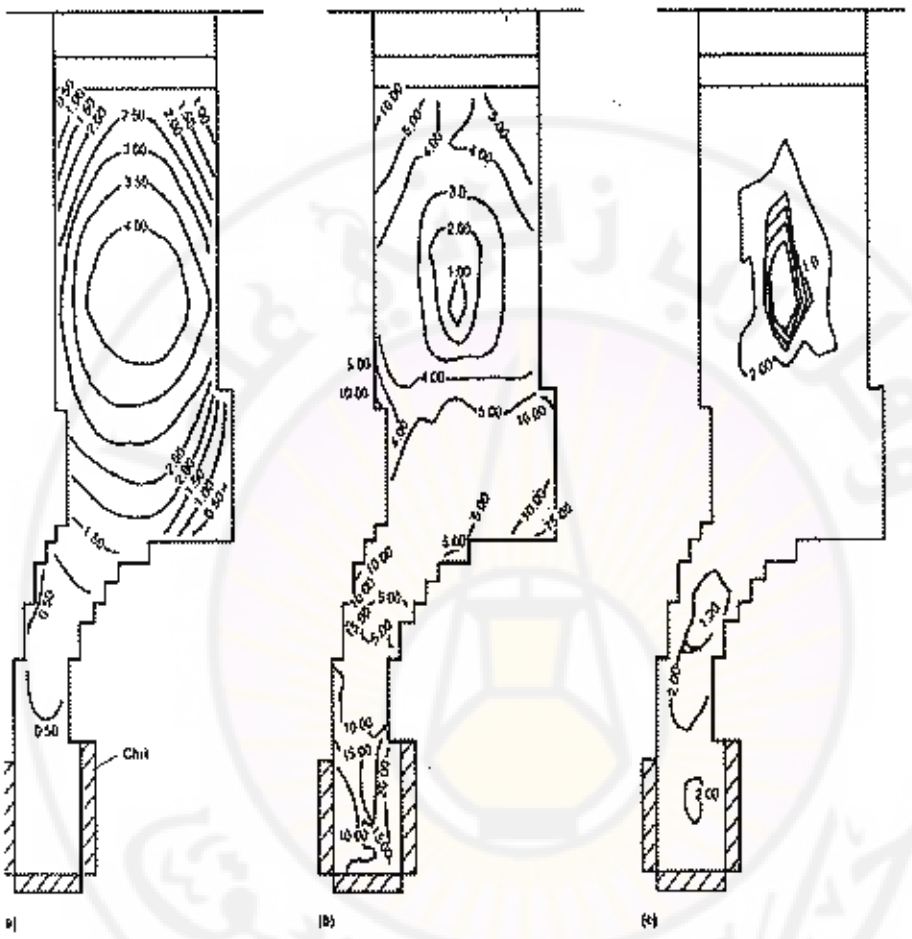
أو السويات الحرارية المتعلقة بطبيعة التحليل العددي. ويتوفر تجارياً برامج تظهر هذه المعلومات مركبة على الخطوط المحيطية للشكل الهندسي (الشكل (5-14)).



الشكل (5-14): منظرين مأخوذين من محاكاة تجمد كتلة من محرك John Deere 253s بعد الصب. وهو من مادة حديد الصب الرمادي اليوتكتيكي ذي نقطة التجمد 1140 °C. ويمثل السطح الخلفي مستوي تناظر.

تسمح بعض البرامج بتوليد مخططات تظهر تغير توابع المعايير المؤثرة في سلامة المسبوكات من العيوب. ويتم اختيار هذه التوابع عادة على أساس الاعتبارات النظرية ويمكن أن تتضمن مثلاً الدمج بين تدرج الحرارة الموضعي G، وسرعة جبهة التجمد v، أو معدل التبريد R أو T. ويوضح الشكل 15 تأثير دمج هذه البارامترات في التحكم بمميزات التغذية للفولاذ. وعلى الرغم

من عدم توفر توابع المعايير المماثلة لمعادن الصب الأخرى حالياً، إلا أن التركيز على انتشار البحث والتطوير.



الشكل (5-15): نتائج محاكاة FDM أجزاء من مسبوكة فولاذية. يظهر: زمن التجمد الموضعي (مقدر بالساعة)، تدرج الحرارة الموضعي (C°/Cm) وتابع المعيار $g/\sqrt{R}$ حيث R معدل التبريد أثناء التجمد. وتفترض سوية حرارة التجمد أن التقلص سيحدث في النصف الأعلى من المسبوكة بينما تابع المعيار لا يوحي بوجود تقلص أي المسبوكة سليمة.

5-3-6: نظرة استشرافية نحو المستقبل:

كما أشرنا، يتضمن الشكل الناجح لاستخدام الحاسوب في صناعة السباكة المعدنية استخدام حواسيب شخصية من المستوى الأول مدعومة ببرامج تخطيطية. مثلاً: تقدير الوزن، ترتيب التجمد، الحسابات البسيطة للإرضاع وفتحات التوزيع، بدلاً من محاكاة التجمد بالمقياس الكامل. وتشكل بعض هذه البرامج الآن مجموعات واسعة تسمح أيضاً بتخطيط ترتيب لوح النماذج وتداخل الأجزاء.

تأخذ في الظهور حالياً حقبة ثانية متطورة تتضمن تطبيق الجيل الأول من أنظمة CAD المدعومة بالحواسيب المتوسطة، ومعظم هذه البرامج المستخدمة غير مخصصة لصناعة السباكة أو تغطيس القوالب أو بيئة صناعة النماذج. لذلك تجتاز تجهيزات سباكة المعادن تغيرات جدية للاستفادة من هذه الأنظمة. وتتضمن هذه التغيرات إعادة تأهيل نمط جديد من الأشخاص التقنيين المثقفين حاسوبياً داخل فريق السباكة. وبالتوجه نحو البرنامج بحد ذاته تعنى غالبية التركيبات بتحسين تصميم الأدوات ونادراً ما تتضمن محاكاة تجمد فقط. ولكن بعض التركيبات تملك نتائج مدعومة من برامج حواسيب شخصية تعود للاتصال الأعلى مع تصميم نظام الصب. ومع العديد من المؤسسات تملك أنظمة CAD ناجحة مطبقة ولديها نتائج جوهرية محفوظة في النماذج وأدوات القوالب، هنالك بعض المؤسسات تؤجل ذلك ريثما تسأل مايلي:

- هل ستنخفض تكاليف الصيانة واقتناء الحاسوب؟
- هل ستنخفض تكاليف اقتناء البرامج؟
- هل ستزداد مقدرات البرامج؟
- هل سيزداد تآلف المستخدمين مع البرامج؟
- هل سينخفض زمن بناء النموذج؟

ومع ذلك هذه ليست أسئلة مبتذلة وقد نتجت بسبب كشف هذه التقني الجديدة إلى حد بعيد. وفي الوقت ذاته يجب ملاحظة أن لدى بعض أنظمة CAD المستخدمة أمثلة عن الجيل الأول لهذه الأنظمة، وهي بمعظمها ثنائية الأبعاد أو ثنائية ونصف بعدية وأحياناً لديها محدوديات متعلقة بحساب الحجم. ويتطلب العديد من هذه الأنظمة مؤخراً مقدرة في النمذجة الحجمية في حين أن هناك أنظمة أخرى دخلت (أو على وشك الدخول) إلى الأسواق تستند بشكل كامل إلى طريقة النمذجة الحجمية التي نوقشت سابقاً في هذه الفقرة.

وتمثل المرحلة الثالثة التي أخذت بالبدء الآن والوثيقة الصلة بهذه الفقرة استخدام وتطوير نظام الهندسة بمساعدة الحاسوب المدعوم بحاسوب صغير أو متوسط والذي يتمتع بمرونة عالية وتكلفة منخفضة. ويعتمد في معظم الأحيان على طريقة المنمذج الحجمي إضافة إلى قدرته التامة على الربط الشبكي مع أنظمة معالجة أخرى منفصلة أو موازية. ومن الممكن مع هذه الأنظمة الشروع في التشبيك لتحليل الإجهاد المستند إلى FEM (التحقق من الأداء) أو مع حزم محاكاة التجمد (التحقق من قابلية الصب).

يسمح أحد هذه الأنظمة المتوفر والقابل للتشغيل على الحاسوب الشخصي للمستخدم ببناء النموذج الحجمي الخاضع للتطوير وإجراء المقاطع والرؤية من زوايا مختلفة والحصول على رسوم مطبوعة عند الرغبة. والأهم من ذلك إمكانية تشبيك سمات الأجزاء ثنائية الأبعاد أو نصف البعدية بالوصول إلى ملف جديد يعمل على معلومات أدخلت مسبقاً إلى النظام تصف الشكل الهندسي للإطارات الخارجية. وتعالج جميع معلومات التشبيك وعدد العقد أيضاً في ذاكرة حاسوب مضيف. ويمكن لهذا النظام أن يملك واجهة لحواسيب أكبر حجماً (مثلاً حاسوب مركزي متوسط) يمكن أن تدعم برنامج FEM حيث يتم تحليل الإجهاد أو محاكاة التجمد. وعند إنهاء المهمة المختارة يمكن المعالجة اللاحقة للمعلومات على حاسوب كبير لرؤيتها.

ولكن الحواسيب الصغيرة (غير المركزية) لديها عموماً صعوبات مع تعقيد الجزء وأزمنة التنفيذ الطويلة. ويتبع تعقيد الجزء لقدرة الحواسيب المعاصرة فقط، وليس أزمنة التنفيذ الطويلة ذات الأهمية الأكبر في المباكة حيث لا تملك جميع الأجزاء المعدة للسكب طبيعة حرجة جداً. وبناء على ذلك إن تشغيل حاسوب صغير طوال الليل لإنجاز تحليل الإجهاد أو انتقال الحرارة ليس بالأمر المضر. وعلى نحو مماثل فإن تمثيل المسبوكة ونظام الصب باستخدام حاسوب شخصي يعتمد على النمذجة الحجمية لا يطرح أية مشاكل؛ ويمكن للمنمذج الحجمي أن يتبادل الملفات مع نظام موازٍ قادر على توليد ترميز التحكم الرقمي اللازم لقيادة آلات صناعة النماذج وصناعة النوى. ومع ذلك تتوافر أنظمة متكاملة تدعم الحواسيب المركزية مع العديد أو كل تلك المقدرات، ويتوقع التوسع الملحوظ في هذا المجال لاستعمال الأنظمة الكبيرة في البرمجيات الموجهة للمستخدم.

وبالنظر إلى انطلاقة القرن، يجب أن تتحقق التطورات المفاجئة الحاصلة حالياً في هذا المجال وعلى الأخص التطورات المتوقعة في قدرة الحوسبة. مثل تقدم تقنية الرقائق نحو مرحلتها التالية

(10^9 جهاز في الرقاقة)، كما ستصبح إمكانية معالجة الحاسوب الشخصي لمئة مليون تعليمة في الثانية (mips) واقعاً. ولأن هذه المواصفات تمثل حدود مقدرات الحواسيب الصغيرة مستقبلي الحواسيب المركزية لتحديد بارامترات معظم المكونات المعقدة. وبالمزاوجة مع التطورات في تصميم بنية الحواسيب التي تتضمن المعالجة المتوازية وأبعد من ذلك يمكن أن يصبح مألوفاً تعدد العمليات المتزامنة. وتصمم البرامج لاستثمار هذه التطورات الناشئة مسبقاً. حيث يمكن أن تصمم المسبوكات على الحاسوب ويمكن أن تكرر أيضاً. كما يمكن المراقبة والتحكم بصب المعدن المنصهر السائل والتجمد والتبريد للمسبوكات المنجزة. ويمكن أن تنتج المسبوكات مباشرة بأشكال ومقاطع دقيقة. كذلك يمكن الحصول على منتج مسكوب ذي سطح مصقول، كما سيكون ممكناً توقع الخصائص النهائية مع ترك القليل للقطع والتسوية.

5-4: نمذجة جريان المائع:

5-4-1: مقدمة:

إن نمذجة جريان المائع هي التقنية التي تستخدم الحاسوب للبحث في ظواهر الجريان، وبالأخص تلك الظواهر التي تحدث أثناء مرحلة الملء الأولية ويكون لها غالبية التأثيرات في نوعية المسبوكات. ويملك المصممون قواعد بشكل عام بحسب خبرتهم قواعد ومعلومات دليلية لتحقيق أهدافهم في الجريان السلس وزمن الملء الصحيح والحد الأدنى من الغازات المحتبسة وتخفيض الشوائب والخبث والتوزيع المرغوب للمعدن أثناء ملء القالب. إن هدف تحسين جودة وفعالية صب المسبوكات بوساطة التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD) والتحكم الحديث بالمعالجة يتطلب أن تكون البيانات مضغوطة بشكل علمي ومن ذلك أن تكون سهلة القيادة للحوسبة.

إن معرفة جريان المائع أثناء ملء المسبوكات ضروري ليس لذاته فحسب بل لأن له تأثيرات في انتقال الحرارة أثناء وبعد الملء. ويجب أن يؤخذ ذلك بالحسبان في نماذج انتقال الحرارة وتحليل الإجهاد في المسبوكات إذا كانت تعطي نتائج دقيقة.

من الصعب تكوين ملاحظات مباشرة على جريان المائع داخل القوالب، وذلك لأن القوالب والمعدن المنصهر معتمة ودرجات الحرارة مرتفعة والظروف مؤقتة جداً. وحتى لو تمت تلك

الملاحظات باستخدام التقنيات الموصوفة في هذه الفقرة لاحقاً، يمكن الحصول على معلومة وحيدة هي عادة موقع المعدن كتابع للزمن. وليست نمذجة جريان المائع باستخدام الحاسوب الطريقة الوحيدة الاقتصادية والعملية للحصول على المعلومات حول ما يجري داخل القالب أثناء الملء بل هي أحياناً فقط الطريقة المجدية. علاوة على ذلك فهي تعطي معلومات حول توزع كل من السرعة والضغط في المعدن المنصهر والتي لا يمكن الحصول عليها بالملاحظة المباشرة.

ويمكن أن تقسم تقنيات الحوسبة لنمذجة الجريان أثناء ملء القالب إلى فئتين:

- تقنيات توازن الطاقة التي تعتمد على معادلة Bernoulli ومعادلات Saint-Venant.
- تقنيات توازن كميات الحركة التي تعتمد على معادلات Navier-Stokes المشمولة بمجموعة Marker-and-Cell للبرامج التي تتضمن تقنيات : Marker-and-Cell (MAC) (المسجل والخلية) و Simplified Marker-and-Cell (SMAC) (المسجل والخلية المبسطة) و Solution Algorithm (SOLA) (خوارزمية الحل).

وتعد تقنيات توازن الطاقة الأكثر فائدة لنمذجة الجريان عبر قنوات الصب الرئيسية والفرعية والفتحات عندما يقاد اتجاه الجريان بوساطة تضاريس النظام (خصائصه الشكلية). أما تقنيات توازن كميات الحركة فهي مطلوبة لحساب الجريان داخل فجوات القالب عندما يتوجب حساب موقع المائع واتجاه الجريان.

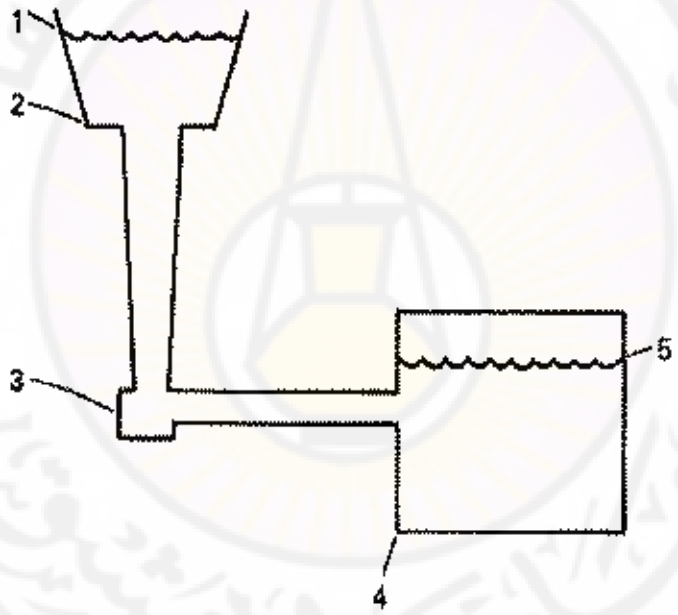
5-4-2: طرائق توازن الطاقة:

إن هذه الطرائق مفيدة أولاً في تحديد معدلات الجريان في الحالات التي يثبت فيها اتجاه الجريان بوساطة الخصائص الشكلية للنظام. تستخدم معادلة برنولي لحساب الجريان في القنوات الممتلئة تماماً مثل قناة الصب الرئيسية أو القنوات الفرعية المضغوطة والفتحات، بينما تستخدم معادلات ساندت فينانت للقنوات المملوءة جزئياً مثل الأحواض والقنوات الفرعية غير المضغوطة. وتعد المعلومات الناتجة عن هذه الحسابات في غاية الأهمية لتصميم وتصنيع المسبوكات، وقد استخدمتها الصناعة بشكل روتيني لعدة سنوات. أما الآن يمكن أن تطبق برامج CAD هذه التقنيات من أجل الأنظمة المعقدة بسرعة ودقة.

يبين الشكل (5-16): نظام ملء قالب ثقالي وتعطى معادلة برنولي المطبقة على هذا النظام كما يلي:

$$\frac{P_j - P_i}{\rho} + \frac{V_j^2}{2b_j} - \frac{V_i^2}{2b_i} + g(Z_j - Z_i) + E_{f_{i,j}} = 0 \qquad (1)$$

حيث P_i , P_j الضغوط في الموقعين j , i و V_i , V_j السرعات الوسطية في الموقعين j , i و Z_i , Z_j ارتفاع الموقعين j ،i و b_i , b_j تمثلان معاملات توزع السرعة وتعطى القيمة (0.5 للجريان الصفائحي و 1 للجريان المضطرب جداً). g تسارع الجاذبية الأرضية النظامي، و ρ هي كثافة المائع و $E_{f_{i,j}}$ الطاقة المفقودة بسبب الاحتكاك بين الموقعين j ،i.



الشكل (5-16): نظام صب ثقالي محلل بوساطة طريقة معادلة برنولي ، تناسب المستويات المرقمة للشروحات المستخدمة في المعادلة (1).

يتبع فاقد الطاقة الاحتكاكية $E_{f(i,j)}$ للسرعة وعدد رينولدز والخصائص الشكلية بين الموقعين i, j ويعرف عدد رينولدز بالشكل التالي:

$$N_{Re} = \frac{VD_e}{\nu} \qquad (2)$$

حيث ν اللزوجة التحريكية و D_e القطر المكافئ.

إن خصائص الشكل تتغير من نقطة إلى أخرى مسببة تغيرات في السرعة وعدد رينولدز، لذلك يجب حساب $E_{f(i,j)}$ لكل جزء من النظام ثم يجمع من أجل النظام بأكمله.

وفي بعض الاستخدامات يمكن إهمال فاقد القدرة الاحتكاكي. فمثلاً حساب استدقاق قناة الصب (التضيق التدريجي في المقطع) يتم دائماً بإهماله. الشكل (5-17). والهدف هو حساب تغير المقطع العرضي لقناة الصب العمودية التي ستكافئ وصول المعدن المنصهر متلما تم سكبه في خلال قناة الصب تحت تأثير الثقالة. وتعطى هذه النتائج بالمعادلات التالية من أجل نسبة مساحات المقاطع العرضية في الأعلى A_2 والأسفل A_3 من قناة الصب أو من أجل أقطار قناة صب دائرية في النقاط نفسها:

$$\frac{A_3}{A_2} = \sqrt{\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 - Z_3}} \quad \text{or} \quad \frac{D_3}{D_2} = \sqrt[4]{\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 - Z_3}} \qquad (3)$$

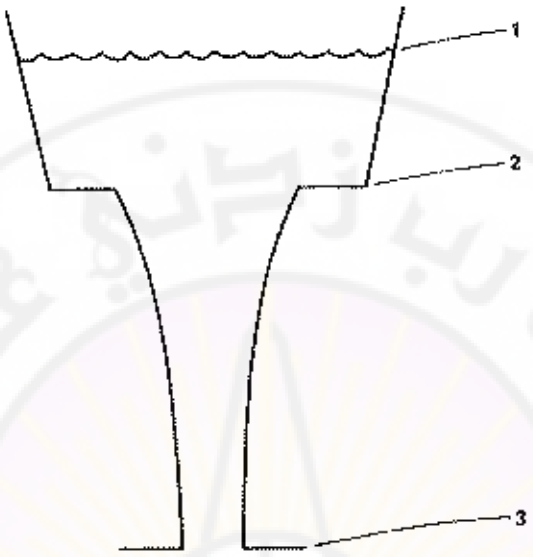
إذا أخذ الاحتكاك بالحسبان ستعدل هذه المعادلة بحيث تصبح بالشكل:

$$A_3/A_2 = \{(z_1 - z_2)/[z_1 - z_3 - (z_1 - z_2)e f_{2,3} + (z_2 - z_3)e f_{1,2}]\}^{1/2} \qquad (4)$$

حيث: $e f_{i,j}$ معاملات فواقد الطاقة الاحتكاكية المعطاة بالشكل:

$$E f_{i,j} = \frac{1}{2} e f_{i,j} \; f_2^2$$

إن إدخال فاقد طاقة الاحتكاك $c f_{2,3}$ في قناة الصب يخفض الاستدقاق المطلوب بينما يزيده فاقد طاقة الاحتكاك فوق قناة الصب $c f_{1,2}$.



الشكل (5-17): يبين الاستدقاق بقناة الصب ضروري من أجل تعويض تسارع المعدن المنصهر في التغذي بالثقالة باستخدام المعادلتين 3 و4. وتوافق المستويات المرقمة بالشروحات الخاصة بكلا المعادلتين.

من الشائع عملياً في سباكة المعادن غير الحديدية، استخدام أنظمة الصب بدون ضغط حيث تكون القنوات الفرعية مملوءة جزئياً بالمعدن السائل وهذا ما يمكن نمذجته باستخدام معادلات سانت فينانت التي تفيد عند وجود اختلاف في الزوايا بين ميل السطح السائب للسائل وسطح أسفل القناة، الشكل (5-18). وتستخدم أيضاً تلك المعادلات عندما يكون معدل التدفق والسطح الأعلى للسائل متغيراً مع الزمن وتكتب معادلة الاستمرار بالشكل:

$$W_r \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial (VA)}{\partial X} = 0 \qquad (5)$$

حيث W عرض القناة في عمق الجريان Y و t الزمن و VA جداء السرعة في مساحة المقطع العرضي للمائع (أي معدل التدفق الحجمي).

معادلة الحركة للحالة الساكنة تكتب بالشكل:

$$\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial X}+\frac{\partial Y}{\partial X}-S_o+S_f=0 \qquad (6)$$

حيث يعطى الميل الفعلي لقاع القناة بالشكل:

$$S_o=\frac{Z_1-Z_2}{\Delta X} \qquad (7)$$

عندئذ يعرف ميل الاحتكاك بالشكل:

$$S_f=\frac{n^2V^2}{R_h^{\frac{4}{3}}} \qquad (8)$$

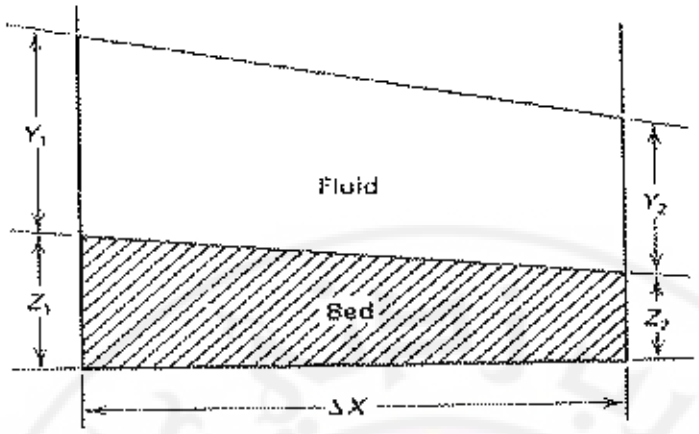
حيث R_h نصف القطر الهيدروليكي و n معامل خشونة مانينغ (Manning) وتحدد قيمته تجريبياً باستخدام مفاهيم تشابهية.

في حالة التبعية للزمن يمكن كتابة معادلة الحركة بالشكل:

$$d\left(Z+Y+\frac{V^2}{2g}\right)=-S_f dX-\frac{1}{g}\cdot\frac{\partial V}{\partial t}dX \qquad (9)$$

حيث يمثل حدها الأخير التسارع.

لاحظ أن معامل الخشونة n يأخذ بالحسبان تضاريس القناة وكذلك يمكن أن تتغير خشونة السطح بشكل متكرر على طول مجرى القناة ويكون أكبر في مجرى الدخول الضيق في المناطق الحاوية مسبقاً عل طبقات من المعدن المنصهر.



الشكل (5-18): قاع قناة مملوءة جزئياً او قناة مفتوحة (مميزة بالمساحة المهشرة أو السرير) وفيها الميل $\Delta x/(Z1 - Z2)$ وعمق المائع Yi.

بالنسبة لأنظمة CAD وأنظمة تحليل ملء القالب، يمكن دمج تمثيلات برنولي وسائت فينانت لكل المقاطع الإقرادية للنظام في شبكة من السلاسل والمستويات المتوازية. ويجب أن يتم الحصول على معاملات فواقد الطاقة الاحتكاكية وميول الاحتكاك من التأثيرات المتبادلة المستنتجة تجريبياً من عدد رينولدز والأعداد البعدية الأخرى. ويطلب استخدامها بشكل شائع في الحلول التكرارية لأنها توابع للسرعة وارتفاع السطح السائب التي تتعلق بالمتحولات المطلوب تحديد أحدها. وتعرض المؤلفات في معظم الأحيان التأثيرات المتبادلة التجريبية الضرورية في الرسوم البيانية. ويمكن اختزال العلاقات الممثلة بالرسوم البيانية إلى مجموعة معادلات بارامترية لاستخدامها في الحاسوب. مثال: يمكن اختزال المعلومات المبينة في الشكل (5-19) كما يلي:

$$
\begin{aligned}
e_b = \{&[(-0.194 \times 10^{-6}\beta - 0.246 \times 10^{-3})\beta + 0.0368]\beta \\
&- 0.184 + 0.03125/[(\beta - 6.1)^4 + 1.25] \\
&+ (4.529\beta^2 - 91.75\beta + 464.9)/(\beta^4 - 20\,\beta^3 \\
&+ 126.7\beta^2 - 500\beta + 2542)\}(1 - \sigma^2) \\
&+ 1.5/[(51\sigma - 17.87)^2 + (\beta - 29)^2 + 33.3] \\
&- 2/[(17.32\sigma - 5.196)^2 + (\beta - 60)^2 + 100]
\end{aligned}
\qquad (10)
$$

حيث e_0 معامل الفقد الرأسي، β الزاوية المبينة بالشكل (5-19)، σ هو A_2/A_1 ويمكن إيجاد الحل بسرعة كبيرة على أي حاسوب على الرغم من مظهره المعقد.

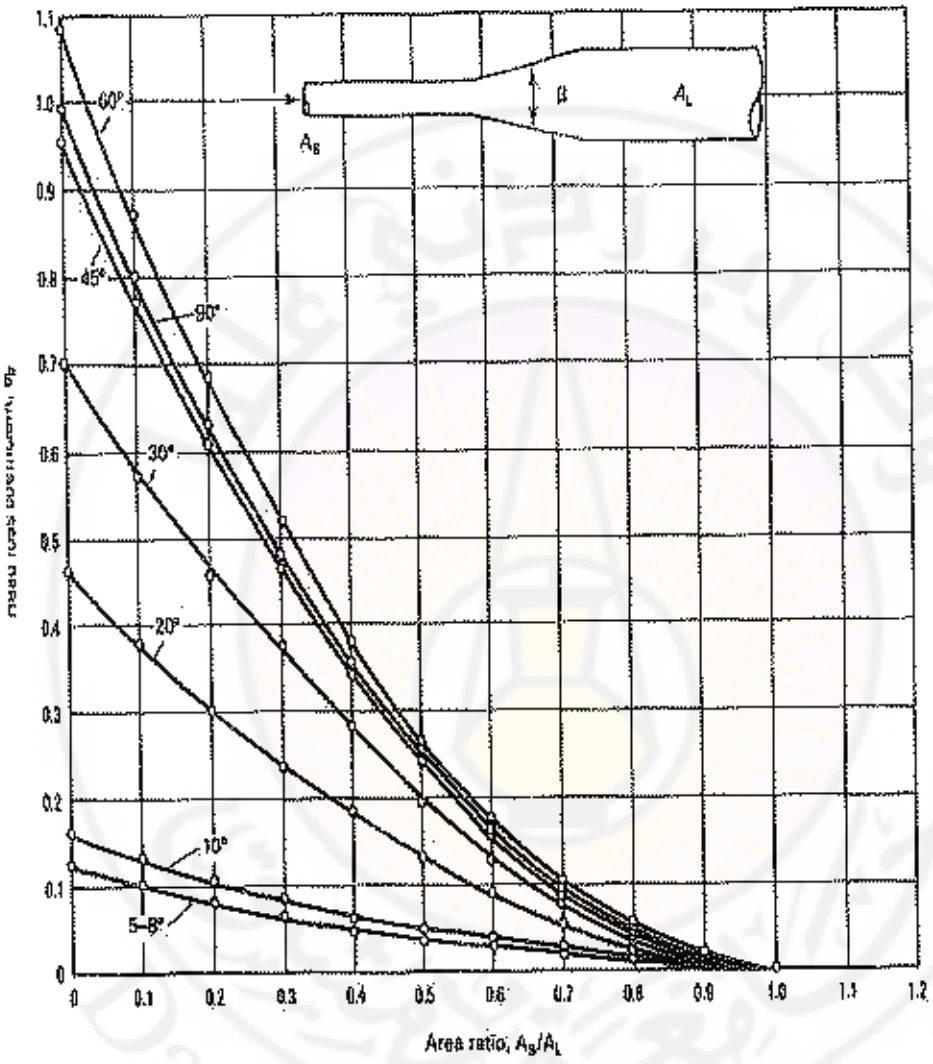
يمكن استخدام معادلات برنولي وسانت فينانت في برنامج تصميم يتضمن قواعد الممارسة الجيدة ويستخدم في صناعة السباكة. على سبيل المثال، نشأت من الخبرة قواعد تحدد المجال المقبول لأزمنة ملء القالب للمسبوكات من نمط معين كتابع لوزن المسبوكة. وتفترض هذه القواعد أيضاً حجماً محدداً لقناة الصب والقنوات الفرعية وآخر لفتحات التوزيع التي يمكن استخدامها لتكوين تصميم أولي. وعندئذ يمكن التحقق من الدقة عند تنفيذ حساب التوازن الموصوف أعلاه (المعادلة 10). كما يمكن تعديل التصميم وإعادة حساب التوازن حتى تتوافق النتيجة المحسوبة مع معدل الملء المرغوب. وتسمح هذه التقنية بشروط اعتبارية خاصة مثل محدودية كمية المعدن المنصهرة المتوافرة في المرة الواحدة، وكذلك محدودية الرياك والنماذج المتوفرة لصنع القالب.

إن هذا النمط من نمذجة جريان المعدن المنصهر أثناء ملء القالب يتكامل في أنظمة CAD التي تنتج رسوماً نهائية من أجل وريشات النماذج والقوالب، ويمكن أن تنتج في بعض الحالات أشرطة تحكم رقمي لتشغيل النموذج بالقطع. ويبين الشكل (5-20) مثالاً لمخطط لحوض الصب وقناة الصب الرئيسية والقنوات الفرعية وفتحات التوزيع لمسبوكة معينة.

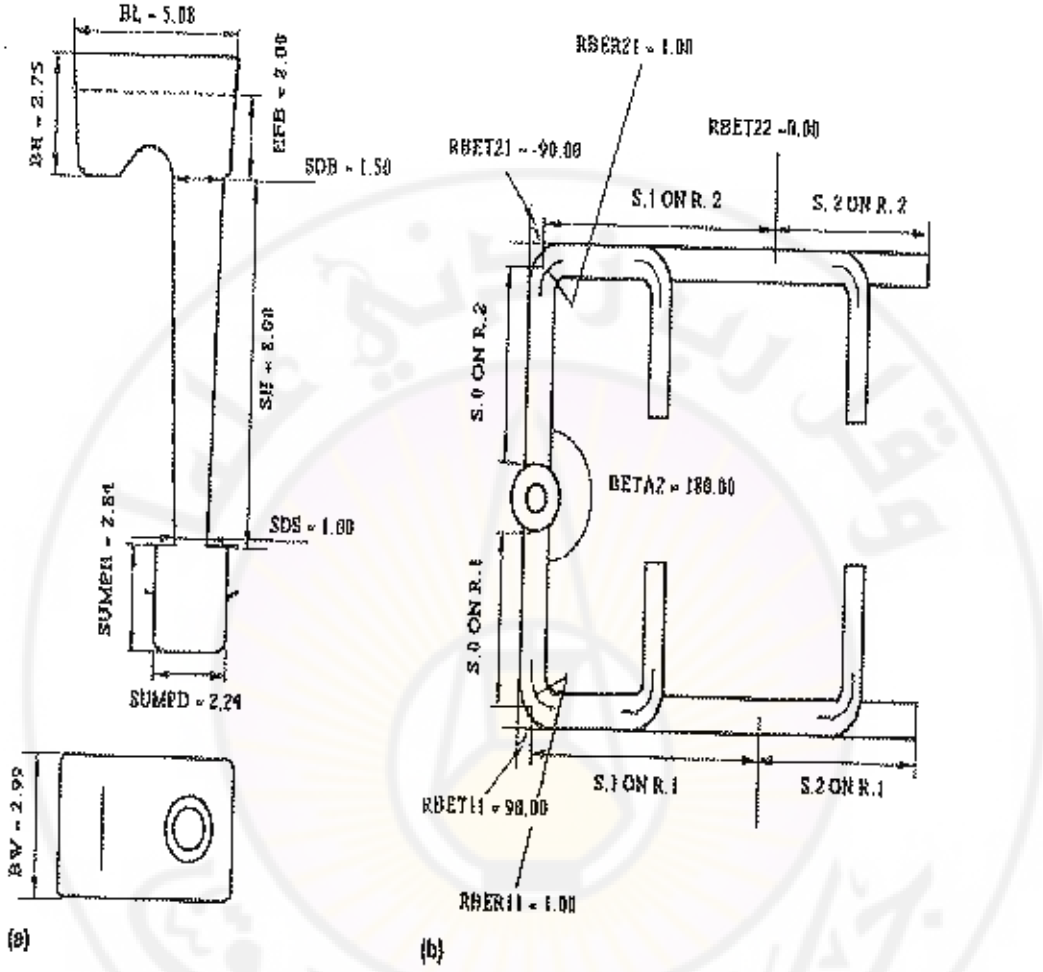
5-4-3: النمذجة الفيزيائية لملء القالب:

من الضروري التحقق من النماذج الحاسوبية لملء القالب بوساطة تجارب فيزيائية. والنمذجة الفيزيائية لجريان المعدن تتم باستخدام الماء ضمن قوالب شفافة. والماء مائع نموذجي مناسب لأن لزوجته التحريكية قريبة من لزوجة المعادن الشائعة في درجة حرارة الصب الطبيعية وخاصة إذا تم التحكم الصحيح بدرجة حرارة الماء. فمثلاً اللزوجة التحريكية للماء في الدرجة 35 °C هي ذاتها للفولاذ ذي نسبة الكربون 5% في الدرجة 870 °C. ويتأثر نموذج جريان السوائل باللزوجة وعزم العطالة وقوى الثقالة التي تتطلب عدد رينولدز وعدد فراود (Froud) متماثلين ويعرف عدد فروود $N_{Fr} = V^2 / gL$ حيث L البعد المميز في النظام. ويتم الحصول عليه عند استخدام الماء في درجة حرارة مناسبة للحصول على لزوجة تحريكية ضمن نماذج بحجم النظام

الحقيقي نفسه. وتوضح بعض دراسات صور الحركة عالية السرعة الملء التثاقلي وأنظمة الصب بالقوالب، تطبيق نماذج الماء لملء القالب.



الشكل (5-19): معامل الفاقد الرأسي للتوسع المتدرج المرسوم كتابع لنسبة المساحة σ والزاوية β. وتشير الدوائر إلى قيم eb المحددة التي تم الحصول عليها بالمعادلة (1).



الشكل (5-20): مخططات نموذجية لنظام ملء القالب تم الحصول عليها من برنامج CAD استناداً إلى ممارسة صناعة السباكة السليمة والتحسينات الحاصلة بوساطة معادلات برنولي وسانت فينانت. (a) مخطط حوض الصب وقناة الصب وقاعدة قناة الصب، (b) مخطط فتحات التوزيع والقنوات الفرعية. والأبعاد معطاة بالإنش.

من الممكن ملاحظة جريان المعادن الفعلية داخل القوالب من دراسات التصوير السينمائي بالأشعة السينية. وتمت ملاحظة تفصيل أكثر عن جريان المعدن في القوالب الرملية بوساطة التصوير بالفيلم باستخدام آلة تصوير عالية السرعة مركزة من خلال نافذة زجاجية مسطحة على جانب القالب. وقد صور دخول حديد الصب المنصهر في قالب رمل السيليكا باستخدام هذه التقنية. وسيتم عرض أثر مواضع المعدن المنصهر المأخوذة من تلك الأفلام في فصل "التأثيرات المتبادلة مع جريان المعدن الحقيقي"

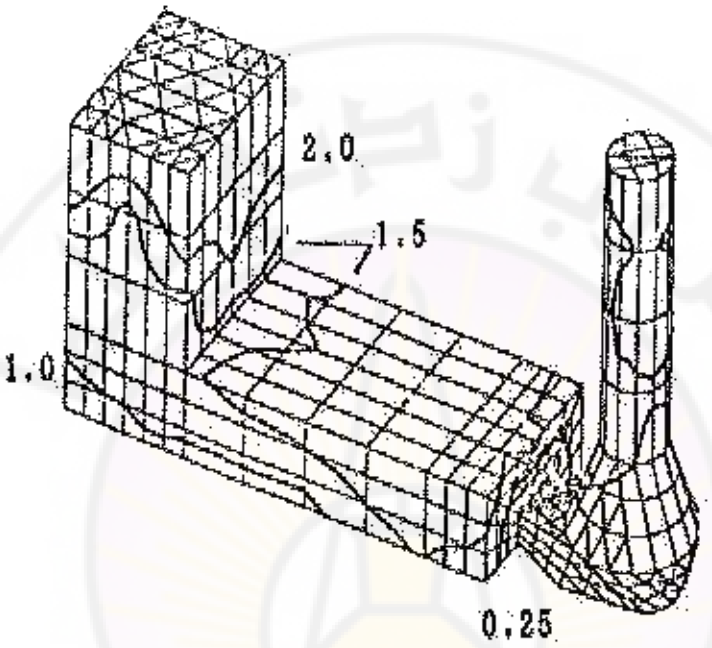
استخدمت مؤخراً أنظمة جمع بيانات محوسبة لملاحظة جريان المعدن المنصهر في قوالب ثلاثية الأبعاد غير شفافة. وقد استخدم لذلك نوعان من الحساسات: أسلاك تماس بسيطة ومزدوجات حرارية. وتتصل أسلاك التماس البسيطة مع المداخل الرقمية لوحدة جمع البيانات. ويمكن قراءة المداخل الرقمية بسرعة كبيرة بوساطة الحاسوب فمن الممكن قراءة مئات نقاط التماس هذه عدة مرات أثناء ملء قالب مفرد. ويمكن إنشاء صورة دقيقة لموضع المعدن من هذه البيانات في أي وقت. ويبين الشكل (5-21) النظام الذكي لاستخدام معالج لاحق للعناصر المنتهية من أجل تمثيل نتائج هذه التجارب.

يمكن استخدام المزدوجات الحرارية وحدها أو ضمن وصلة مع حساسات أسلاك التماس. وفي كلا الحالتين تعطي معلومات أكثر من أسلاك التماس البسيطة. وتعطي المزدوجات الحرارية إشارات تماثلية تستغرق زمناً أطول للقراءة. وتفيد المزاوجة بين أسلاك التماس والمزدوجات الحرارية بشكل خاص في ملاحظة الجريان ونماذج التجمد في المسبوكات ثخينة الجدران التي لديها مشاكل في التجمد المبكر (التحامات باردة).

5-4-4: تقنيات توازن كميات الحركة:

إن جريان المائع ضمن فجوة القالب أثناء الملء مؤقت؛ حيث تتغير كمية وموقع السائل بسرعة. ويجب أن يكون حساب موقع السائل وجهة سطحه السائب متكاملاً مع تقنيات الحوسبة المستخدمة في نمذجته. وتدعى عائلة التقنيات الحاسوبية المتبعة في معالجة هذا النوع من المسائل (MAC, SMAC, SOLA-VOF). وعلى الرغم من اختلاف إحداها عن الأخرى في طريقة تتبع مسار موضع السطح السائب، وفي الطريقة التي يتم فيها جمع التكرارات الداخلية، إلا

أذيا تقوم على نفس المبادئ. ولتبسيط المناقشة يستخدم الاختصار MAC لتمثل عائلة تقنيات الحوسبة الديناميكية للموائع بأكملها.

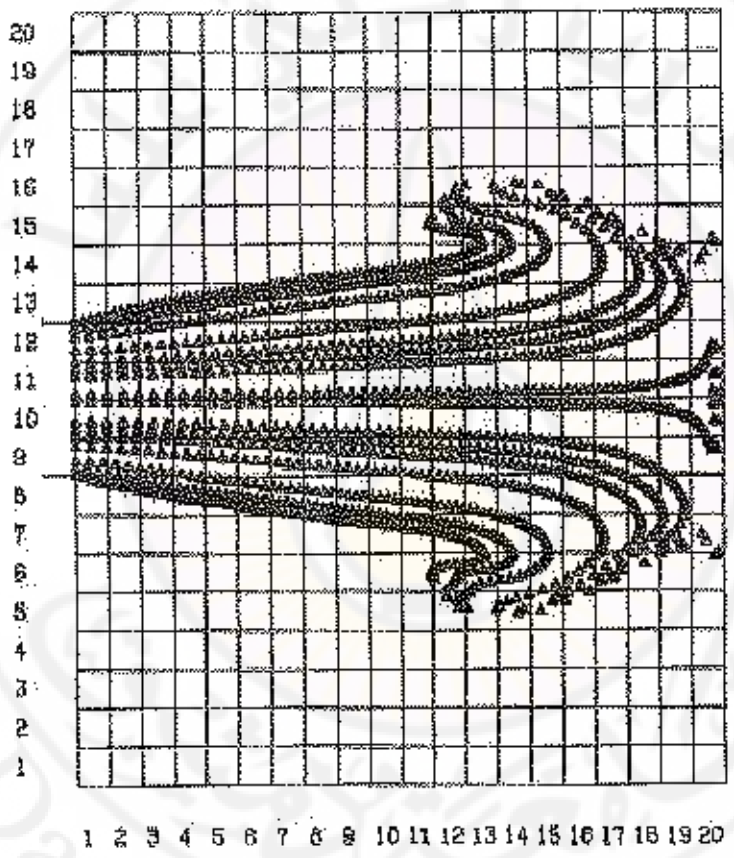


الشكل (5-21): رؤية ثلاثية الأبعاد لمواقع المعدن المنصهر المحددة بوساطة أسلاك التماس والمظهرة بوساطة معالج لاحق للعناصر المنتهية. وتمثل الأرقام في الشكل عدد مرات الملء في الثانية.

5-4-4-1: أهمية تقنية MAC:

تستخدم MAC مخطط التفاضل المنتهي من أجل التحليل الرياضي لمسائل جريان الموائع. ومثل معظم هذه التقنيات، تقسم MAC أولاً النظام (أي تضاريس فجوة المسبوكة الخاضعة للدراسة) إلى عدد من التقسيمات الفرعية تدعى الخلايا وتكون عادة مستطيلة. ثم تدخل مجموعة من العلامات الافتراضية (في كل من MAC، SMAC) أو قيم تابع المائع تدعى F (في

(SOLA-VOF) إلى النظام لتمثيل موقع المائع في أي لحظة. ويبين الشكل (5–22) تقسيم النظام إلى خلايا، وتمثيل مجال المائع بالعلامات، بينما يبين الشكل (5–23) قسماً من مجال المائع باستخدام تابع المائع F (انظر الفصل "تحديد مجال المائع" في الأسفل). يمكن أن يحسب حقل اللزوجة لتحرك مجال المائع بتطبيق المبادئ الديناميكية للموائع. ومن ثم تنقل العلامات أو يحدث تابع المائع بالتوافق مع حقل اللزوجة المحسوب لكي تمثل الموضع الجديد لمجال المائع. ويمكن تكرار هذا الإجراء من البداية عندما تكون الفجوة فارغة حتى تمام امتلائها.



الشكل (5-22): نموذج جريان تم الحصول عليه بعد بدء المصب بـ 3.95 ثانية ويبين تقسيمات خلايا MAC ومواقع مجال المائع (المشار إليها بوساطة علامات مثلثيه).

5-4-4-2: تحديد مجال المائع:

في MAC تصمم الخلايا ممتلئة أو سطحية أو فارغة استناداً إلى موضع العلامات أو توزع تابع المائع. ففي طريقة العلامات الخلية الممتلئة هي الخلية التي تحتوي على الأقل علامة واحدة إذا كانت جميع الخلايا المجاورة تحتوي علامات أيضاً. أما الخلية السطحية فتحتوي على الأقل علامة واحدة ولكن لديها خلية واحدة مجاورة على الأقل بدون علامات. أما الخلية الفارغة فهي أي خلية بدون علامات.

في تقنية تابع المائع يمثل F جزء الحجم من خلية مملوءة بالمائع. ويمكن أن يأخذ قيماً من 0 حتى 1 حيث F=1 للخلية الممتلئة و F=0 للخلية الفارغة وبعض القيم الكسرية للخلايا السطحية. ويمكن أن يستخدم تابع المائع F أيضاً لحساب الموقع التقريبي واتجاه السطح السائب للمائع. وتشكل إجمالاً الخلايا الممتلئة المنطقة الداخلية أما الخلايا السطحية تشكل المناطق السطحية.

5-4-4-3: حساب حقل اللزوجة في تحرك المعدن المنصهر:

بعد تحديد مجال الجريان الموافق للمناطق السطحية والداخلية للمجال، يحسب حقل اللزوجة وحقل الضغط. وتختلف بعض الشيء الشروط الفيزيائية التي تحكم سلوك الجريان في المناطق الداخلية عما هي عليه في المناطق السطحية.

1- سلوك الجريان في المنطقة الداخلية:

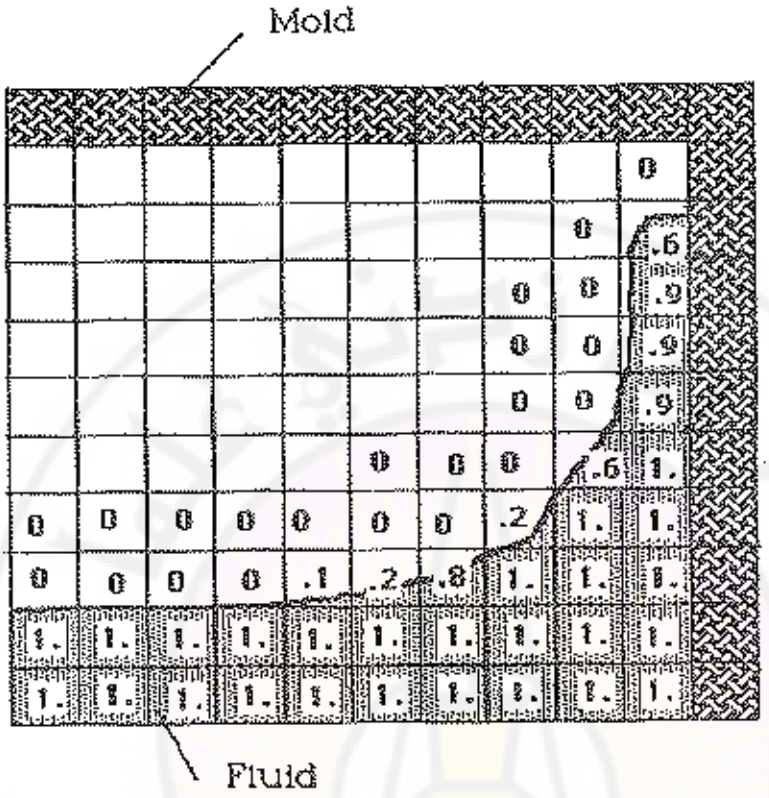
يجب أن تتبع المبادئ التالية في حجم الخلية في المناطق الداخلية: التدفق الكتلي الداخل = التدفق الكتلي الخارج. وهذا يناسب الطبيعة غير القابلة للانضغاط للمعدن المنصهر. وهذا يعطي الصيغة التالية لمعادلة الاستمرار ثنائية الأبعاد:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (11)$$

حيث u,v هي مركبات اللزوجة في الاتجاهين x,y.

تغير كمية الحركة = كمية الحركة الداخلة – كمية الحركة الخارجة. وبصيغة رياضية في الاتجاه x:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{\partial p}{\partial x}+v\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+g_x \qquad (12)$$



الشكل (5-23): رسم لمجال المائع تم الحصول عليه بوساطة تابع المائع F المستخدم في تقنية SOLA-VOF ، حيث: $F = 1.0,\ 0.0 < F < 1.0$ و $F = 0$ تشير إلى الخلايا الممتلئة أو الفارغة على الترتيب.

وفي الاتجاه y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + g_y \qquad (13)$$

حيث t الزمن و P الضغط/الكثافة و u اللزوجة /الكثافة و g تسارع الجاذبية الأرضية.

تدعى المعادلتان 12و13 بمعادلتي ناقير ستوكس. وفي حالة الجريان المضطرب تستبدل v باللزوجة الفعالة وتحسب حقول الضغط والسرعة باستخدام هذه المعادلات الحاكمة الثلاث وتقنية التفاضل المنتهي.

2- سلوك الجريان في المناطق السطحية. يبقى مبدأ توازن كميات الحركة مطبقاً في المناطق السطحية كماهو في المعادلتين 12 و 13 ولكن المعادلة 11 غير صحيحة لأن الكتلة داخل خلايا المنطقة السطحية متغيرة. وعلى العكس تحتوي المناطق السطحية على تقابل بين المعدن المصهور والجو المحيط به ويجب أن تتبع شروط السطح السائب. وهذا يعني أنه:

آ- يجب أن يزول الإجهاد المماس على السطح السائب. ويعبر عن ذلك رياضياً:

$$v\left[2n_x m_x \frac{\partial u}{\partial x} + (n_y m_y + n_y m_x)\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) + 2n_y m_y \frac{\partial v}{\partial y}\right] = 0 \qquad (14)$$

حيث $n_x.m_x$ و $n_y.m_y$ مركبات شعاع الواحدة الناظمية والمماسية على السطح السائب في الاتجاهين y, x كما هو مبين في الشكل (5-24).

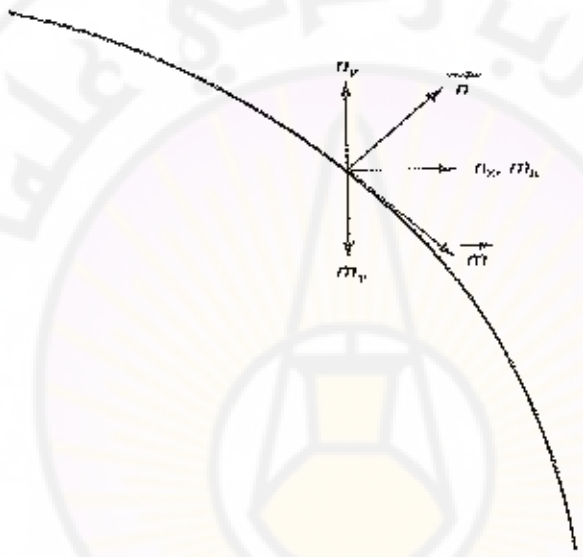
ب- يجب أن يعادل الإجهاد المماسي الضغط المطبق + التوتر السطحي. ويعبر عن ذلك بالشكل:

$$2v\left[n_x n_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_x n_y\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) + n_y n_y \frac{\partial v}{\partial y}\right] = p_a + p_s \qquad (15)$$

حيث p_a ضغط الغاز المطبق على المنطقة الفارغة و p_s ضغط التوتر السطحي. ويحسب الجريان في المنطقة السطحية باستخدام هذه المبادئ.

3- ظواهر جريان المائع عند ملء المسبوكات المعدنية:

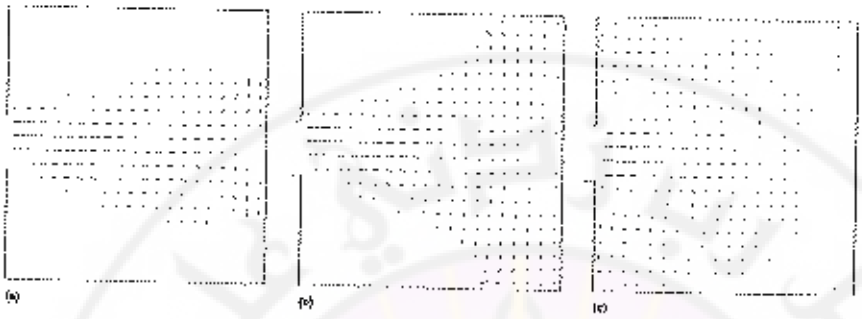
تساعد معالجة حسابات تدفق المائع في تكوين فهم لظواهر الجريان التي تحدث أثناء ملء القالب. ولتوضيح ذلك مثلت أدناه نتائج حسابات MAC على بعض تصاميم القوالب وجميعها ذات مقاطع عرضية رقيقة وعندئذ يقتصر جريان المعدن على بعدين فقط. (مع أن تقنية MAC يمكن أن تطبق على الأبعاد الثلاثة لكنها تستغرق وقتاً أطول على الحاسب لذلك تتم حوسبة جريان المعادن في معظم الأحيان على بعدين فقط).



الشكل (5-24): اتجاه السطح السائب الممثل بالمعادلتين 14 و15.

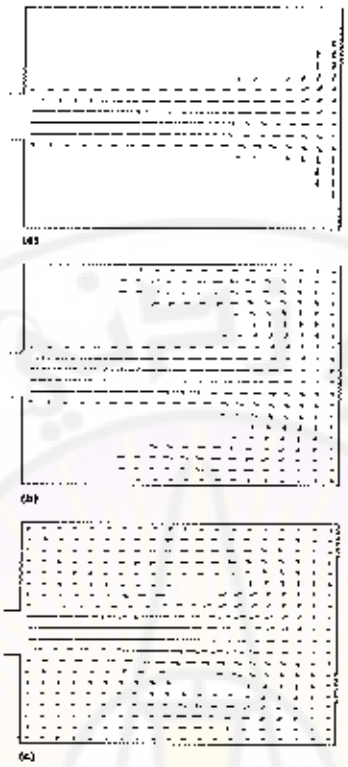
مثال1: ملء مسبوكة صفيحة مربعة أفقية كبيرة: إن الحالة الأولى صفيحة مربعة أفقية واسعة أبعادها 610 mm × 610 وبعرض فتحة 122 mm في مركز الجدار اليساري ويدخل المعدن عبرها بسرعة 305 mm/s ويملئ القالب خلال 10 ثوان. وقد قسمت المسبوكة إلى 400 خلية مربعة من أجل التحليل الرقمي (20 في كل اتجاه). وتبين نتائج الحوسبة. الشكل (5-25) أن المعدن يدخل القالب ويتوسع التيار ببطء قبل الوصول إلى الجدار البعيد.

وبعيد الوصول إلى الجدار ينقسم التيار إلى اثنين، ويبني الجانب البعيد من الفجوة ثم ينعكس عائداً عند فتحة التوزيع. إن آخر منطقتين تملآن هما الدوامتان المتشكلتان على جانبي فتحة التوزيع وتعصر أي غازات في القالب إلى هاتين المنطقتين عند اقتراب نهاية عملية الصب.



الشكل (5-25): مخطط شعاعي يبين صور الجريان وبروفيلات السرعة التي تم الحصول عليها عند صب مسبوكة الصفيحة المربعة الكبيرة 610x610mm. حيث سرعة الدخول 305mm/s والمخططات الشعاعية المعروضة هي عند انقضاء الأزمنة التالية: (a) 3.95s , (b) 5.45s, (c)9.95s

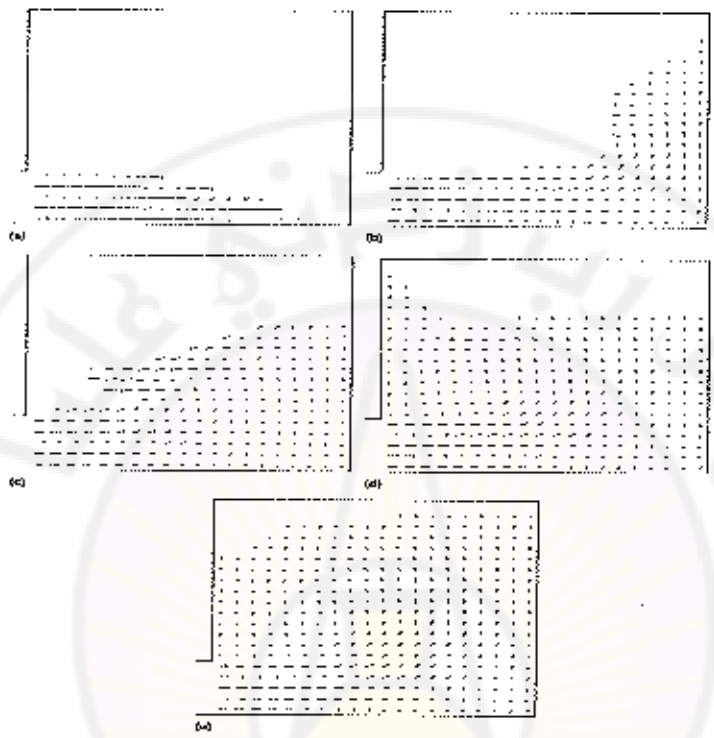
مثال 2: صب مسبوكة صفيحة مربعة أفقية صغيرة: تشبه المسبوكة الثانية الحالة الأولى ولكنها أصغر وهي توضح أثر الحجم (أو سرعة الدخول النسبية) في صورة الجريان. الشكل (5-26) أبعاد الفجوة هي 61×61 mm مع فتحة توزيع بعرض 12.2 mm وسرعة الدخول 305 m/s أيضاً. ويملأ القالب في 1 ثانية . يقسم النظام إلى 400 خلية مربعة. ولكن صورة الجريان مختلف تماماً، حيث يدخل المعدن إلى القالب مثل نافورة ويرتطم بالجدار المقابل قبل أن ينتشر. وعندما تصطدم النافورة بالجدار تتبع بسرعة الجدران الشاقولية الخارجية لتتوزع إلى تيارين يتجهان عند الاقتراب من الجدار كما في الحالة السابقة. ويسرع هذان التياران بالعودة إلى الجدران السفلية عندئذ وعلى طول جدار القمة حيث يصطدمان بالنافورة القادمة. وعلى العكس من المثال الأول فإن المنطقة الأخيرة التي تملأ بالمعدن هي أبعد ما تكون عن فتحة التوزيع كما تكون الدوامتان المتشكلتان على جانبي محور التناظر أكبر قليلاً. وتبين الحسابات أيضاً أن كمية الحركة الابتدائية متجهة نحو المنطقة الصغيرة في الجدار المقابل مسببة ضغطاً عالياً وإمكانية حبث القالب.



الشكل (5-26): مخطط شعاعي يبين صور الجريان وبروفيلات السرعة الحاصلة عند صب مسبوكة صفيحة مربعة أفقية أبعادها 61×61 mm. سرعة الدخول 305 mm/s والمخططات الشعاعية المبينة هي عند انقضاء الأزمنة التالية: (a) 2.99s (b) 0.599 (c) 0.879s.

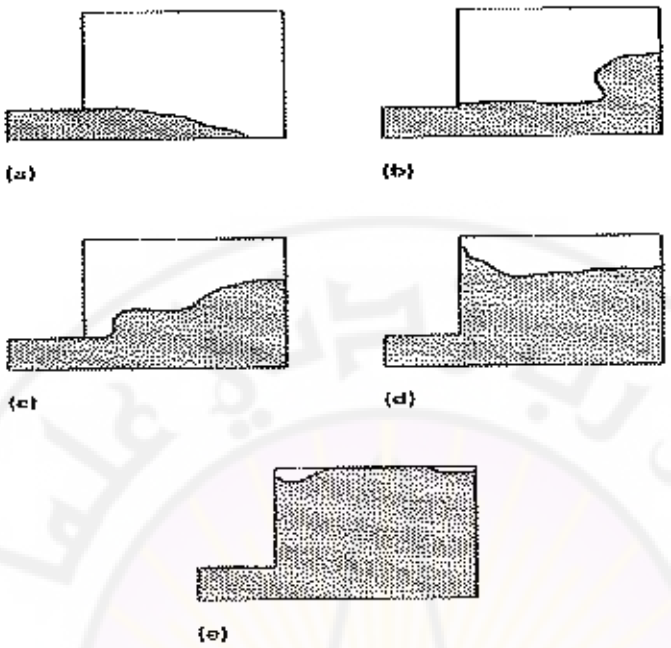
<u>مثال 3: صب مسبوكة صفيحة مربعة شاقولية لتوضيح أثر الجاذبية في صورة الجريان:</u>

يوضح التصميم الثالث قدرة النموذج على احتواء أثر الجاذبية، أو القوى الجسمية الأخرى. وهو صفيحة مربعة شاقولية أبعادها 152×152 mm وبعرض فتحة 38.1 mm متوضعة في الزاوية السفلى اليسرى. وتتغير السرعة من 975 mm/s حتى 518 mm/s بحسب مستوى المعدن وضغط الغازات في القالب.



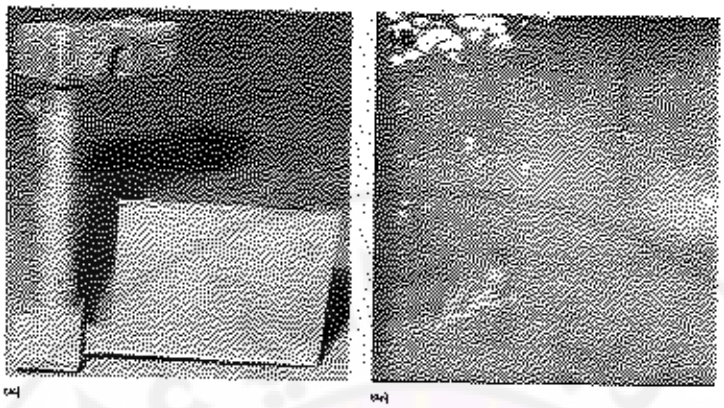
الشكل (5-27): مخطط شعاعي يبين صور الجريان وبروفيلات السرعة الحاصلة عند صب صفيحة مربعة شاقولية أبعادها 152×152 mm. وقد حددت سرعة الدخول للمعدن باستخدام حساب معادلة برنولي وتتغير من 975 mm/s حتى 518 mm/s. المخططات المبينة في الأزمنة المنقضية التالية: (a) 0.10s, (b) 0.32s, (c) 0.42s. (d) 0.62s, (e) 0.76s

وتحدد سرعة الدخول بالمزاوجة بين حساب معادلة برنولي للجريان عبر نظام الصب مع حساب MAC للجريان ضمن القالب. وقد قسمت هذه المسبوكة أيضاً إلى 400 خلية مربعة متساوية من أجل الحوسبة. وتبين نتائج المحاكاة.



الشكل (5-28): تتبع الصور الساكنة من صورة الحركة عالية السرعة لنموذج مائي لصفيحة مربعة شاقولية 152×152mm محسوبة في الشكل (5-27). (a).10s ,(b)0.30s, (c) 0.45s, (d)0.65s, (e)0.90s

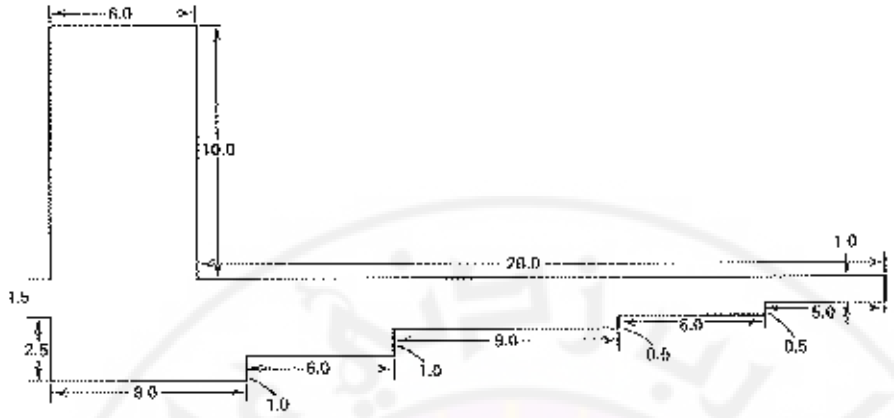
الشكل (5–27) المصهور يدخل على مثل المدّ ويسطح علوي مائل. وعندما يرتطم بالجدار المقابل يقفز إلى أعلى الجدار على مسافة 0.8 من القمة ثم يدور عائداً فوق التيار القادم مشكلاً دوامة قوية. ثم يقفز إلى أعلى الجدار فوق الفتحة وتتشكل موجة ترتد من جانب لآخر. وتكون الزاوية اليمنى العليا آخر منطقة تملأ بالمعدن. وقد تم التحقق من هذا الجريان بوساطة أفلام عالية السرعة لنماذج مائية، وبعض مقاطع الأفلام مبينة في الشكل (5-28). وقد صنعت مسبوكة حقيقية من خلائط الألمنيوم Al-7.5Si في قالب رملي من التصميم الذي يبين الكثافة المنخفضة في المنطقة التي حدث فيها التوضع الأخير للدوامة، وتشكل المسام في المنطقة الأخيرة للصب. ويبين الشكل (5–29) التصوير الشعاعي والضوئي لهذه المسبوكة.



الشكل (5-29): الصورة الضوئية (a) والصورة الشعاعية (b) لمسبوكة من خليطة الألمنيوم Al-7.5Si في قالب صفيحة مربعة مطابق للمعطيات الحاصلة في الشكل (5-27) والشكل (5-28). وتظهر الصورة الشعاعية تراكماً كبيراً للفقاعات الغازية في منطقة الملء الأخيرة من المسبكة.

مثال 4: صب مسبوكة صفيحة مدرجة شاقولية: يبين الشكل (5-30) تصميماً وأبعاداً لقالب أكثر تعقيداً. وهي مسبوكة صفيحة مع عتبات من الأسفل. تبدأ سرعة الدخول من 975 mm/s وتزداد تدريجياً بحسب مستوى المعدن المنصهر وضغط الغاز المتكون داخل القالب. ويبين الشكل (5-31) النتائج المحسوبة التي تشير أن المعدن يشكل دوامة تحت الفتحة (المتوضعة فوق القاع في حالتنا هذه) وأمواجاً منتصبة فوق كل عتبة. وقبل وصول الجريان إلى النهاية البعيدة للقالب، يبدأ المعدن بالارتفاع في المقطع الشاقولي (الذي يمثل المرضع) وتتشكل دوامة أخرى في هذه المنطقة. ويتم التحقق من نموذج هذا الجريان بوساطة أفلام العالية السرعة لنموذج مائي.

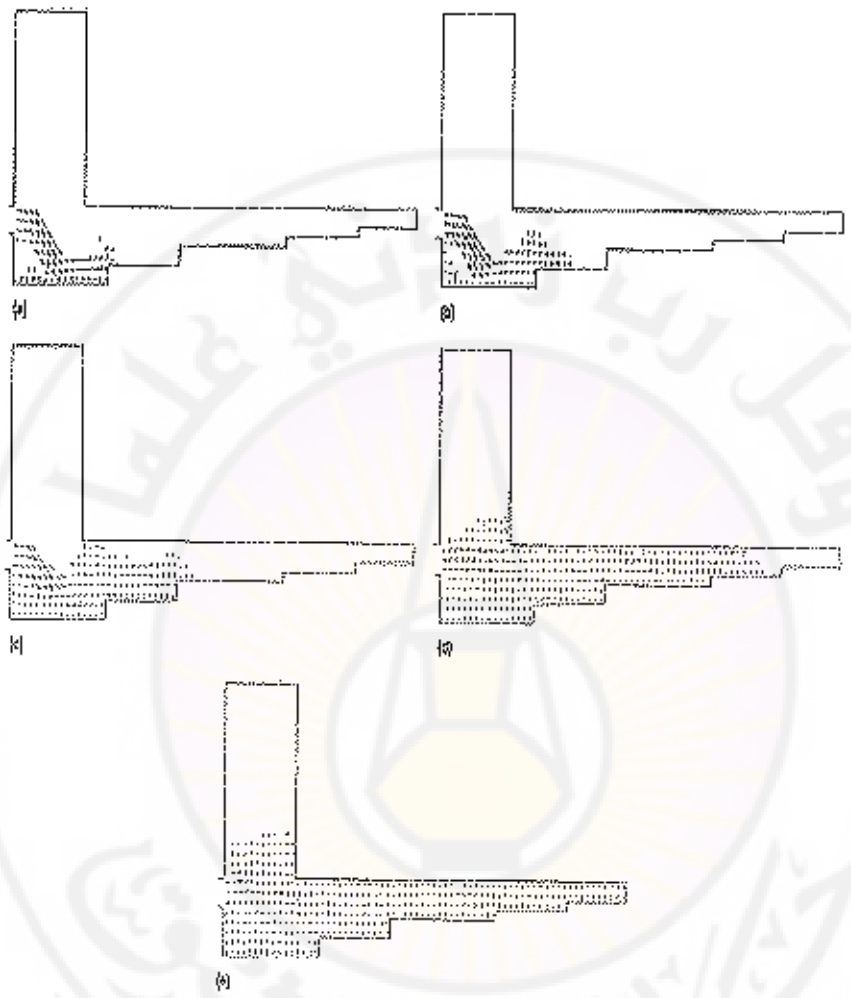
يمكن تطبيق تقنية MAC للتدفق عبر نظام الصب كما يطبقه على فجوة القالب. ويبين الشكل (5-32) الشروط غير المرغوبة في النظام التي تخفض قطرات المعدن بعيداً عن جدران قناة الصب غير المستدقة. وقد تم الحصول على بعض الدراسات التفصيلية للجريان في قناة الصب والقنوات الفرعية باستخدام إصدار SOLA-VOF لتلك التقنيات.



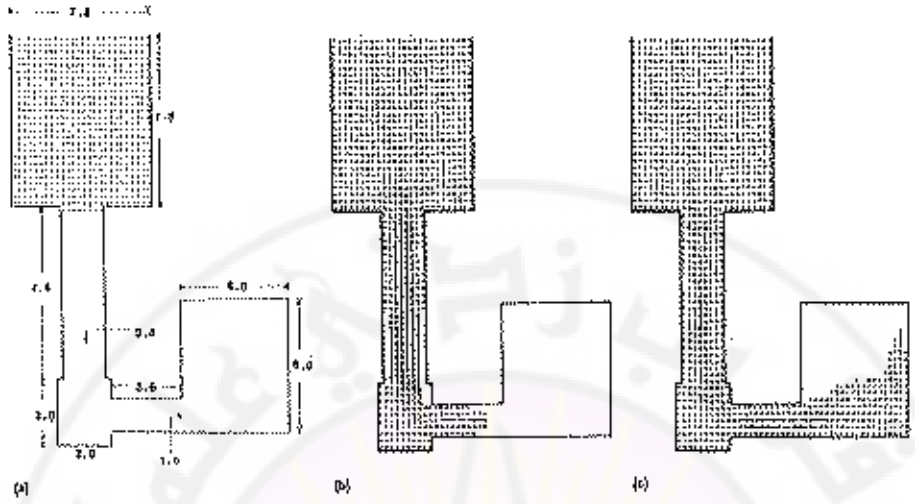
الشكل (5-30): المواصفات الشكلية والأبعاد لقالب صفيحة عتبية شاقولية. والأبعاد معطاة بالإنش.

5-4-4-4: التأثيرات المتبادلة مع جريان المعدن الفعلي

يبين الشكلان (5-33) و (5-34) التأثيرات المتبادلة بين الجريان المحسوب وملاحظات الجريان الفعلي، (جريان حديد الصب في قالب من رمل السيليكا والمسجل بوساطة كاميرا حركة عالية السرعة من خلال نافذة زجاجية على جانب القالب). والمسبوكة عبارة عن دولاب ثلاثي الأذرع. وفي إحدى التشكيلات يدخل المعدن من فتحة في الأعلى وتتوضع فتحة التوزيع على شكل نافذة بين ذراعين. وفي تشكيل آخر تتوضع الفتحة في الأسفل مقابل الذراع مباشرة. ويبين الشكل النتائج المحسوبة باستخدام تقنية SOLA-VOF المعدلة. إن التوافق جيد جداً بين صور الجريان المبنية على الملاحظة وبين تلك المحسوبة، وخاصة في الطريقة التي يخطئ فيها المعدن الأذرع القطرية في المسبوكات ذات فتحة الصب العلوية ويصب حول الإطار حتى يتم الامتلاء حول الذراعين الثاني والثالث. من الواضح العيان في هذه التجارب أن المسبوكة ذات فتحة الصب السفلية تملأ بسلاسة وتجانس أكثر ونتائج أفضل من حيث جودة المسبوكة.

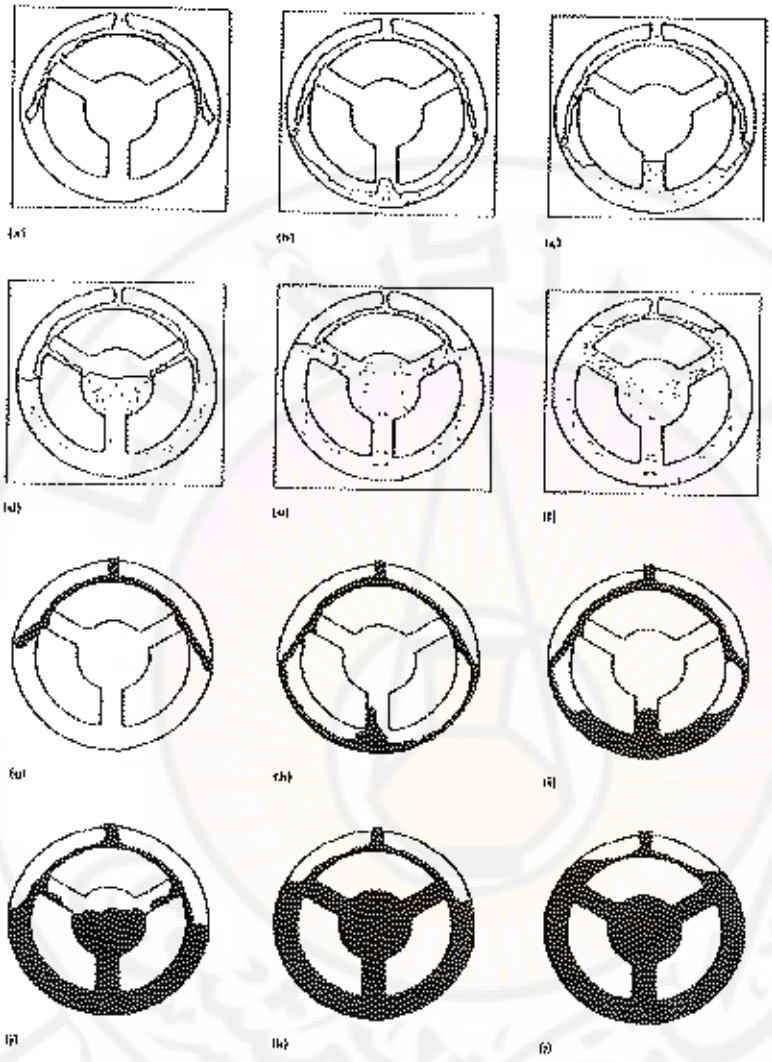


الشكل (5-31): مخطط شعاعي يبين صور الجريان وبروفيلات السرعة لمسبوكة صفيحة عتبية شاقولية ناتجة باستخدام القالب الموضح بالشكل (5-30). سرعة الدخول الابتدائية كانت 975 mm/s والمخطط المبين في الأزمنة المنقضية التالية: (a)0.27s, (b)0.39s, (c)0.72s, (d)1.47s, (e)1.80s.

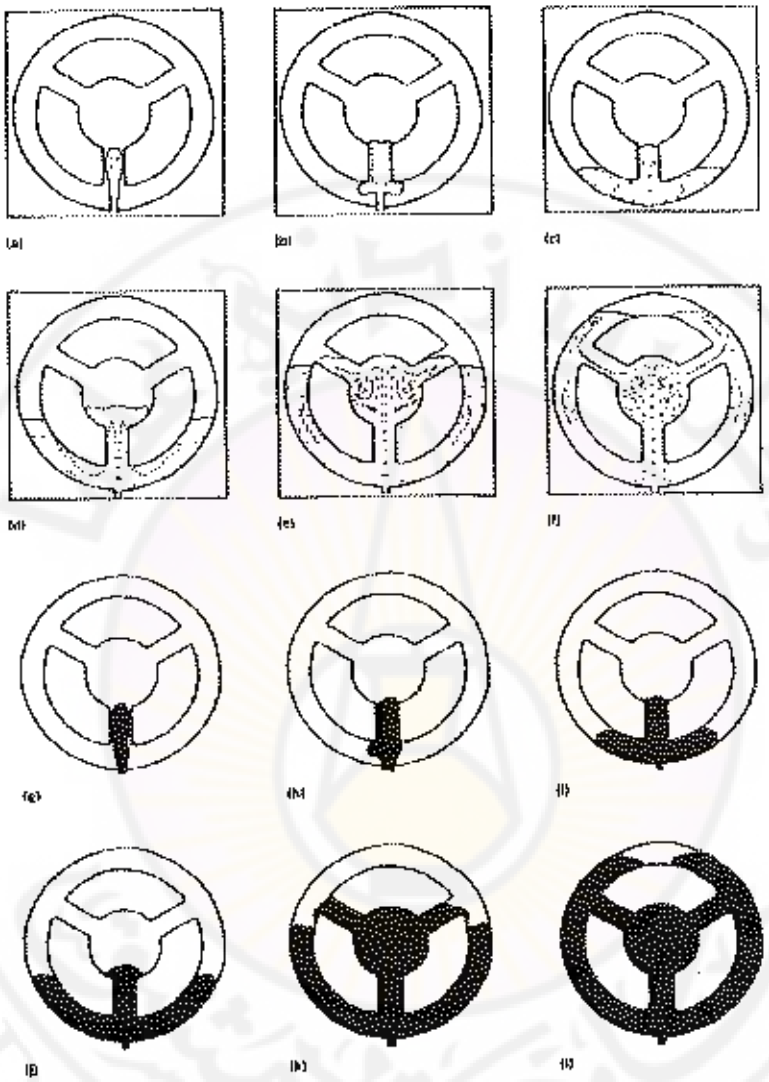


الشكل (5-32): الشكل الهندسي والأبعاد والمخططات الشعاعية (تظهر صور الجريان وبروفيلات السرعة) لنظام الصب المرتبط بقالب المسفيحة المربعة الشاقولية 152×152mm والمخطط الشعاعي المبين أخذ في الأزمنة المنقضية التالية: (a)0s, (b)0.29, (c)0.57s والأبعاد معطاة بالإنش.

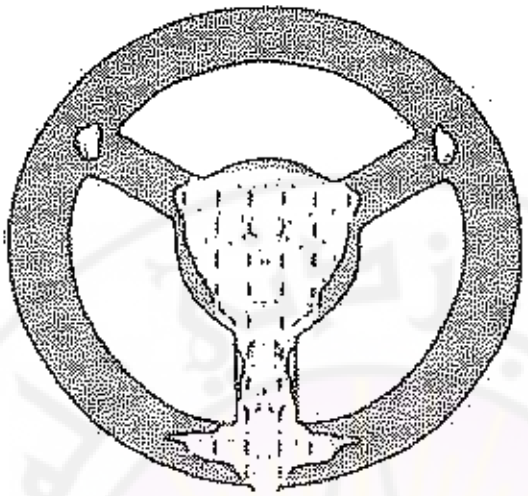
يبين الشكل (5-35) مخطط التجمد الحاصل في مسبوكة الفتحة السفلية بعد 36s من بدء الصب. ويظهر فيها التأثير المتبقي لدخول تيار المعدن السائل بوساطة الحالة السائلة للذراع السفلية بعد تجمد الذراعين العلويتين. وقد تم الحصول على هذه الحسابات بوساطة برنامج يستخدم SOLA-VOF لحساب جريان المائع وبالمزاوجة مع برنامج انتقال الحرارة بالتفاضل المنتهي لحساب توزعات درجة الحرارة. وهذا يفيد خصوصاً في نمذجة المسبوكات الرقيقة التي يمكن أن يحدث فيها تجمد قبل امتلاء القالب تماماً.



الشكل (5-33): مخططات التدفق المحسوبة (a حتى f) وآثار مقاطع التصوير عالي السرعة (g حتى j) لحديد الصب المنصهر الداخل في قالب رملي ذي فتحة علوية لإنتاج عجلة ثلاثية الأذرع. والأزمنة المنقضية للمخططات المحسوبة: (a) 0.250s, (b) 0.600s, (c) 0.900s, (d)1.600s, (e)2.650s, (f)3.000s.



الشكل (5-34): مخططات التدفق المحسوبة (a حتى f) وآثار مقاطع التصوير عالي السرعة (g حتى i) لحديد الصب المنصهر الداخل في قالب رملي ذي فتحة سفلية لإنتاج عجلة ثلاثية الأذرع. والأزمنة المنقضية للمخططات المحسوبة: (a) 0.100s, (b) 0.200s, (c) 0.500s, (d)1.000s, (e)2.200s, (f)2.900s.



الشكل (5-35): مخطط التجمد المحسوب في مسبوكة عجلة ثلاثية الأذرع ذات فتحة صب سفلية المبينة بالشكل (5-34) بعد القضاء مدة 36.192 ثانية. الجزء الصلب أكثر من 0.5 في المنطقة المظللة وأقل من 0.5 في المنطقة غير المظللة لإظهار الأثر المتبقي في الجريان المعدني الحديث الإنجاز من خلال قاع الذراع طوال زمن الصب.

5-5: النمذجة المشتركة لتدفق المائع وانتقال الحرارة/الكتلة:

5-5-1: مقدمة:

إن مبادئ تدفق الموائع وانتقال الحرارة/الكتلة تكتسب أكثر فأكثر قبولاً كوسائط لتحسين جودة وإنتاجية المسبوكات. وعموماً إن انتقال الحرارة والكتلة وكمية الحركة (الدفع) أثناء عملية التجمد تتحكم بهذه الظواهر المتغيرة مثل عزل المواد الماكروية المذابة و وتوزع الفجوات والمسام وتأثيرات التقلص وكل ما يخص زمن التجمد. وتعطي هذه البارامترات بدورها تغيراً في الخصائص الميكانيكية و الفيزياحرارية والكهربائية للمنتج المتصلب.

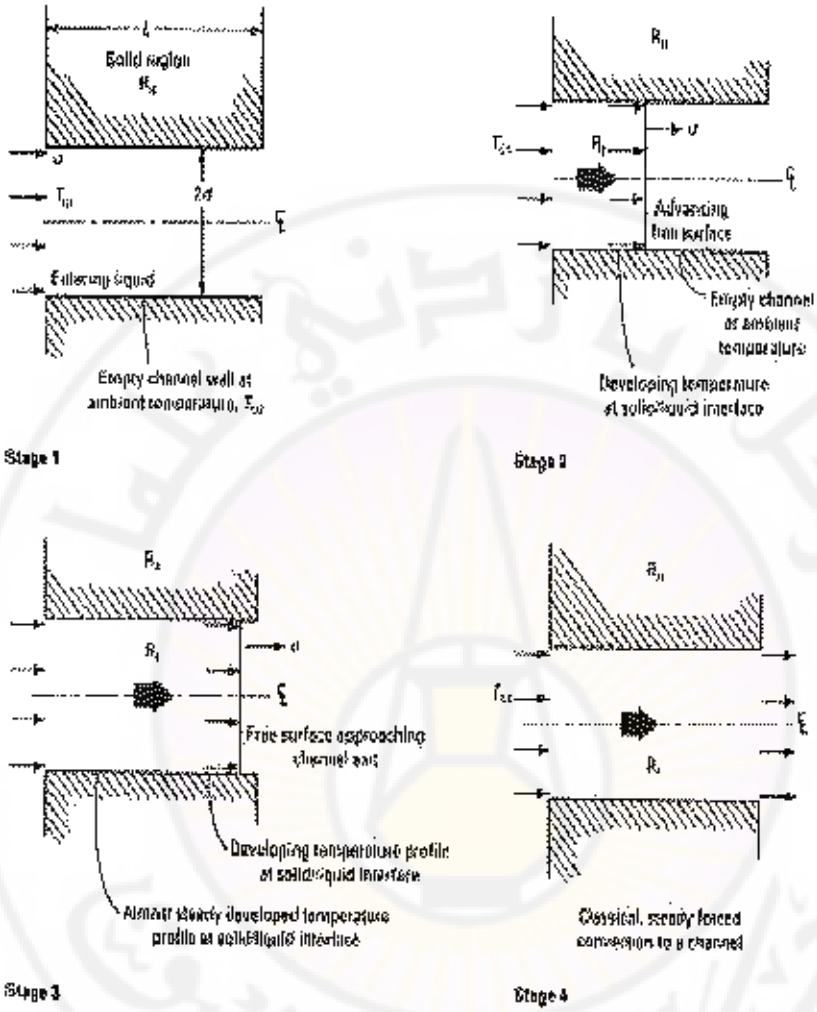
إن الطبيعة المعقدة للجمع بين انتقال الحرارة والكتلة في جريان المائع أثناء التجمد يستوجب الفهم الجوهري لعمليات وآليات للتفاعل في العلاقة بين الصيغ التجريبية والمخططات. إن انتقال

الحرارة بالحمل القسري يتزايد أثناء مراحل الصب. فعندما تملأ فجوة القالب يحدث انتقال حرارة وكتلة بالحمل الحراري الطبيعي الناشئ بالطفو قبل التحول الطوري.

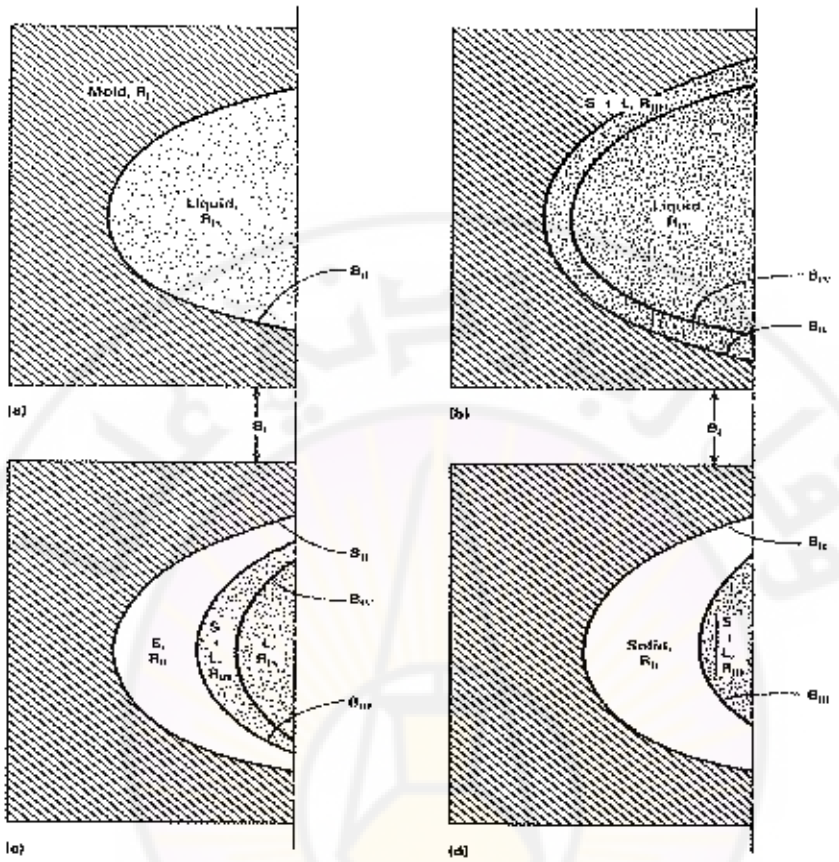
يبين الشكل (5-36) مبادئ انتقال الحرارة بالحمل القسري تخطيطياً، وهو عبارة عن تمثيل معدن متدفق مسخن تسخيناً زائداً إلى مافوق درجة حرارة الصب T_{01} وتتقدم اللزوجة η في قناة القالب بعرض 2d وطول L وبدرجة حرارة محيطية ابتدائية T_{02}. تبين المرحلة 1 قبل دخول المعدن السائل تماماً. وتبين المرحلتان 2 و3 منطقة السائل R_I التي تشغل النصف ثم الأطوال الكلية للقناة تقريباً، على الترتيب. تستمر درجة حرارة سطوح التماس بين المعدن والقالب في الارتفاع مع تقدم جبهة المعدن المتدفق ضمن القناة. إن جزء القالب الذي لم يغمر بعد بالمعدن المتدفق يبقى في درجة حرارة منخفضة جديرة بالاهتمام. أما المرحلة 4 فتبين القناة المملوءة كلياً وجود جريان مستقر وعمليات انتقال الحرارة.

المراحل المتكررة أثناء التجمد لخليطة ثنائية تتضمن تغيراً في كل من حرارة التحول الطوري وانتقال الكتلة وكذلك حمل الأجسام الطافية المنحلة حرارياً.

يبين الشكل (5-37) تمثيلاً تخطيطياً لمراحل التجمد لسبيكة ثنائية. يبدأ التجمد مع التبريد عبر المنطقة المحيطة بالسائل B_{II} بين منطقة المعدن السائل R_{IV} ومنطقة القالب R_I معاً مع التبريد ضمن الإطار B_I بين القالب والمحيط. الشكل 5-(37a). ومن ثم تنشأ المنطقة العجينية Mushy region (سائل/صلب) R_{III} بين المنطقة المحيطة B_{II} مع القالب و B_{IV} مع المعدن السائل. الشكل (5-37b). علاوة على ذلك يقود التبريد إلى صورة نموذجية لحالة الاستقرار وتظهر منطقة قشرية متجمدة R_{II} بين المنطقتين المحيطتين B_{II} و B_{III} مع القالب والعجينة على الترتيب، والمنطقة العجينية R_{III} بين الحدود B_{III} و B_{IV} مع القشرة والسائل على الترتيب. الشكل 5-(37C) والمرحلة الانتقالية الأخيرة تظهر نفاذ منطقة السائل بالكامل R_{IV}. الشكل (5-37d).



الشكل(5-36): مراحل الصب في قناة فارغة. انظر النص الموافق لوصف المراحل من 1 حتى 4.



الشكل (5-37): مراحل تجمد خليطة ثنائية حيث (a) سائل كامل (b) تحول ابتدائي (c) مرحلة استقرار (d) تحول نهائي. انظر النص المناسب للتفصيل.

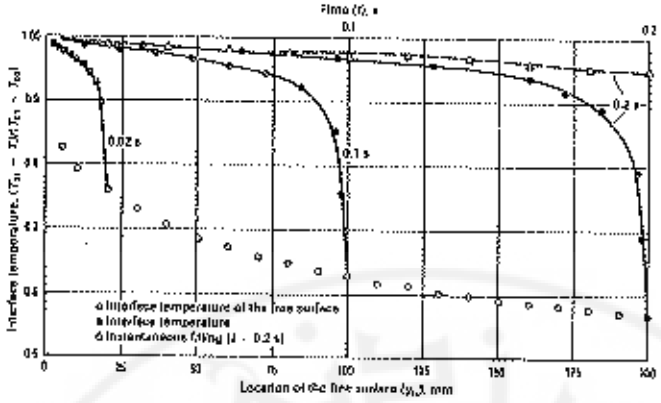
5-5-2: الحرارة المفقودة أثناء الصب:

يتكون العمل الريادي في الحرارة المفقودة من تدفق المعدن إلى قنوات القالب الرملي من المخططات الحاصلة: الحرارة المفقودة مقابل الزمن، مع نسبة مساحة السطح لمعدل التدفق المستخدم كبارامتر. وبفرض الملء اللحظي وبإهمال مقاومة الاحتكاك بين رمل القالب والمعدن

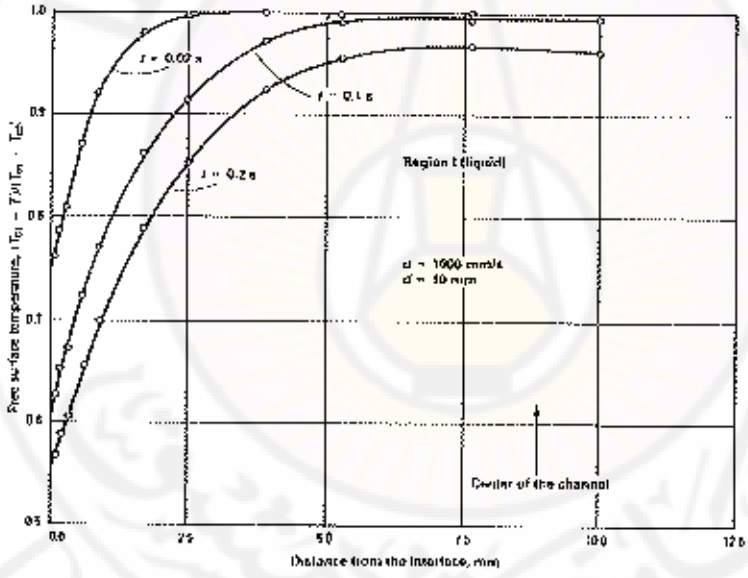
السائل، تعطي هذه الطريقة نتائج جيدة. والنسخة المعدلة من الطريقة المطاوبة من أجل التزايد الثابت أو الخطي في السرعة الوسطية للمعدن المصهور، تشير أن الحرارة المفقودة في القنوات تتناقص مع الزمن و تتناسب مع زمن بقاء العنصر المائع في القناة. ويمكن استخدام هذه النتائج لحساب الحرارة المفقودة لأطوال قنوات متنوعة ومعدلات تدفق وأقطار قنوات ودرجات حرارة صب وخصائص حرارية مختلفة لرمل القالب. ولكن النتائج غير دقيقة للقوالب المعدنية ولا للأزمنة القصيرة جداً بعد الصب.

يمكن الحصول على نتائج أدق استناداً إلى نماذج رياضية أكثر تفصيلاً لعمليات الملء الانتقالية وحلول العناصر المنتهية لدرجة حرارة تقابل المعدن والقالب من أجل الأزمنة القصيرة جداً بعد الصب. ويبين الشكل (5–38) النتائج المثالية لهذه الحسابات لقناة أفقية وفي هذه الحالة يكون الفرق في درجة الحرارة في النظام أعظمياً وهو الفرق بين درجة حرارة الصب ودرجة الحرارة الابتدائية للقالب. والذي يمثل بـ $T_{01} - T_{02}$ ويبين الشكل (5–38) افتراض الملء اللحظي (مثلثات مفتوحة) وتخضع قيمة منتصف القناة لدرجة حرارة الجدار في زمن 0.1 ثانية بعد الصب للعلاقة: $[T_{01} - 0.96(T_{01}-T_{02})]$ بينما تؤثر القيمة الصحيحة بعد الحساب لتدفق المائع أثناء الملء (دوائر مغلقة) هي $[T_{01} - 0.94(T_{01}-T_{02})]$ ومع أن هذا يمكن أن يشير إلى أن التجمد لحظي، فإن الجريان اللاحق للمعدن ذي التسخين الزائد يسبب إعادة إذابة. ويبين الشكل (5–39) البروفيلات العرضية لدرجة الحرارة في القناة في أزمن مختلفة. ويجري حساب مماثل لقناة الصب الشاقولية لأشكال هندسية متنوعة (أطوال، استدقاق، أقطار) معدلات تدفق، درجات حرارة صب، خصائص للمصهور والقالب الرملي. ويتأثر التوافق بانتقال الحرارة بالتوصيل إلى القالب والحمل الحراري المطبقة على الجريان الذي يحدد درجة حرارة التقابل. وبكلمة أخرى كل من الناقلية الحرارية للرمل والسعة الحرارية للجريان مهمة.

إن التحقق التجريبي من النتائج المحسوبة أثناء الملء الانتقالي لنظام صب من أجل مسبوكات حديد الصب اليوتكتيكي بالرمل قد سجلت تغيرات درجة الحرارة في سطوح التقابل بين المعدن والقالب وعلى طول محور التناظر للمقطع الطولاني في الجريان من أجل قنوات الصب والقنوات الفرعية وفتحات التوزيع. ويصنف الجدول(5–3) شحنة الفرن والتحليل الكيميائي للخليطة الناتجة، أما الشروط التجريبية فيوضحها الجدول(5–4).



الشكل (5-38): توزع درجات حرارة سطوح التقابل في قناة ممتلئة.



الشكل (5-39): بروفيلات درجة الحرارة الانتقالية في مقطع عرضي لقناة ممتلئة.

جدول (5-3): شحنة الفرن و التحليل الكيميائي للخليطة الناتجة

الشحنة 2	الشحنة 1	العنصر
60 (132)	56 (123)	Brazil pig iron, kg (lb)
20 (44)	24 (53)	Steel billet, kg (lb)
800	980	Carbon powder, g
1000	32	Ferrosilicon, g

التركيب الكيميائي					رقم الشحنة
P	S	Mn	Si	C	
0.01	0.020	0.177	2.24	3.64	8590(a)
0.06	0.009	0.45	2.13	3.60	8576(a)

(a): حديد صب متوازن

جدول (5-4): يعطي تصنيف ملخص للشروط التجريبية.

Gating system	Test condition	Height/ length		Section size		Area		Ratio
		mm	in.	mm	in.	Mm^2	$in.^2$	
Sprue								
I	1	300	12	14 × 14	0.55 × 0.55	196	0.30	1
I	2	300	12	31 × 22(a)	1.22 × 0.87	380	0.59	2
I	3	300	12	37.5 × 30(a)	1.48 × 1.18	706	1.09	2
II	4	300	12	14 × 14	0.55 × 0.55	196	0.30	1
II	5	300	12	31 × 22(a)	1.22 × 0.87	380	0.59	2
II	6	300	12	37.5 × 30(a)	1.48 × 1.18	706	1.09	2
Runner								
I	1	400	16	16/8 × 16	0.63/0.32×0.63	192 × 2	0.29 × 2	2
I	2	400	16	16/8 × 16	0.63/0.32×0.63	192 × 2	0.29 × 2	2
I	3	400	16	20/10 × 20	0.79/0.40×0.79	300 × 2	0.47 × 2	2
II	4	180	7	16/8 × 16	0.63/0.32×0.63	192 × 2	0.29 × 2	2
II	5	180	7	16/8 × 16	0.63/0.32×0.63	192 × 2	0.29 × 2	2
II	6	180	7	20/10 × 20	0.79/0.40×0.79	300 × 2	0.47 × 2	2
Ingate								
I	1	35	1.4	11/9 × 10	0.43/0.35×0.39	100 × 2	0.16 × 2	1
I	2	35	1.4	11/9 × 10	0.43/0.35×0.39	100 × 2	0.16 × 2	1
I	3	35	1.4	11/9 × 15	0.43/0.35×0.59	150 × 2	0.24 × 2	1
II	4	110	4.4	11/9 × 10	0.43/0.35×0.39	100 × 2	0.16 × 2	1
II	5	110	4.4	11/9 × 10	0.43/0.35×0.39	100 × 2	0.16 × 2	1
II	6	106	4.2	11/9 × 15	0.43/0.35×0.59	150 × 2	0.24 × 2	1

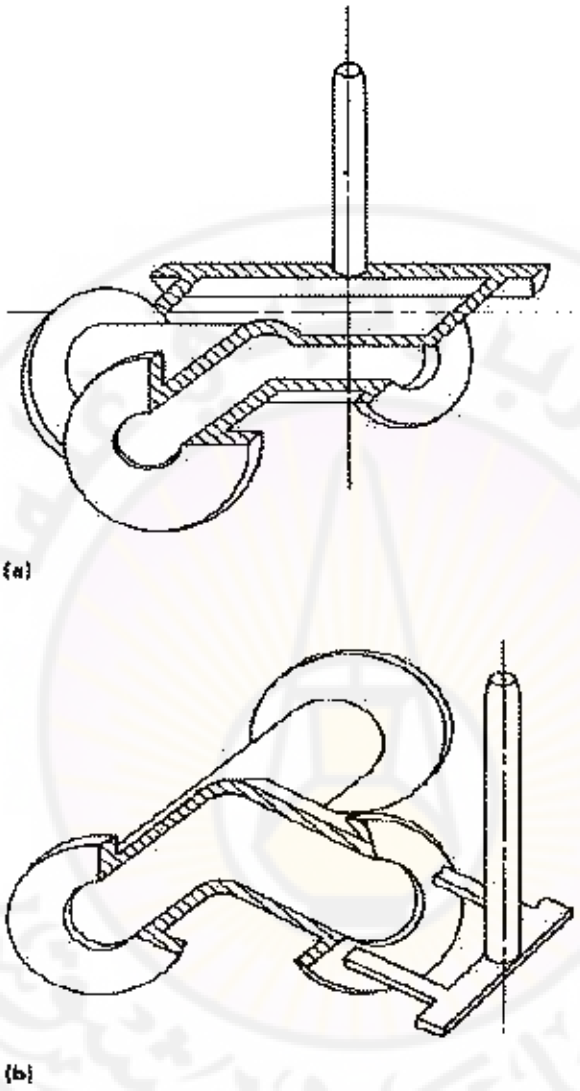
(a): أقطار المقطع الدائري.

انظر أيضاً الشكل (5-40) الذي يبين أنظمة فتحات التوزيع المستخدمة في التجارب. والشكل (5-41) الذي يعطي النتائج النموذجية لتغير درجة حرارة سطوح التماس في مواقع مختلفة لمراحل الصب والتجمد. ويشير الرقم بجانب كل منحني إلى ارتفاع نقطة القياس من الأسفل إلى الأعلى في المصهور. ويكون سطح التقابل المبكر على تماس مع المصهور الساخن وتتغير درجة الحرارة المبكرة. وتكون معظم درجات حرارة سطح التقابل قريبة من قيمة خط التجمد عند إتمام الصب. وبناءً عليه يجب أن تتضمن أية حسابات لاحقة للتجمد توزعاً لدرجات الحرارة الابتدائية.

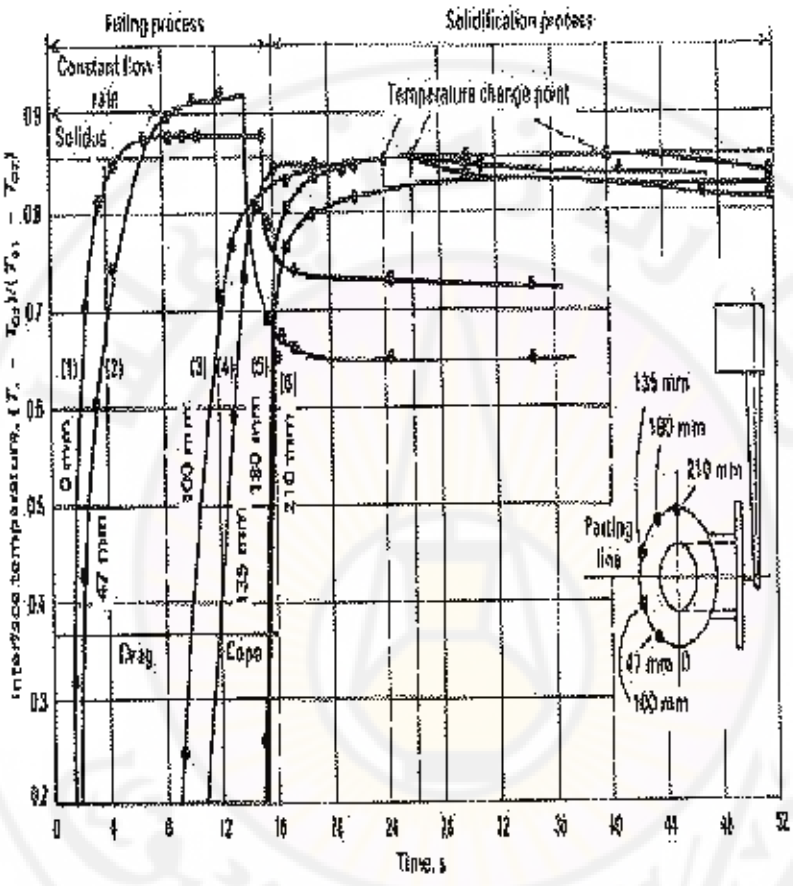
5-5-3: الحمل الحراري الطافي بعيد الصب:

إن فقدان التسخين الزائد للمعدن السائل في فجوة القالب بعد انتقال الملء إلى خارج القالب يحدث بوساطة تيارات الحمل الطافي المتولدة، وتعمل هذه التيارات على إعادة توزيع درجة حرارة المصهور وتركيبه حتى يبدأ التجمد. تتضمن سلسلة التجمد اللاحق (الشكل (5-37) فقدان الحرارة بالحمل الطافي للذوبان الحراري أثناء التحول الطوري.

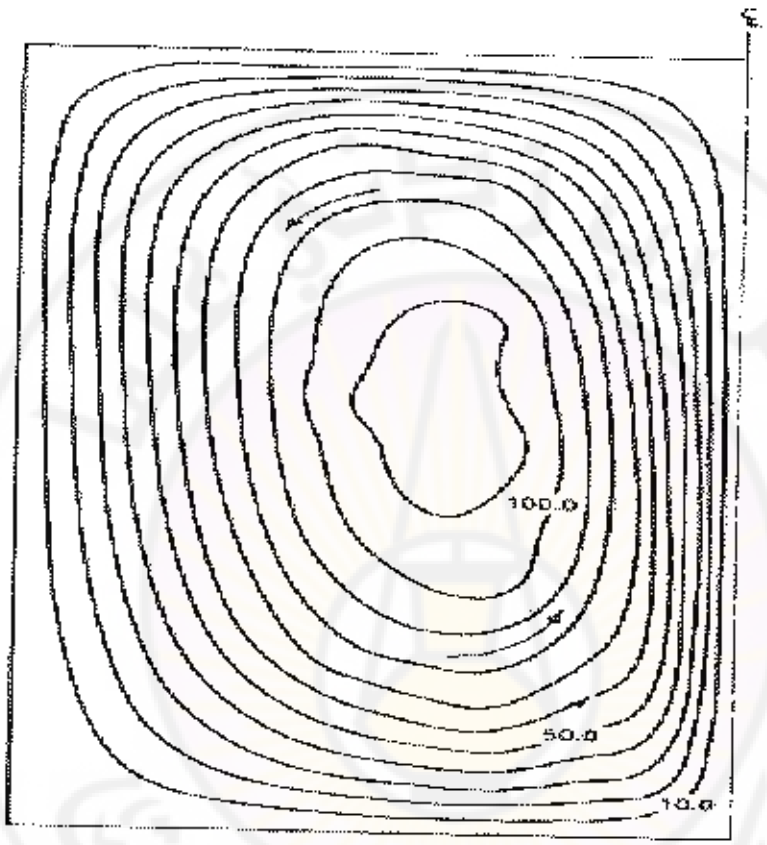
ويبين الشكل (5- (42(a) صور تيارات الحمل المحسوبة في المصهور الصافي من أجل فجوة مستطيلة شاقولية. ويميز عدد Rayleigh المشار إليه في الشكل (5- (42(a) يميّز مقاومة النقل الطافي في العلاقة مع الانتشار الصرف. وبالمقارنة مع صور الجريان أثناء الصب ترفع هذه التيارات بشكل ملحوظ المعدن الساخن إلى القمة، وتعيد توزيع الحالة الحرارية للمصهور قبل بدء التجمد. ويبين الشكل (5- (42(b) الارتفاع النموذجي للسوية الحرارية الساخنة. ويجب أن يؤخذ توزع درجات الحرارة في فجوة القالب بالحسبان في أية محاكاة لاحقة.



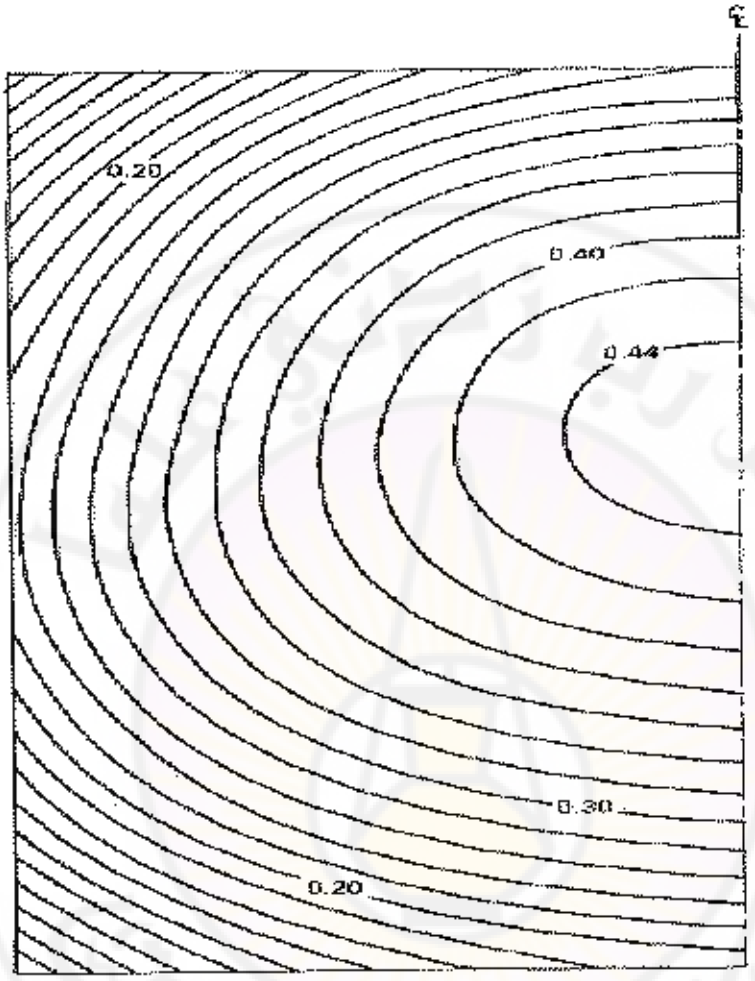
الشكل (5-40): نظام صب يستخدم أثناء التجارب على تغيرات درجة حرارة سطوح التقابل بين القالب والمعدن حيث: (a) نظام صب I، وفيه يدخل المعدن من جانب الشفة. (b) نظام صب II، وفيه يدخل المعدن من وسط الشفة. انظر أيضاً الجدول (5-4) والشكل (5-41).



الشكل (5-41): تغير درجة حرارة سطوح التقابل بين المسبوكة والقالب في مواقع مختلفة أثناء الصب والتجمد، وتمثل القيم المحاطة بأقواس شروط الاختبار الستة الموصوفة في الجدول (5-4). أنظر أيضاً الشكل (5-40).



الشكل (5- (42(a)): تابع التيار النهائي في حقل الجريان في فجوة مملوءة بالنحاس السائل. حيث النسبة الانسيابية للفجوة هي 2 وعدد Rayleigh المعلية هو 7000 يظهر في الشكل النصف الأيسر من النصفين المتناظرين للفجوة. وبالتحرك أفقياً نحو اليمين من مركز إيضاح خط التناظر للفجوة، تتناقص المسافة بين كل خطي تيار متجاورين، ويشكل الخط المركزي المنقط إطاراً معزولاً بين نصفي الفجوة المتناظرين.



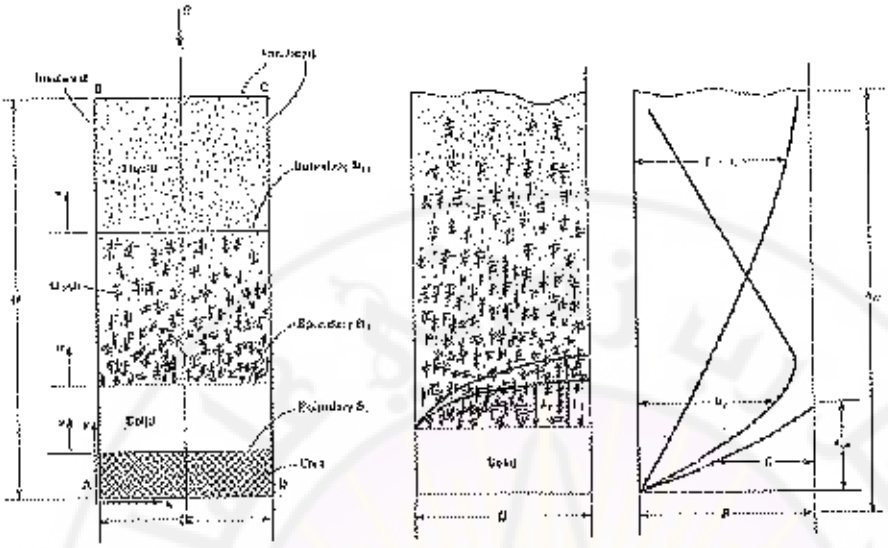
الشكل **(5- (42(b)**: توزع درجات الحرارة النهائي في حقل الفجوة للنحاس السائل. حيث النسبة الانسيابية للفجوة هي 2 وعدد Rayleigh للعملية هو 7000 يظهر في الشكل النصف الأيسر من النصفين المتناظرين للفجوة. والمنحني الموسوم 0.44 هو الأكثر حرارة بين السويات الحرارية، حيث تفوق درجة حرارته درجة التجمد ويساوي 44% من الفرق الأعظمي بين درجة حرارة السائل المسخن بشكل زائد ودرجة حرارة التجمد في بداية عملية الحمل الطبيعي للفجوة.

في حالة الخلائط المصهورة يتسبب الفرق في الوزن الذري للمعادن المكونة في نموذج حمل إضافي. إن درجة الحرارة والإعادة وتوزيع الذوبان الناشئة عن الحمل الحراري الطافي تحدث بشكل مزدوج. وكل منهما يتحكم بالآخر. إن كل من مقياس حركة الحمل والزمن أثناء تسلسل التجمد يمكنان من تحديد الحمل الحراري، وبالتالي تحديد بارامترات العملية الحاكمة لسلوك البنية البلورية. ويمكن اختبار عمل النماذج الرياضية أثناء تجمد خليطة من معدنين للحصول على قيم الزمن والطول ومقاييس الحركة للسائل والصلب القابلة للتطبيق والمناطق العجينية المرسومة في الشكل (5–37). ومنه فإن الأمر الحاسم من وجهة نظر ميتالورجية هو نشوء المنطقة العجينية والعوامل التي تتحكم بها.

تشاهد المنطقة العجينية في عينة مسبوكة شاقولية على شكل غابة متشجرة (الشكل (5– 43(b)) غارقة في حوض المصهور، وتميز بالتوزع الحقلي لجزء الكتلة المتجمد Ø. ويميز بدوره المزيج بين السائل والصلب تحت التوازن الطوري الترموديناميكي المحلي بوساطة الضغط ودرجة الحرارة والتركيب الوسطي للمزيج. وعندئذ تنتج التراكيز المحلية للسائل والصلب من قانون العتلة. تمزج معاً حالات التوازن للكتلة والدفع والأنواع والطاقة الحرارية ودومان جزيء الكتلة المتجمد جزئياً مع معادلة السيولة. يمكن استنتاج الجريان الطافي بوساطة انتقال الكتلة والحرارة المنطلق بقيمة بارامتر الطفو N:

$$N = \frac{\beta_c \Delta_c}{\beta_T \Delta_T}$$

حيث β_c التغير الجزئي في الكثافة الناتج عن تغيرات التركيز و β_T التغير الجزئي في الكثافة الناتج عن تغيرات درجة الحرارة. ولكن في معظم الحالات العملية الهامة لتجمد الخلائط الثنائية يقاد التيار الطافي بانتقال الكتلة.



الشكل (5- 43): تجمد مسبوكة عمودية طويلة. (a) مراحل تجمد الخليطة (b) نشوء طبقة محيطية في المنطقة العجينية (c) تركيز الطبقة المحيطية، السرعة ودرجة الحرارة.

الطبقة المحيطية تعطي تركيز، درجة الحرارة، السرعة في انتقال الكتلة عبر المسبوكة العمودية الطويلة كما هو موضح بالشكل (5-43(b)) و (5-43(c)). في نظام الطبقة المحيطية تمثل ترتيبات المقادير $\Delta C, \Delta T, y, x$ بالشكل:

$$x \sim B,\ y \sim \delta_c,\ \Delta T \sim (T_0 - T_e),\ \Delta C \sim C_0 - C_e$$

حيث تمثل الرموز السفلية 0,c,e الحالات: الابتدائية والسيولة والبوتكتيكية على الترتيب. بخصوص الأزمنة الصغيرة بعد بدء التجمد تكون جميع عمليات الانتقال انتشارية، حتى الزمن t_f عندما يزيد الحمل عن الانتشار. إن تحليل المقياس لمعادلات المزيج لأجل توازن الكتلة والأنواع والدومان. تعطي ترتيب المقادير في هذه اللحظة (نهاية فترة انتقال الانتشار الابتدائي) كما يلي:

$$t_f \sim \frac{B^2}{D(R_{SB})^{\frac{2}{5}}}$$

حيث B نصف عرض المسبوكة، D انتشارية الكتلة للمزيج الخلائطي R_{SB} عدد Rayleigh الانحلالي الذي يعرف كما يلي:

$$R_{SB} = \frac{g\beta_c \Delta C B^3}{\nu D}$$

حيث ν اللزوجة الديناميكية و g تسارع الجاذبية الأرضية. ويعطى مقدار سماكة الطبقة المحيطية المركزة في هذه اللحظة بالعلاقة:

$$\delta_{CT} \sim B(R_{SB})^{-\frac{1}{5}}$$

ومعدل انتقال الكتلة للحالة المستقرة في المنطقة العجينية يقدر من عدد Sherwood:

$$Sh \sim (R_{SB})^{\frac{1}{5}}$$

ويمكن الحصول على القيم المناسبة لسماكة الطبقة المحيطية الحرارية وعدد Nusselt لحسابات معدل انتقال الحرارة في المنطقة العجينية بوساطة تحليل مقياس لمعادلة الطاقة الحرارية ومعادلة انتقال الدومان. ويتوقع إنجاز وظهور الحسابات المفصلة للقيم الفعلية لتجمد الخلائط في المنشورات المفتوحة في المستقبل القريب.

5-6: نمذجة نمو البنية البلورية:

5-6-1: مقدمة:

تلقت نمذجة تجمد المسبوكات عناية متزايدة مع نضوج الثورة المعلوماتية. إن التطبيق الأساسي التقليدي لهذه التقنية هو حساب مسار السويات الحرارية (خطوط ثبات درجة الحرارة) عبر

المسبوكات المشكلة، والتي تستخدم بدورها للتنبؤ بمواقع البقع الحارة في المسبوكات وللاختبار كذلك، باستخدام الحاسوب ونظام صب وإرضاع مفترض بدلاً من اتباع التقنية التقليدية في التجربة والخطأ التي تستخدم المسبوكات.

لقد نشرت الورقة الريادية من قبل Henzel & Keverian والتي تصف تطبيق برنامج انتقال الحرارة عام 1965. إن برنامج انتقال الحرارة التحولية هو برنامج يستخدم طريقة التفاضل المنتهي (FDM) وقد طور عام 1959 واستخدم من أجل المسبوكات. وبعد ظهور هذه الورقة بقليل تحدثت الكثير من المنشورات عن استخدام تقنيات رقمية مختلفة في مجال تجمد المسبوكات. وقد كانت الخطوة التالية نحو الأمام هي تضمين التنوية والتحرك المتنامي في المحاكاة لتوليد معلومات حول البنية البلورية للخلائط ولمعالجة مسائل نشوء الحرارة؛ ومع أن هذه الخطوة طرحت من قبل Oldfield في بداية 1966 إلا أن التقدم في هذا الاتجاه ظل بطيئاً. وكانت الورقة شبه الوحيدة التي تبعت ذلك هي تلك المقدمة من قبل Stefanscu & Trufinscu عام 1974 حيث استخدمت التنوية و التحرك المتنامي في نمذجة منحنيات التبريد لتفسير التلقيح في حديد الصب.

في عام 1984 بدأ يتجلى في المنشورات الاهتمام في نمذجة تطور البنية البلورية كجزء من محاكاة تبريد المسبوكات. وقد طبق منهج تحليلي من قبل Svensson & Fredriksson لتجمد حديد الصب الرمادي والأبيض واليوتكتيكي والمطيل ثم وسعت من قبل Stefanscu & Kanetkar لتشمل تحولات حديد الصب تحت اليوتكتيكي واليوتكتوئيدي. وقد استخدم مخطط FDM ذو اتجاه عقدي داخلي متحد مع نموذج النمو الكروي للغرافيت المتحكم به من خلال انتشار الكربون عبر قشرة الأوستنيت. وقد حصلت مؤخراً تطورات جديدة من أجل النمو المتشعب للحبيبات المتساوية محورياً.

في هذه الفقرة سنناقش التقنيات المستخدمة لمحاكاة التجمد في المسبوكات. وتجمع هذه التقنيات بين نمذجة انتقال الحرارة (النمذجة الماكروية) مع نمذجة نمو البنية البلورية (النمذجة الميكروية).

5-6-2: النمذجة الماكروية:

إن تجمد الخلائط محكوم بداية بانتشار الحرارة وبعض الامتداد للحمل في المنطقة السائلة. وفي معظم مناهج نمذجة التجمد للمسبوكات المعقدة الشكل لايمكن حل معادلة الاستمرار للحركة

بشكل واضح. وبالمقابل يمكن أخذ التصحيح بالحسبان بزيادة الناقلية الحرارية فوق نقطة الانصهار أو درجة حرارة السيولة. وبوجود هذه الفرضية تكون معادلة الاستمرار الأساسية التي تحكم التجمد في المقياس الماكروي هي معادلة مصونية الطاقة:

$$div\left[k(T).\overrightarrow{grad}\ T(\vec{x},t)\right] + Q = \frac{\rho C_p(T)\left(\partial T(\vec{x},t)\right)}{\partial t} \qquad (1)$$

حيث: $T(\vec{x},t)$ هي الحقل الحراري و $k(T)$ هي الناقلية الحرارية و $\rho C_p(T)$ الحرارة الحجمية المحددة و Q حد المصدر المرتبط بالتحول الطوري ويمكن أن تكتب:

$$\dot{Q} = L\frac{\partial f_s(\vec{x},t)}{\partial t} \qquad (2)$$

حيث $f_s(\vec{x},t)$ هو جزيء صلب و L الحرارة الكامنة الحجمية.

ولحل المعادلة (1) يجب إيجاد العلاقة بين الحقول $T(\vec{x},t)$ و $f_s(\vec{x},t)$. وهناك منهج بسيط وواسع الاستخدام لافتراض الجزء الصلب يتعلق فقط بدرجة الحرارة T ولا يتعلق بمعدل التبريد أو معدل النمو. فمن أجل الخلائط المعدنية الصافية أو البوتكتيكية يمكن افتراض أحدها $f_s = 0$ فوق نقطة الانصهار أو درجة الحرارة البوتكتيكية $f_s = 1$ تحت درجة حرارة التوازن. ومن أجل الخلائط المتشعبة طورت العديد من نماذج الانتشار الذوباني. وجميعها تفترض المزج بين المحلول والسائل وهكذا ينتج منحني وحيد $f_s(T)$.

وبفرض أن f_s تتعلق فقط بـ T يمكن عندئذ دمج المعادلتين 2 و1 لتعطي:

$$div\left[k(T).\overrightarrow{grad}\ T(\vec{x},t)\right] = \left[\rho C_p(T) - L\frac{\partial f_s}{\partial T}\right]\frac{\partial T(\vec{x},t)}{\partial t} \qquad (3)$$

ومن تعريف الانتالبية H:

$$H(T) = \int_0^T \rho C_p(\theta).d\theta + L[1 - f_s(T)] \qquad (4)$$

ويمكن أن نكتب المعادلة 3 بالشكل:

$$div[k(T).\overrightarrow{grad}\ T(\vec{x},t)] = \frac{\partial H(\vec{x},t)}{\partial t} \qquad (5)$$

وهذا ما يعرف بطريقة الانتالبية، ويمكن اشتقاق الحرارة النوعية المؤثرة ρC_p^* من المعادلة 4:

$$\rho C_p^*(T) = \frac{dH}{dT} = \rho C_p(T) - L\frac{\partial f_s}{\partial T} \qquad (6)$$

وعند إدخالها في المعادلة 3 تعطي:

$$div[k(T).\overrightarrow{grad}\ T(\vec{x},t)] = \rho C_p(T).\frac{\partial T(\vec{x},t)}{\partial t} \qquad (7)$$

وهذا ما يعرف بطريقة الحرارة النوعية.

تحسب المنحنيات H(T) و $\rho C_p^*(T)$ بوساطة طرائق متنوعة مثلاً: باستخدام نموذج Brody-Flemings للانتشار الذوباني. إن المقارنة التفصيلية بين الطريقة الانتالبية وطريقة الحرارة النوعية المؤثرة خارج مجال هذه الفقرة.

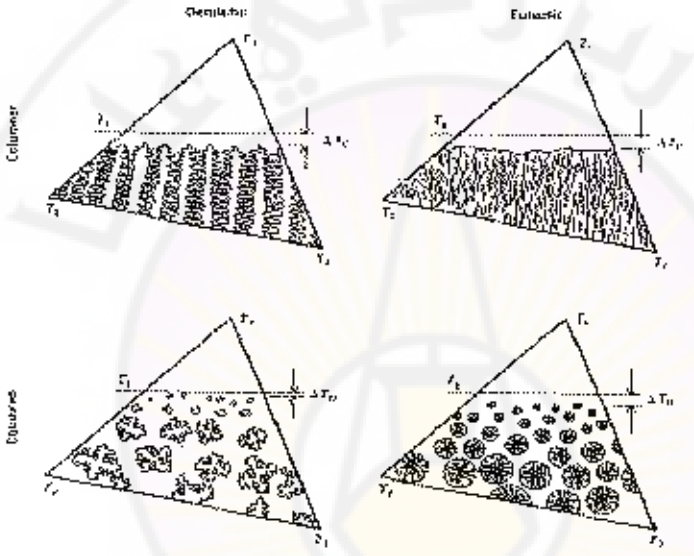
يمكن استخدام كلتا الطريقتين في النمذجة الميكروية والماكروية. وهنالك تقنيات أخرى مثل طريقة الحرارة الكامنة أو طريقة الانتالبي الميكروية التي طورت خصيصاً من أجل النمذجة الميكروية الماكروية. وستناقش هذه الطرائق في قسم "النمذجة الميكروية الماكروية للتجمد المتناسق" في هذه الفقرة.

3-6-5: نمذجة البنى العمودية

يمكن أن تطبق طريقة النمذجة البلورية (الميكروية) الموصوفة سابقاً بشكل معقول على التجمد العمودي لأن معدل نمو البنية البلورية (الجبهة اليوتكتيكية أو قمة التشعب) أكبر أو أصغر أو

تساوي سرعة تحرك السويات الحرارية المناسبة (خطوط السيولة أو اليوتكتيك). وعلاوة على ذلك تحسب البارامترات البلورية والتبريد الزائد من الحقل الحراري في هذه الحالة.

تصادف تشكيلات نمو عمودية في كل من الخلائط اليوتكتيكية والمتشعبة. ويحدث التجمد عندما تكون سرعة النمو لقمة التشعب أو جبهة اليوتكتيك Vs متعلقة بسرعة السويات الحرارية المحسوبة في الطريقة الماكروية. ومن الضروري أيضاً وجود تدرج حراري موجب G في سطح التقابل بين السائل والصلب. ولكن هذا الشرط غير كافٍ لتأكيد المعلومات عن البنى العمودية.



الشكل (5-44): مخطط لنمو متجانس محورياً ونمو عمودي للخلائط المتشعبة واليوتكتيكية في التدرج الحراري.

إن التنافس بين التشكل العمودي والمتجانس محورياً على الأخص في التحول من العمودي إلى المتجانس محورياً. ويمكن أن نحسب ما يلي لبيئة حرارية ماكروية معطاة:

- التبريد الزائد ΔT_c المرتبط بتشكيل البنية العمودية.
- التبريد الزائد للتنوية ΔT_N حيث تتشكل النواة داخل المصهور.
- التبريد الزائد ΔT_E المطلوب للتحكم بالتجمد المتجانس محورياً.

في ظروف النمو المستقرة وباعتبار الأنواع الثلاثة للتبريد الزائد يمكن أن يعرف معيار بسيط للحصول على البنية العمودية:

$$G > A \times N_0^{\frac{1}{3}} [1-(\Delta T_N / \Delta T_C)^3] \times \Delta T_c \qquad (8)$$

حيث N_0 كثافة الحبيبات النواة في درجة التبريد الزائد ΔT_N و A هو ثابت.

بفرض أن التدرج الحراري G كبير كفاية لتأكيد الحصول على البنية العمودية يمكن توظيف نظريات تشكل البنية البلورية بسهولة في حسابات تدفق الحرارة الماكروي إذا اتبعت النظريتين التاليتين:

تحرك الجبهة اليوتكتيكية أو قمة التشجر معطى بوساطة تحليل نمو الحالة المستقرة.

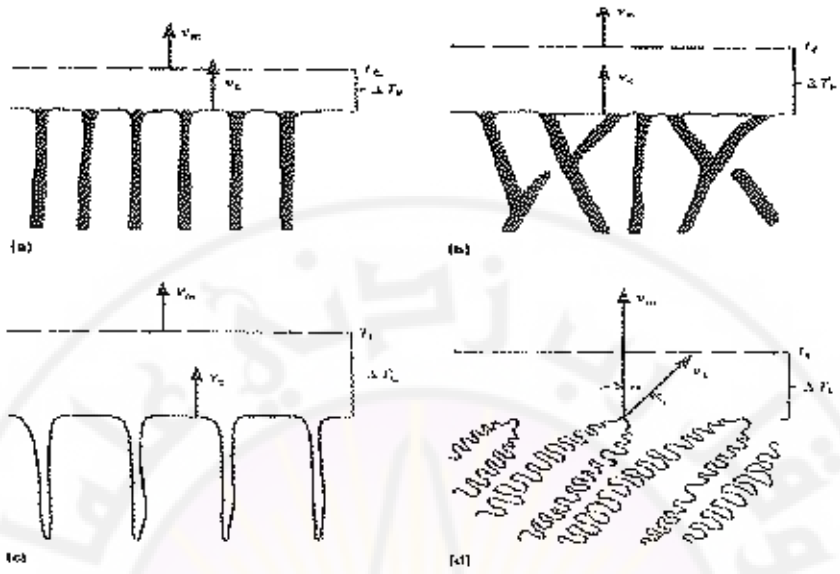
تتعلق سرعة البنية البلورية v_s بالسرعة v_m لسوية حرارة التوازن المناسب كما في الشكل (5-45) حيث يبين هذا الشكل أربع بنى بلورية مختلفة تصادف بشكل متكرر في التجمد: اليوتكتيك النظامي والشاذ والتشكيلات الخلوية والشجرية. وفي الحالات الثلاث الأولى لدينا:

$$v_s = v_m \qquad (9a)$$

بالنسبة للخلائط الشجرية تقاد سرعة قمة الشجرة بالتوجه الجذري وتستغل بوساطة توجه الشكل البلوري للصلب (مثلاً <100> للمعادن المكعبة) وإذا كانت α الزاوية بين اتجاه الجذر واتجاه التدفق الحراري، عندئذ:

$$v_s = \frac{v_m}{\cos \alpha} \qquad (9b)$$

وسيتم اختيار مثل تلك الحبيبات التي زاويتها قريبة من الصفر لتنمو بشكل مفضل. وبالاستناد إلى النظريتين المشار إليهما سابقاً، يمكن أن توظف تحركات تشكل البنية البلورية ضمن حسابات تدفق الحرارة الماكروي بالتوافق مع المخطط البسيط التالي. أولاً حساب تطور الحقل الحراري دون الأخذ بالحسبان أي تبريد زائد. عندما يعرف الحقل الحراري يمكن أن تستنتج سرعة السويات الحرارية الملائمة (السيولة أو درجة حرارة اليوتكتيك) مثل التدرج الحراري في سطوح التقابل.



الشكل (45-5): العلاقة بين سرعة النمو للسويات الحرارية الماكروية v_m وسرعة النمو v_s لأربعة بنى بلورية عمودية حيث: (a) و (b) بوتكتيك نظامي وغير نظامي على الترتيب (c) خلوي، (d) شجري.

من هذه القيم يمكن حساب التبريد الزائد للبنية البلورية العمودية والبارامترات المتعلقة بالبنية البلورية باستخدام النظريات الأخيرة في تشكل البنية البلورية.

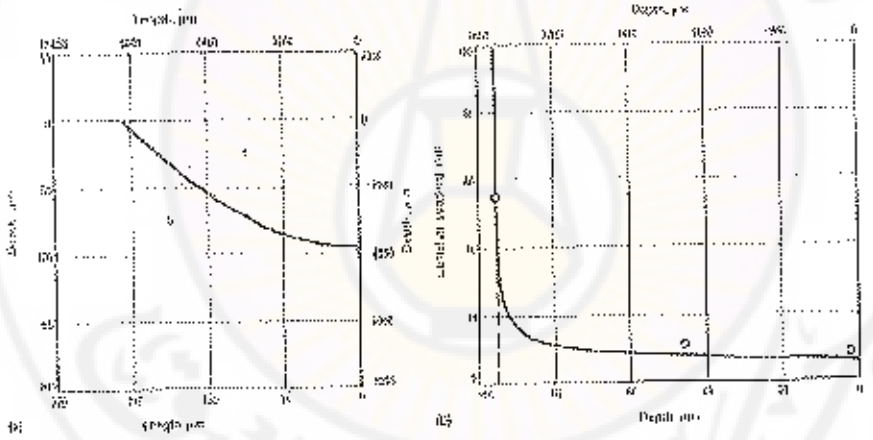
لقد أنجز باحثان مزاوجة حقيقية بين نظرية تشكل البنية البلورية الشجرية وحسابات التدفق الحراري أحادي البعد غير المستقر في حالة إعادة الصهر للسطوح المعدنية بوساطة حزمة ليزرية. وبشكل خاص أنشئ نموذج لجزيء صلب يأخذ بالحسبان التبريد الزائد الكبير المجرب بوساطة قمم التشجر تحت ظروف التجمد السريع، وتبين أنه حتى تحت هذه المحيطات لا تختلف النتائج المتوقعة لهذه الطريقة عن النموذج الأبسط الذي يهمل التبريد الزائد في المقياس الماكروي.

وقد طبقت هذه الطريقة الأخيرة لمعالجة السطوح المعدنية بالليزر للتنبؤ بالتباعدات الصفائحية لخليطة النحاس والألمنيوم البوتكتيكية من الشكل المستقر المحسوب لحوض السائل. وقد

استخدمت هذه الطريقة مؤخراً لتحليل البنية البلورية الشجرية الناتجة في اللحام بالأشعة الالكترونية لبلورة مفردة من الستانلس ستيل (الشكل (5-46). ويبدو من الشكل الماكروي لحوض السائل حيث يمكن تطبيق معيار التبريد الزائد الأقل الذي يعني سرعة أقل لتحديد أي اتجاه جذر تشجر هو المختار.

5-6-4: نمذجة البنى المتجانسة محورياً:

عند التعامل مع البنى البلورية المتجانسة محورياً تكون سرعة نمو الحبيبات ليست أكثر ارتباطاً مع سرعة السويات الحرارية بل مع التبريد الزائد المحلي (الشكل (5-48)) بدلاً من ذلك. وإضافة إلى ذلك يتعلق مسار التجمد أيضاً بعدد الحبيبات المنزاة في المصهور المبرد بشكل زائد. وفي مثل هذه الحالة يجب أن تكون الطريقة المستخدمة مرتبطة بالجزيء المتصلب من التبريد الزائد المحلي.



الشكل (5-46): الشكل المستقر المحسوب (a) لحوض السائل الذي يتشكل اثناء المعالجة الليزرية لسطح خليطة الألمنيوم-النحاس. مواصفات الليزر: استطاعة اجمالية 1500w مركز ضمن بؤرة بقطر 0.2mm يتحرك إلى اليمين بسرعة 1m/s ومعامل الامتصاص 0.15 ومع ان الحساب تم في ثلاثة أبعاد فإن الجزء المعاد من الحوض والمعاد التجمد هو الذي يرى فقط ضمن المقطع الطولاني. (b) التباعد الصفائحي للخليطة البوتكتيكية للنحاس والألمنيوم مع عمق سطح المعالجة الليزرية مثل ذلك المحسوبة من شكل الحوض السائل (a) وباستخدام النظرية الحديثة لتشكل اليوتكتيك.

5-6-4-1: النمذجة الميكروية للبنى المتجانسة محورياً:

ليكن لدينا عنصر حجمي صغير v وفي درجة حرارة متجانسة T ضمن أي تبريد جاري متجانس محورياً. يعطى الجزيء الصلب $f_s(t)$ في الزمن المعطى t بالعلاقة:

$$f_s(t) = n(t).\frac{4}{3}\pi R^3(t).f_i(t) \qquad (10)$$

حيث n(t) كثافة الحبيبات و R(t) متوسط نصف قطر الحبيبات المتجانسة محورياً الذي يميز وضع قمم الشجر أو جبهة الدوتكتيك، و$f_i(t)$ الجزء الداخلي للصلب. ومن أجل اليوتكتيكات تكون الحبيبات متصلبة بالكامل بشكل متوافق $f_i(t) = 1$ في أي لحظة. أما في الخلائط الشجرية يمثل $f_i(t)$ الجزء المتصلب من الحبيبات فعلياً.

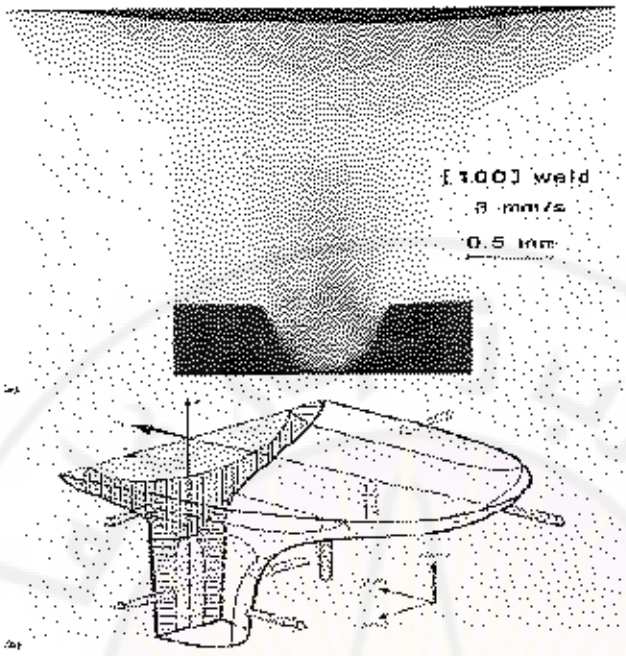
للتنبؤ بتكون الجزء الصلب $f_s(t)$ يجب أن يرتبط أحد المتحولات الثلاثة التالية: n(t), R(t), T(t) بالتبريد الزائد ΔT ويتم ذلك باعتبار تحركات التنوية وانتشار المحلول بالنسبة للشجريات.

<u>تحركات التنوية:</u> يمكن أن يعطى المعدل $\dot{n}(t)$ الذي تنوى فيه حبيبات جديدة بشكل غير متجانس داخل السائل في التبريد الزائد المنخفض بالمعادلة:

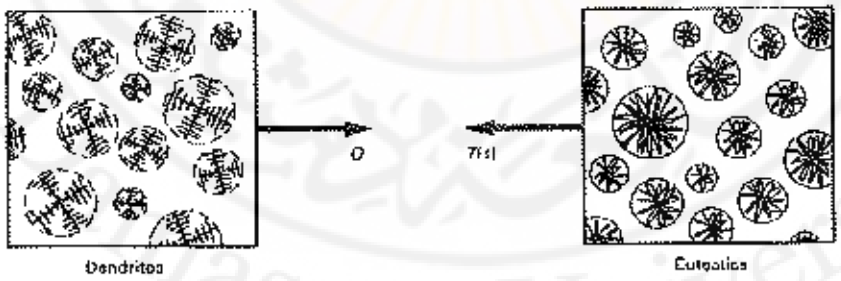
$$\dot{n}(t) = k_1[n_0 - n(t)]exp\left\{\frac{-K_2}{\Delta T(t)}\right\} \qquad (11)$$

حيث K_1 نسبة معدل تردد تصادم مواقع التنوية، n_0 العدد الإجمالي للمواقع الموجودة ضمن المصهور قبل التجمد و K_2 ثابت يتعلق بطاقة التلاقي بين الحبيبات المنوّاة والمختمرة. ويجب استنتاج الثوابت السابقة من التجربة. عندما تعرف يمكن توقع كثافة الحبيبات n(t) في أي لحظة بمكاملة المعادلة (11) بالنسبة للزمن أو درجة الحرارة.

$$n(t) = \int_0^t \dot{n}(\tau).d\tau = \int_0^T \frac{\dot{n}(T)dT}{\frac{dT}{dt}} \qquad (12)$$



الشكل (5-47): مقطع مدور ميكروغرافي (a) من لحام الحزمة الالكترونية في بلورة مفردة من Fe-15N-15Cr. حيث تتحرك الحزمة الالكترونية بسرعة 3mm/s فوق السطح (001) على طول [100] اتجاه التبلور. وتنمو الشجرات في سطوح أحادية التبلور للحام ويمكن ان تأخذ جذورها بمحاذاة على طول اتجاه واحد أو ثلاث اتجاهات. إن اختيار البنية البلورية يتم بالتوافق مع معيار التبريد الزائد الأدنى (او من السرعة الأدنى) وعلاوة على ذلك يمكن استخدام المعلومات في هذا الرسم البياني لإعادة بناء الشكل ثلاثي الأبعاد لحوض اللحام كما هو مبين بالشكل (b).



الشكل (5-48): رسم تخطيطي يبين التجمد الشجري المتجانس محورياً والتجمد اليوتكتيكي.

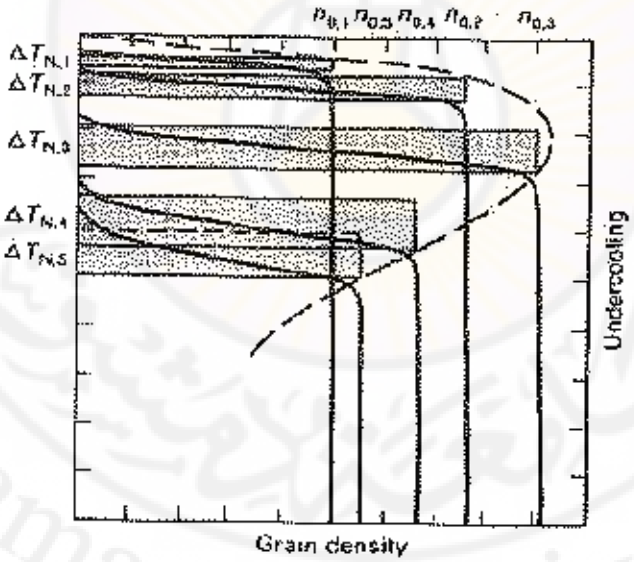
ولكن هذه الطريقة تخفق في توقع كثافة الحبيبات الصحيحة لأن مجال درجات الحرارة الذي تتم التنوية فيه ضيق جداً. ومن أجل تبريد زائد ΔT أصغر من القيمة الحرجة $\Delta T_N = \sqrt{K_2}$ لاتوجد تنوية ملحوظة. وعندما تمتد ΔT_N تزداد $n(t)$ بسرعة كبيرة حتى حد الإشباع. الشكلين (5-49) و (5-50). لذلك يفترض استبدال قانون التنوية المعقد للمعادلة (11) بتابع Dirac في نمذجة التجمد:

$$\frac{dn}{dT} = n_{0,i}\delta(T - T_N) = n_{0,i}\delta\left(\Delta T - \sqrt{K_2}\right) \qquad (13)$$

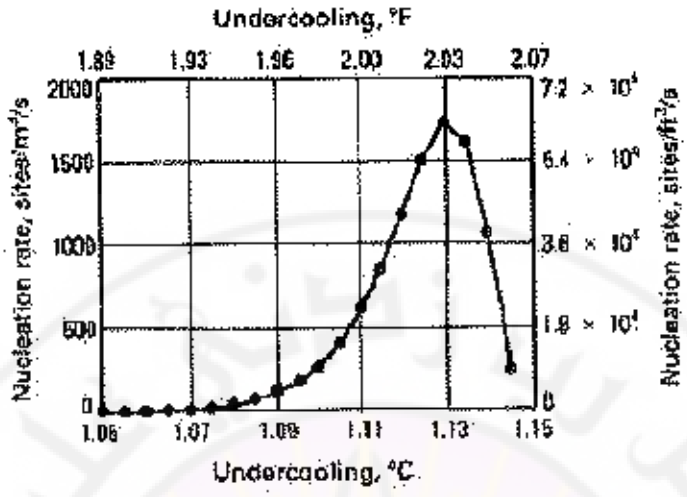
إذا وجد أكثر من نمط لمواقع التنوية يمكن إدخال مجموعة من توابع Dirac

$$\frac{dn}{dT} = \sum_i n_{0,i}\delta(T - T_{n,i}) \qquad (14)$$

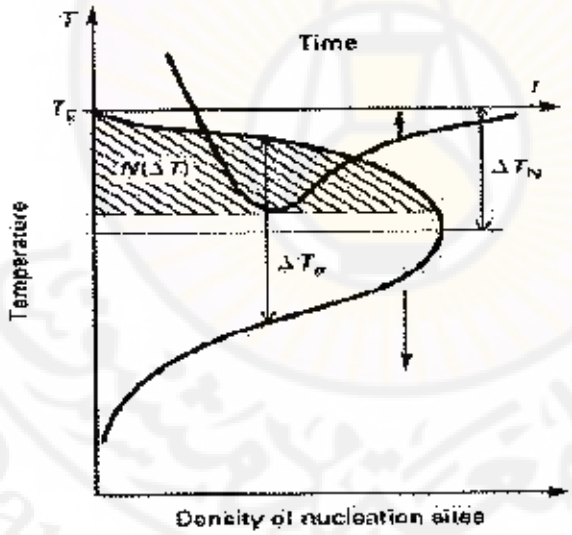
إن هذا التوزع المباشر لأنماط مواقع التنوية يمكن استبداله أيضاً بالتوزع المستمر. الشكل (5-51) مع أن هذا الأخير لا يعكس الظواهر المعقدة للتنوية غير المتجانسة إلا أن لديها بعض المزايا في نمذجة التجمد الميكروية.



الشكل (5-49): رسم تخطيطي للتنوية غير المتجانسة الحاصلة على عائلة من مواقع التنوية، والمميزة بكثافة المواقع $n_{0,i}$ وبدرجة الحرارة $T_{n,i}$ التي تحدث فيها التنوية.



الشكل (5-50): العلاقة المحسوبة بين معدل التنوية والتبريد الزائد لحديد الصب.



الشكل (5-51): التوزع المستمر لأنماط مواقع التنوية.

في الواقع يمكن استبدال التوزع المباشر لأنماط مواقع التنوية بوساطة توزع ضيق جداً إذا رغب أحد بنمذجة التنوية غير المتجانسة الحاصلة في تبريد زائد معين ΔT_N بكثافة مواقع معطاة n_0 (المعادلة 13). وهذا المنهج الأخير يمكن أن يستخدم من أجل التجمد اليوتكتيكي بالاستناد إلى الحقيقة التي نوقشت سابقاً وهي أن مجال درجات حرارة التنوية ضيق جداً. مثلاً: يحسب هذا المجال لحديد الصب بحدود 0.1 °C وهكذا يمكن اختبار درجة حرارة التنوية ΔT_N التي تنوى فيها جميع الحبيبات اليوتكتيكية بذات الوقت. وفي حالة الخلائط ذات الحبيبات غير المتجانسة، يجب افتراض أن الأنماط المختلفة من الخمائر تصبح نشيطة في درجات حرارة التنوية المختلفة. وبشكل متوافق يجب اختبار بعض درجات حرارة التنوية في تلك الأجزاء من العدد النهائي للنوى المتولدة.

<u>النمو:</u> يمكن أن يتعلق تطور نصف قطر الحبيبة R(t) بالتبريد الزائد ΔT للعنصر الحجمي، وتتعلق سرعة جبهة اليوتكتيك v بالتبريد الزائد من خلال العلاقة:

$$v = \frac{dR}{dt} = \mu_- (\Delta T)^2 \qquad (15)$$

حيث μ ثابت يتعلق بمميزات الخليطة.

في الخلائط الشجرية استنتجت علاقة مماثلة في تقريب رؤوس التشجر النصف كروية التي تربط مربع التبريد الزائد بالسرعة الخطية لرؤوس التشجر. ويمكن لذلك استخدام المعادلة 15 مع قيمة مختلفة لـ μ لتوقع تطور حجم الحبيبات. ولكن في حالة الشجريات يجب أن يحسب نمو مجال الجزء الحجمي من الصلب $f_i(t)$. وقد طور مؤخراً لهذا السبب نموذج انتشار المحلول. الشكل (5-52). بفرض وجود مزيج تام من المحلول في السائل المتشجر من الحبيبات الكروية المغلفة من الخارج بتوضعات مراكز التشعب، اعتبر الباحثون توازن المحلول في مقياس الحبيبات المتجانسة محورياً وجريان المحلول الذي يغادر خارج غلاف الحبيبة. ويوجد كما يلي:

$$f_i(t) = \Omega(t).\, g(\delta, R) \qquad (16)$$

حيث:

$\Omega = (C^* - C_0)/[C^* \times (1-k)]$ هو الإشباع الزائد.

$g(\delta,R)$ تابع التصحيح الذي يأخذ بالحسبان طبقة المحلول δ حول عائلات الحبيبات.

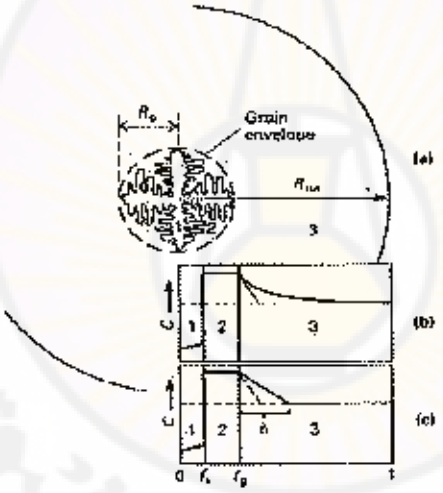
C^* هو تركيز الحبيبات ضمن السائل المتشجر. الشكل(5-52).

C_0 هو التركيز الأولي.

K معامل التوزيع. وبما أن التبريد الزائد ΔT يساوي $m(C^* - C_0)$ حيث m ميل خط السيولة.

$R(t)/$ يتعلق مباشرة بـ ΔT.

من توازن تدفق المحلول يظهر أن طبقة المحلول تعطى ببساطة بالنسبة $2D/v$ حيث D معامل الانتشار. ويلاحظ تأثير الطبقة في التجمد غالباً عندما تتشابك طبقات المحلول مع الحبيبات الشجرية المتجاورة وهكذا يتغير C_0 في عبارة الإشباع الزائد.



الشكل (5-52): رسم تخطيطي يبين نموذج انتشار المحلول الناشئ من أجل النمو الشجري المتجانس محورياً (a) المناطق الثلاث التي يمكن تمييزها (1) صلب شجري (2) سائل ذو أشجار متداخلة (3) سائل خارج غلاف الحبيبة حيث يحدث الانتشار. (b) و (c) مخططات التركيز المناسبة لـ (a).

تصادم الحبيبات: تفترض المعادلة 10 أن الحبيبات كروية خلال جميع عمليات التجمد وهذا صحيح طالما لم تتصادم الحبيبات مع بعضها. في الخلائط الشجرية تكون طبقة الانتشار خارج اغلاف الحبيبة R ويؤخذ بالحسبان تصادم الحبيبات بطريقة ما. أما من أجل الحبيبات اليوتكتيكية يجب أن يدخل تصادم الحبيبات.

إن تصحيح Johnson-Mehl لتصادم الحبيبات المتوقع هو:

$$f_s = 1 - exp\left(-n_v \frac{4}{3}\pi R^3\right) \qquad (17)$$

5-6-4-2: النمذجة الماكروية- الميكروية للتجمد المتجانس محورياً:

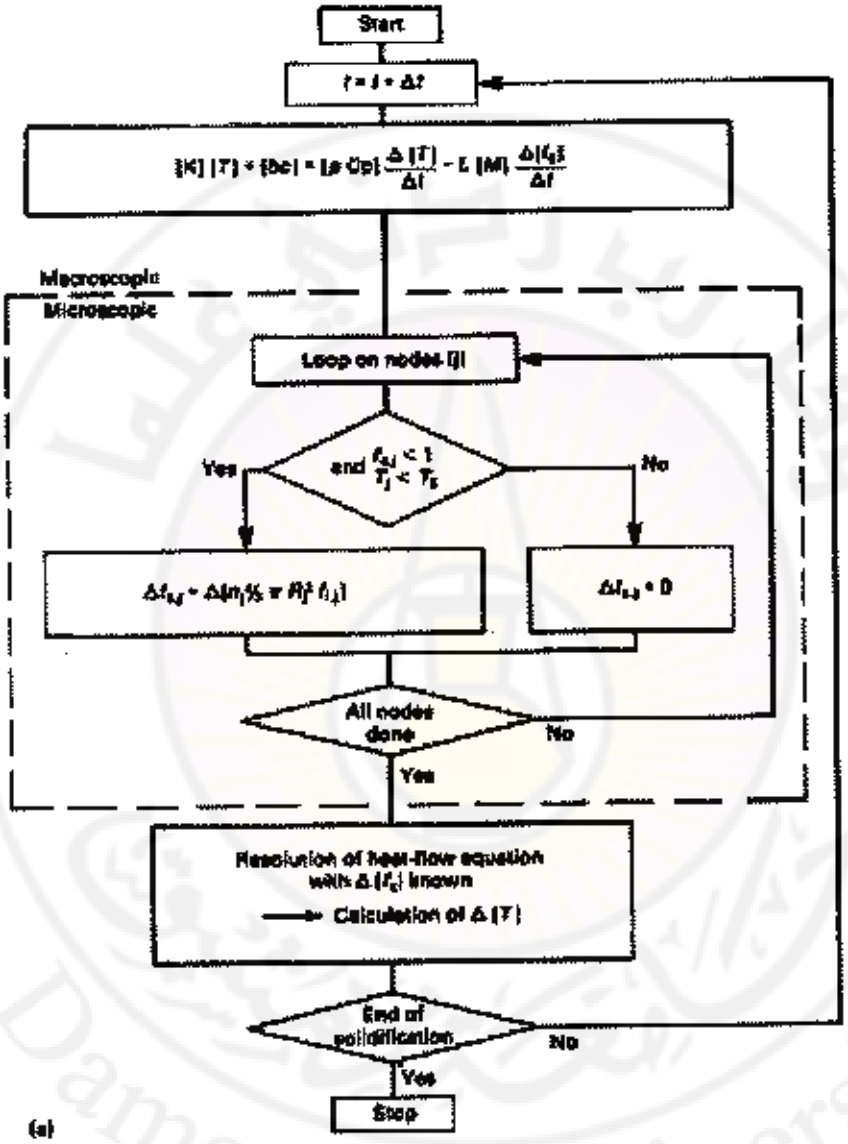
إن الجمع بين معادلة التدفق الحراري والنماذج البلورية للتجمد المتجانس محورياً يمكن أن يتم بالتوافق مع عدة خطط. ويبين الشكل (5-53) خطتين أساسيتين مدمجتين من أجل التجمد المتجانس محورياً.

إن طريقة الحرارة الكامنة المبينة بالشكل (5-53(a)) هي الأكثر وضوحاً. وبصياغة المعادلة 3 بطريقة التفاضل المنتهي أو العناصر المنتهية تحسب جميع تغيرات $\Delta\{f_s\}$ بين t و $t + \Delta t$ في جميع العقد بالتوافق مع نموذج ميكروي للتجمد. ويمكن أن يشتق التغير $\Delta\{T\}$ في الخلائط الشجرية من بشكل مباشر أو ضمني بينما يعطى التغير $\Delta\{f_s\}$ مباشرة بوساطة التبريد الزائد في كل عقدة في الزمن t.

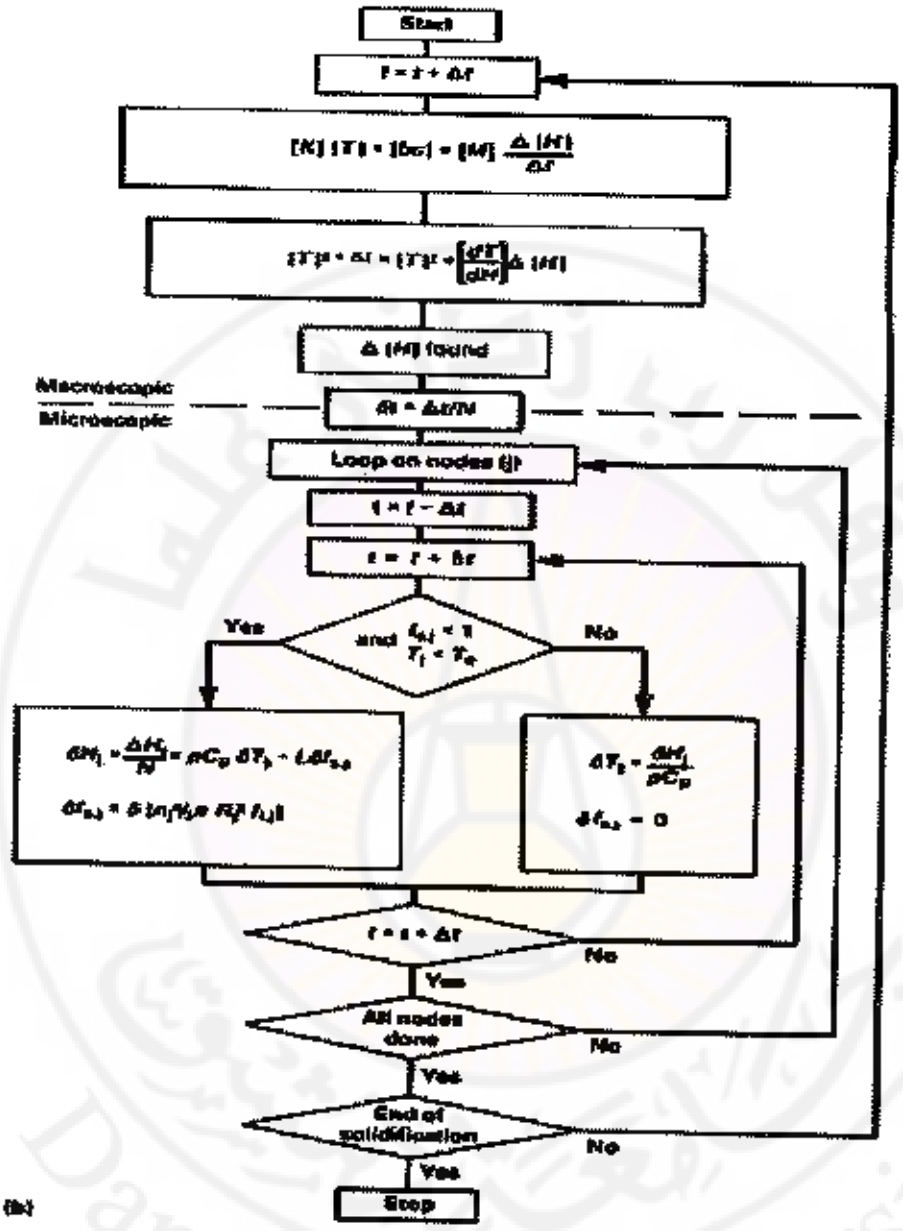
إن حد المنبع الحراري Q (المعادلة 2) في معادلة التوصيل الحراري (معادلة 3) يدمج مباشرة تدفق الحرارة الماكروي وتحركات النمر الميكروي، وتحسب الحرارة الكامنة الناشئة في منطقة التجمد. ولذلك لا تلزم معالجة خاصة لحد الحرارة الكامنة في حل المعادلة 3. مثل تلك المستخدمة في صياغة الحرارة النوعية والانتالبية لمعادلات التوصيل الحراري.

إن الانطلاق من التجمد المتوازن لعينة حديد الصب يمكن أن يرى من مخطط درجة الحرارة – الانتالبية المبين بالشكل (5-54). وإن منحنيات التبريد التجريبية والمتوقعة في وسط قالبة أسطواني لحديد الصب اليوتكتيكي المعطى نفسه بالشكل (5-55). وقد استخدم برنامجان حاسوبيان للحساب (BAMACAST, EUCAST) ومن الواضح من الشكل (5-55) أن

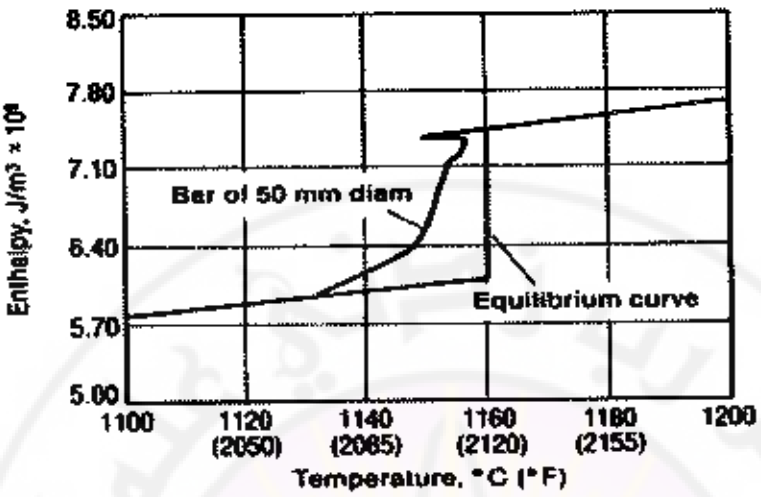
النموذج الماكروي الميكروي لليوتكتيك لا يتوقع بدقة فقط درجة التبريد الزائد ودرجة حرارة الإيقاف ولكن أيضاً زمن التجمد.



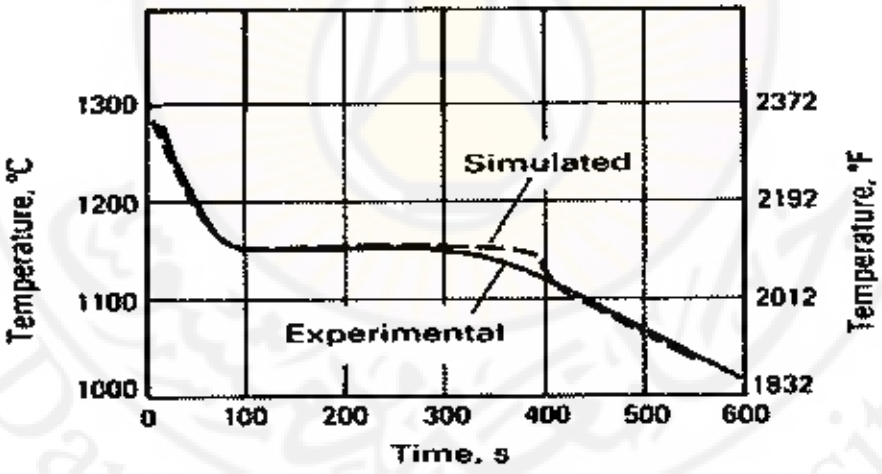
(a)



الشكل (5-53): المخططات الانسيابية للنمذجة الماكروية ـ الميكروية للتجمد اعتماداً على خطتين مختلفتين: (a) طريقة الحرارة الكامنة (b) طريقة الانتالبية الميكروية.

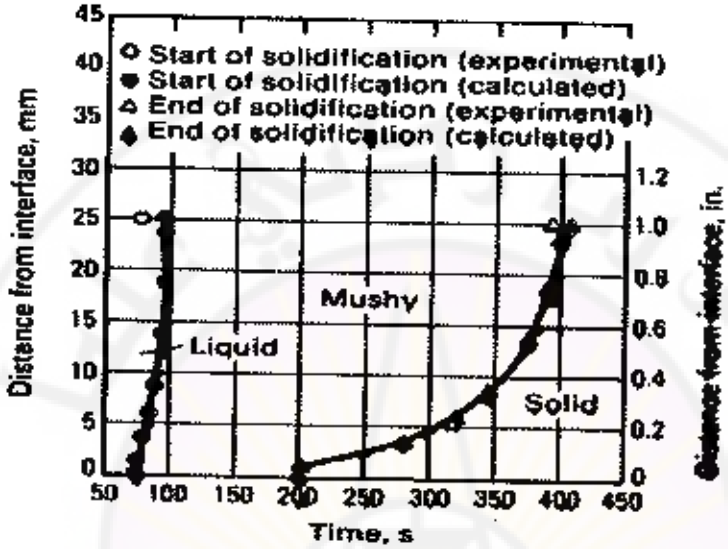


الشكل (5-54): الانتالبية المحسوبة والنظرية مقابل منحنيات درجة الحرارة لحديد الصب اليوتكتيكي.



الشكل (5-55): منحنيات التبريد التجريبية والحسابية لحديد الصب الرمادي اليوتكتيكي المسكوب في قضيب أسطواني بقطر 50mm مقولب في الرمل الممزوج بالراتنج. حيث أدخلت المزدوجات الحرارية في وسط المسبوكة.

يعطي الشكل (5-56) توقعات نظرية لعرض المنطقة العجينية لعينة حديد الصب المبينة بالشكل (5-56). وجاءت النتائج مثبتة القيم التجريبية لبداية ونهاية التجمد للمزدوجة الحرارية في مركز العينة.

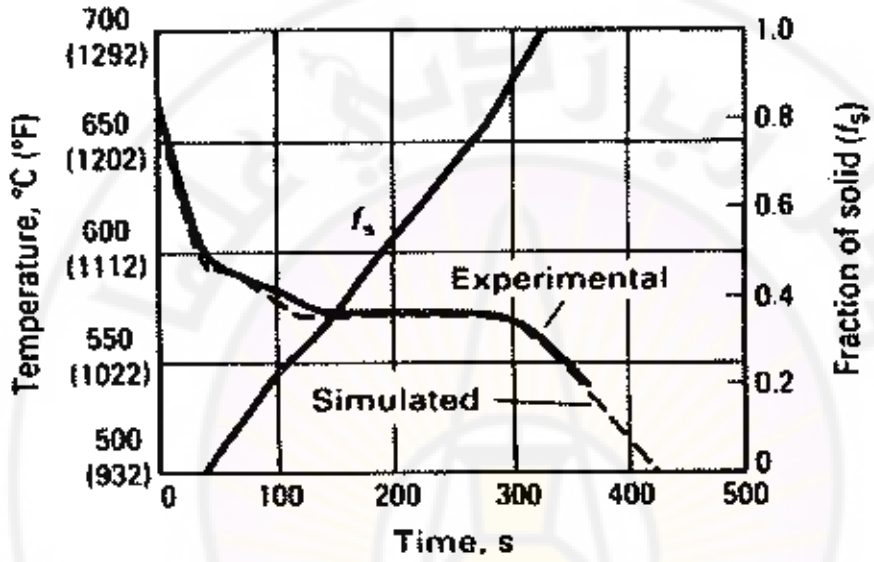


الشكل (5-56): البداية والنهاية المحسوبتين لجبهات موجات التجمد لعينة قضيبية بقطر 50mm ونقاط تجريبية لمزدوجات حرارية متوضعة في مركز العينة.

يمكن أن يطبق منهج النمذجة الميكروية الماكروية في عدة مجالات بنيوية مثلاً النمذجة الماكروية – الميكروية المستخدمة لتوقع التحولات البنيوية في حديد الصب الرمادي والأبيض. وكما ناقشنا سابقاً يمكن أن تتوسع تطبيقات هذه الطريقة لتشمل الطور الأولي. وتعطى منحنيات التبريد التجريبية والحسابية للخليطة الهيبوتكتيكية AL-8.5Si في الشكل (5-57).

لقد دمج مخطط الانتالبية الميكروية، الشكل (5-53(b)) في برنامج 3-Mos الذي يعتمد على طريقة العناصر المنتهية FEM وهو يعتمد بشكل أساسي على طريقة الانتالبية. لأن تغير الانتالبية مستقل عن مسار التجمد عندما يعرف التدفق الحراري. وعلى المستوى الماكروي يمكن حل معادلة التدفق الحراري كما أشرنا سابقاً. وعندما تعرف تغيرات الانتالبية $\Delta\{H\}$ في جميع العقد، يمكن حوسبة مسار التجمد. كما يبين الشكل (5-53(b)) الخطوات الزمنية الماكروية Δt

التي يمكن أن تقسم إلى خطوات زمنية أصغر δt لإجراء الحسابات الميكروية، وبفرض أن الانتقال الحراري يتم بمعدل ثابت أثناء Δt فإن الخطة المزدوجة الميكروية الماكروية تعطي تقارباً جيداً للقيم المحسوبة (تبريد زائد أو حجم الحبيبة) وتوضح النتائج إمكانيات دمج النمذجة الميكروية للتجمد ضمن حسابات تدفق الحرارة الماكروي باستخدام طريقة الانتالبية.

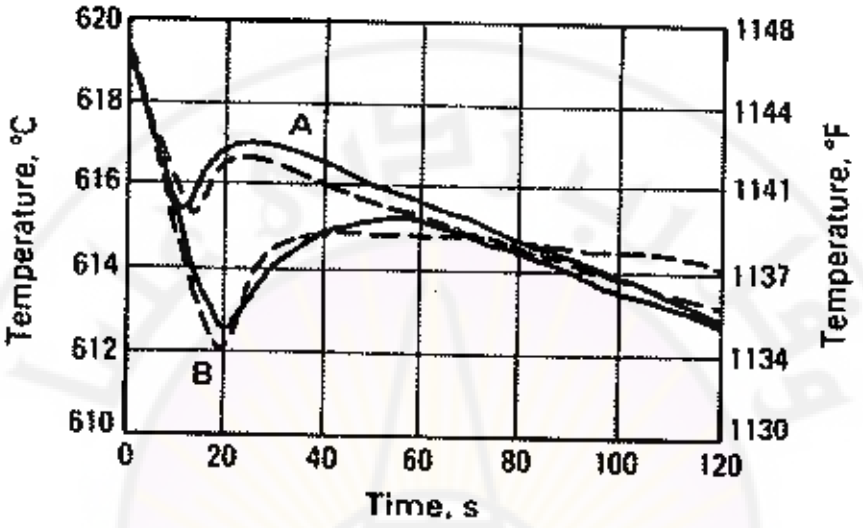


الشكل (5-57): منحنيات التبريد التجريبية والمحاكاة والجزء المحسوب من الصلب لخليطة Al-8.5Si

يبين الشكل (5–58) التركز الحراري لعينتين AL7Si حيث قيست المنحنيات المنقطة في مركز حجمين صغيرين حاويين على الخليطة. والمنحنيات المصمتة حسبت بنموذج تحليلية لانتشار المحلول واستندت إلى حجوم الحبيبات المقيسة.

إن منحنيات التبريد الستة المبينة في الشكل (5–59) قيست لمسبوكة أحادية البعد من حديد الصب الرمادي (3%C, 2.5%Si) المصبوب في قالب خزفي فوق صفيحة تبريد نحاسية. وقد أخذ بالحسبان تأثير السيلكون في ميكانيزم النمو اليوتكتيكي بتعديل درجة حرارة التوازن اليوتكتيكي بالتوافق مع نموذج Shcil لعزل السيلكون. ومع أن التوافق بين التجربة والنمذجة

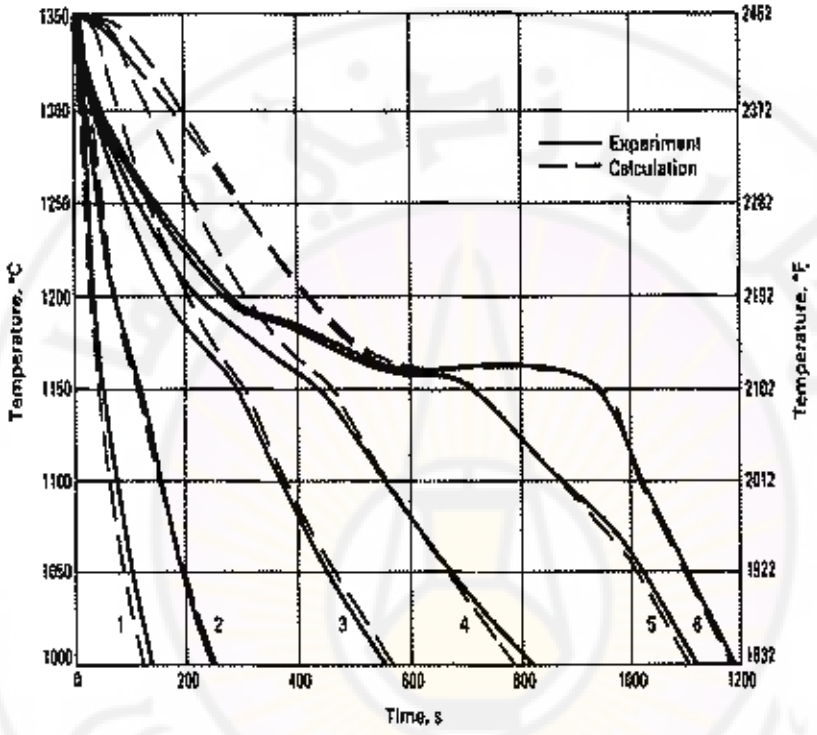
ضئيل في منطقة السائل (فوق 1160 °C) يتوقع التجمد بشكل ممتاز في النموذج الماكروي-الميكروي، وخصوصاً بوجود توافق للتبريد الزائد المحسوب ونهاية التجمد مع المنحنيات التجريبية. ولكن تجمد الطور الابتدائي قريب من 1190 °C غير متضمن في هذه النمذجة.



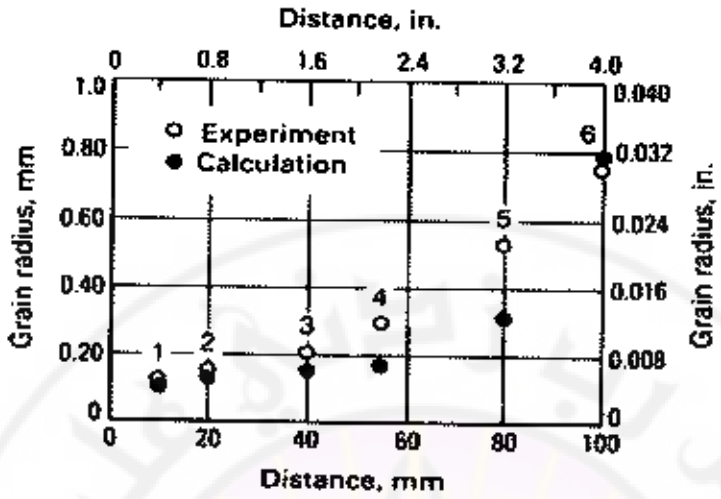
الشكل (5-58): خطوط التركز الحراري المقيسة (المنقطة) والحسابية (المصمتة) لخليطتي Al7Si الملقحة بـ 50ppm Ti (المنحني A) حيث نصف القطر النهائي للحبيبة 0.5mm وبدون لقاح (المنحني B) حيث نصف قطر الحبيبة 2mm.

إن أحد التطبيقات الأولية للنمذجة الماكروية-الميكروية للتجمد هي التنبؤ بسمات البنية البلورية. ويقارن الشكل (5-60) أنصاف أقطار الحبيبات المقيسة والمحسوبة في ستة مواقع للمزدوجات الحرارية حيث تظهر منحنيات التبريد مسجلة في الشكل (5-59) وقد رسمت أنصاف الأقطار هذه كتابع للمسافة من صفيحة التبريد. وأخذ توزع مواقع التنوية شكل منحني غاوص الذي تستنتج بارامتراته من مسبوكات صغرية لنفس الخليطة. ومع أن التناقض بين التجربة والنمذجة يمكن أن يكون ملموساً، (خاصة للمزدوجة الحرارية رقم 5) فإن النزوع نحو زيادة حجم الحبيبة مع زيادة المسافة من صفيحة التبريد (انخفاض معدلات التبريد) يمكن التنبؤ به بشكل صحيح. ويبين الشكل (5-61) رسماً تخطيطياً لأحجام الحبيبات المحسوب بالطريقة الماكروية-

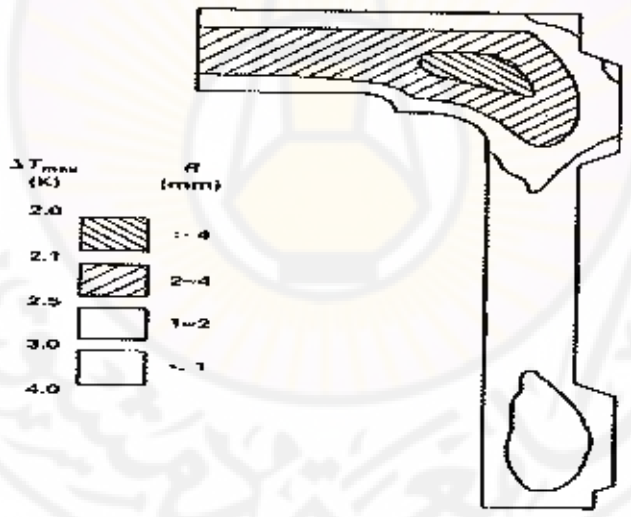
الميكروية لمسبوكة ألمنيوم Al-7Si ثنائية البعد نفسها. وكما يمكن رؤيته إن الاتجاه نحو حجم حبيبات أكبر في مركز المسبوكة يتوقع بشكل صحيح في النموذج.



الشكل (5-59): منحنيات التبريد المقاسة (الخطوط المنقطة) والحسابية (المصمتة) لحديد الصب. تشير الأرقام على المنحنيات إلى مواقع المزدوجات الحرارية في المسبوكة. ارتفاع المسبوكات: 120mm وعدد الشبكات 120، وتستنتج بارامترات التنوية من تجارب السبائك الصغرية المنفصلة وهي كالتالي: توزع غاوص حيث المركز هو التبريد الزائد 20k والانحراف المعياري 4.75K والكثافة الإجمالية للمواقع 1.2×10^{11} / m^3.



الشكل (5-60): أنصاف أقطار الحبيبات الحسابية والتجريبية في مواقع المزدوجات الحرارية المسجلة لمنحنيات تبريد حديد الصب.



الشكل (5-61): مخطط التبريد الزائد الأعظم الحسابي ΔTmax ضمن المقطع الطولاني في مسبوكة متناظرة محورياً. ولأن التبريد الزائد يمكن أن يرتبط مباشرة بمتوسط حجم الحبيبة باستخدام قانون التنوية. هذا الشكل يرسم أيضاً أنصاف الأقطار R ضمن المسبوكة.

المصطلحات العلمية

انكليزي	عربي
plastic stress	إجهاد لدن
Direct stress	إجهاد مباشر
Cryogenic equipment	أجهزة درجات الحرارة المنخفضة
Friction	احتكاك
Endurance	احتمال
Pressure tightness	إحكام الضغط
Torsion test	اختبار الالتواء (اللي)
Bending test	اختبار الانحناء
Compression test	اختبار الانضغاط
Brinell hardness test	اختبار برنل للصلادة
Corrosion test	اختبار تأكل
Impact test	اختبار تصادم
Embrittlement test	اختبار التقصف
Impact hardness test	اختبار الصلادة بالتصادم
Bending test	اختبار حناية – (اختبار الانثناء)
Creep test	اختبار زحف
Charpy impact test	اختبار شاربي للصلابة
Tensile test	اختبار شد
Fracture test	اختبار كسر
Fatigue testing	اختبار كلال
Notch bar test	اختبار القضيب المتثلم
(Deoxidation (reduction	اختزال
Stacking faults	أخطاء الترصيص
Disorder	إخلال بالنظام

Degradation	إدناء (خفض المرتبة)
Dissolution	إذابة
Partial solid solubility	إذابة جامدة جزئية
Solid solubility	إذابة في الحالة الجامدة
Relaxation	إرخاء (استرخاء)
Stress relieving	إزالة الإجهاد
Residual stress relief	إزالة الإجهادات المتخلفة (الداخلية)
Dehydration	إزالة (أو نزع) الماء
Leaching	استخلاص بالإذابة
Extraction	استخلاص (استرجاع)
Electroextraction	استخلاص بالطرق الكهربائية
Hydrometallurgy	استخلاص الفلزات باستعمال المحاليل المذيبة
Electrometallurgy	استخلاص الفلزات بالكهرباء
Electrowinning	استرجاع (ترسيب) إلكتروليتي
Elongation	استطالة
Localized recovery	استفاقة موضعية
Basal	أسفل (أساسي)
Polarization	استقطاب
Depletion	استنفاد (إفراغ)
Weapons	أسلحة
Hot dipping process	أسلوب الغمس في الفلز المنصهر
Semiconductor	أشباه الموصلات
Allotropic form synthesized ،Artificial	أشكال تأصلية
Synthesized	اصطناعي (مصطنع)
Hardening	اصطناعي
hardening –Age	إصلاد
Dispersion hardening	إصلاد بالتزمين
Alluminium brass	إصلاد بالتشتت
	النحاس الأصفر الألومينيي

Commercial brass	النحاس الأصفر التجاري
Yellow alpha brasses	النحاس الأصفر ألفا الأصفر
Cathodic copper	النحاس الكاثودي
O.F.H.C. (Oxygen Free High Conductivity Copper)	النحاس الكامل الاختزال العالي التوصيل
Copper,commercial purity	النحاس ذو النقاوة التجارية
Percent elongation (EL%)	النسبة المئوية للاستطالة
Percent reduction in area (RA%)	النسبة المئوية للتخفيض في المساحة السطحية
Hot-zone refining	النطاق الساخن للتقنية
Interantional System of Units (SI)	النظام العالمي للواحدات (النظام المتري)
British Standard Association (B.S.I.)	الهيئة البريطانية للتقييس
International Electrochemical Commission	الهيئة الدولية للكيمياء الكهربائية
Equivalent weight	الوزن المكافئ
Aluminium (Al)	ألومنيوم
Alumel	ألوميل
Alumina	ألومينا (أكسيد الألومنيوم)
Ductility crack propagation	امتداد الكسر المطيل
Miscibility	امتزاجية
Adsorption	امتزاز
Absorption	امتصاص
Absorpability	امتصاصية (قابلية الامتصاص)
Batch production	إنتاج بالدفعات
Diffusion	انتشار (تخلل)
Antimony (Sb)	أنتيمون
Antimonial	أنتيموني
Die block	أنثى القالب
Electrolytic decomposition	انحلال إلكتروليتي
Fusion	اندماج
Coalesce	اندمج

Cleavage	انشقاق
Drawability	انسحابية (قابلية السحب)
Melting (Fusion)	انصهار (صهر)
Strain	انفعال
Pastic strain	انفعال لدن
Elastic strain	انفعال مرن
Parting material	انقسام المادة
Shrinkage	انكماش (تقلص)
Drying shrinkage	انكماش ناتج عن التجفيف
Inconel	إنكونيل
Compression failure	انهيار بالانضغاط
Ingot breakdown	انهيار (كسر) السبائك
Anode	أنود
Anodizing	أنودة
Sacrificial anode	أنود تضحية
Anolyte	أنوليت
Corrosive media	أوساط متآكلة
Isothermal	إيزوثيرمي (متساوي الحرارة) – خط ثبات الحرارة
Ion	أيون
Positive ion	أيونات موجبة الشحنة
Homo	بادئة بمعنى (متجانس – متماثل – متشابه)
Parameter	بارامتر
Pascal	باسكال
Bainite	بانيت
fabricated-As	بحالة تصنيعها
Permalo	برمالوي
Proton	بروتون
Bronze	برونز

Aluminium bronze	برونز الألمنيوم
Beryllium bronze	برونز البيريليوم
Silicon bronze	برونز السيليكون
Phosphor bronze	برونز الفوسفور
Cast tin bronze	برونز القصدير المصبوب
Admiralty gun metal	برونز المدافع البحري
Commercial bronze	برونز تجاري
Leaded bronze	برونز رصاصي
Wrought tin bronze	برونز قصدير مطروق
Tin bronze	برونز قصديري
Architectural bronze	برونز معماري
Manganese bronze	برونز منجنيزي
Erosion	بري
Pretectic	بريتكتيك
Pretectoid	بريتكتويد
Lustre	بريق
(Bi)Bismuth	بزموث
(Pt)Platinium	بلاتين
(Pd)Palladium	بلديوم
Dendrite	بلورات شجرية

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

المراجع العلمية

1. **ASM Metals Handbook Vol 3.** *Alloy phase Diagrams* was published in 1991 as Volume 3 of the *ASM Handbook*. The Volume was prepared under the direction.of the ASM Handbook Committee.
2. **Engineering_metallurgy_Part 1.** Applied Physical Metallurgy, sixth edition, British library cataloguing in publication data Higgins, Raymond A. Higgins B.Sc. (Birm.), C.Eng., F.I.M, 1993.
3. **ASM Metals Handbook, Vol 15.** *Casting* was published in 1988 as Volume 15 of the 9th Edition *Metals Handbook*. With the second printing (1992), the series title was changed to *ASM Handbook*. The Volume was prepared under the direction of the ASM Handbook Committee.
4. **The new metallurgy of cast metals, CASTINGS,** second edition, John Campbell, 2003, Elsevier Science Ltd.
5. **Casting: An Analytical Approach,** Alexandre Reikher and Michael R. Barkhudarov, Computational QuantumMechanics for Materials Engineers L. Vitos Publication due August 2007
6. **Methods for phase diagram determination,** J.-C. Zhao, Latham,NY, 2007, Elsevier Ltd.

7. علم المواد (خواصها واختباراتها) – أ. د. جميل أبو جهجاه، أ. د. محمد علي سلامه، د. فؤاد ضحية – منشورات كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق. 1991.
8. الفلزات غير الحديدية وسبائكها – د. محمد عز الدهشان – جامعة الملك سعود – 1997.
9. علم المواد وهندستها – أ. د. خليل عزيمه، د. فؤاد ضحية – منشورات كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق. 2005.
10. المعادن (خواصها– اختباراتها – معالجاتها الحرارية) – د. جميل أبو جهجاه – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق. 1981.

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University