تقسـية الألمنـيوم

علي النخلاني و محمد عبد الحفيظ و إياد مدور

قسم الفيزياء ـ كلية العلوم ـ جامعة دمشق ـ سورية

تاريـخ الإيداع 2005/11/28
قبل للنشـر في 2006/07/03

الملخص

اكتسبت سبائك الألمنيوم أهمية صناعية بالغة منذ بداية القرن التاسع عشر حتى اليوم. فهي تدخل في العديد من الصناعات الخفيفة والثقيلة، ويقسى الألمنيوم بإشابته وبالمعالجات الحرارية تبعـاً للتطبيقـات الصناعية المطلوبة. حضر في هذه الدراسة سبائك من الألمنيوم – نحاس (تحـوي 0.5% مغنيـسيوم)، حيث أُضيفت كميات من النحاس إلى الألمنيوم بنسب 2.5%,4%,4.5% بحيث لا تتعـدى حـد التـشبع للألمنيوم وهي 6% نحاس بغرض تقسية الألمنيوم. وبعد إضافة نسب معينة من النحاس إلـى الألمنيـوم تُصهر العينات (الألمنيوم مع النحاس) ليمتزجا تماماً بحيث تنتشر ذرات النحاس في الألمنيوم، ويتم الصب بطرائق وشروط معينة، ومن ثم تعالج السبائك المحضرة حرارياً بالتزمين في المجال8-30 ساعة حـسب الشروط المفروضة. وعند درجات حرارة معينة مفروضة أيضاً بغرض دراسة تغير القساوة تبعـاً لنـسبة النحاس وزمن المعالجة الحرارية. درس في هذا البحث تأثير دور النحاس في تقسية الألمنيوم والعوامـل الأخرى الأساسية اللازمة للحصول على أعلى قساوة ممكنة .

الكلمات المفتاحية: تقسية، سبائك، التشبع، الانتشار، الـسبك، الـصلادة، المعالجـة الحرارية، التزمين، الترسيب.

Hardening of Aluminum

Ali Al-Nakhlani, Mohammad Abdu-lhafez and Eiad Modawwar

Department of Physics -Faculty of Sciences-Damascus University-Syria

Received 28/11/2005
Accepted 03/07/2006

ABSTRACT

Aluminum alloys have got extreme industrial importance since 19th century until now. They enter into several light and heavy industries. aluminum is hardened by impurity due to industrial application. In this study, aluminum-cupper alloys (with 0.5% Mg) were prepared, where cupper amount was added to aluminum in different percentages (2.5%,4%,4.5%) ,no overtaking degree of saturation 6% of the weight of cupper. After adding definite percentage of cupper to aluminum, the compounds are fusioned for complete blending, where cupper atoms diffuse into aluminum. Samples are infusioned by definite methods and circumstances. The prepared alloys were thermally treated during 8-30 hours for hardening. In this research we will concentrate on the influence of cupper content on hardening of aluminum and other basic conditions, which are needed to obtain higher hardness for aluminum alloys.

Key words: Hardening, Alloys, Saturation, Diffusion, Alloying, hardness, Heat Treatment, Timing, Deposition.

المقـدمـة

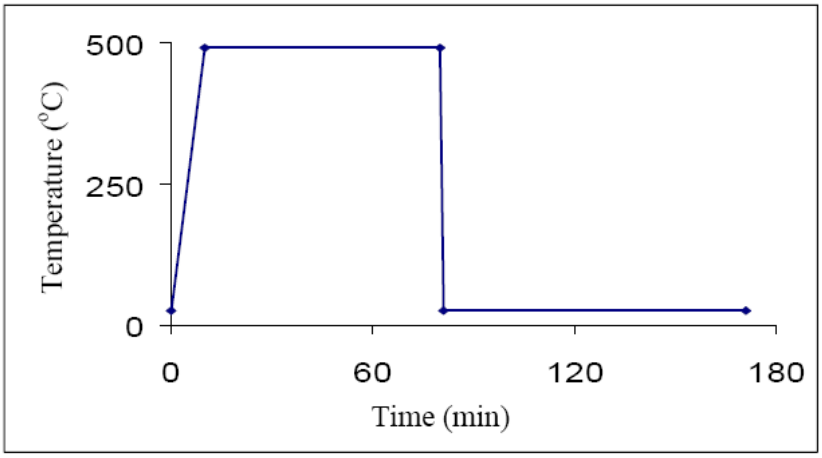
يستخدم الألمنيوم وسبائكه في الكثير من التطبيقات الصناعية نظراً لتمتعـه بخـواص فيزيائية وكيميائية جيدة. الألمنيوم في صورته الفلزية النقية طري ولين، ويتميز بقـساوة من رتبة (40) على مقياس برنل للقساوة، وتعد مقاومة الألمنيوم للشد ضعيفة، إذ لا تزيـد مقاومته للشد على($90N/mm^2$) بعد تلدينه، فلذلك يستخدم الألمنيوم على شكل سبائك في معظم التطبيقات الصناعية. ومن أهم سبائك الألمنيوم الأساسية هي: الألمنيوم- نحـاس، الألمنيوم- نحاس –مغنيسيوم، الألمنيوم- منجنيز، الألمنيوم- سيلكون، الألمنيوم- زنك.

تحضير سبائك الألمنيوم:

تحضر سبائك الألمنيوم عن طريق إعادة صـهر الألمنيـوم مـع عناصـر الـسبيكة المفترضة، بالنسب المطلوبة في فرن الصهر، ويجب التخلص من الغـازات فـي أثنـاء الصهر – وعلى الخصوص الهيدروجين –باستخدام غاز الكلور – أو بإمرار النيتـروجين خلال الفلز المنصهر؛ ثم تصب السبيكة المنصهرة بعد المعالجة في قالب الصب. وعندما تبرد القوالب يزال نحو 1 سم من سطح العينة المبردة لضمان إزالة أية شوائب أو أكاسيد قد تتكون على سطحها الخارجي وضمان نظافة السطح الخارجي، ثم يتم تلـدين المـادة بإعادة التسخين مدة تتراوح من 10 إلى 24 ساعة لضمان تجانس البنية والخـواص فـي العينة المدروسة[1].

المعالجة الحرارية

يقصد بالمعالجة الحرارية التسخين إلى درجات حرارة معينة و بوجود جـو غـازي معين وفقاً للهدف النهائي للمعالجة الحرارية، ثم التبريد بمعدل يـتحكم بـه (الـشكل 1). وتهدف المعالجة الحرارية إلى رفع المقاومة الميكانيكية للمادة وزيادة قساوتها. فالمعالجـة الحرارية تعد أهم وسيلة في معالجة السبائك لزيادة قساوتها. وتنقسم إلى نوعين أساسـيين هما: التقسية بالتزمين والتقسية بالترسيب. ويمكن أن تكون هاتان العمليتان متتابعتين.[2]



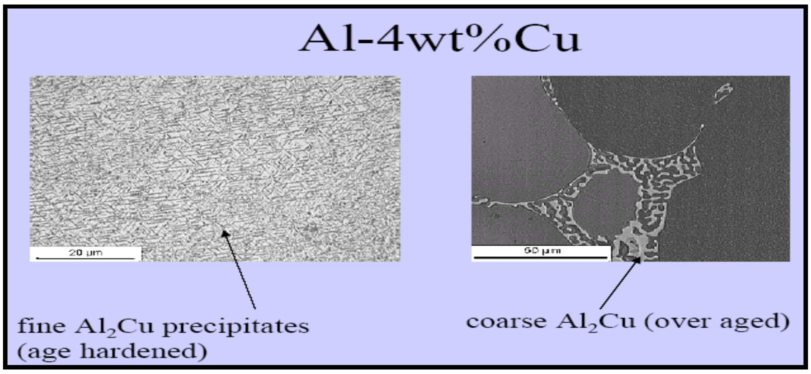
الشكل (1) المعالجة الحرارية لسبائك الألمنيوم بالتزمين(6)

المعالجة الحرارية لسبائك الألمنيوم:

يرجع تاريخ سبائك الألمنيوم- نحاس- مغنيسيوم إلى حقبة اكتشاف التقسية بالتزمين، الذي تم مصادفة على يد العالم الألماني الفريد وليم عام (1906م) لتطـوير سـبيكة مـن الألمنيوم ذات مقاومة عالية، لكي تحل محل سبائك النحاس الأصفر في صـناعة أغلفـة الطلقات النارية. وقد أدى بحثه عندئذ إلى إنتاج سبيكة الديورالومين ذات التركيـب (Al-3,5Cu-0,5Mg-0,5Mn) وقد استخدمت هذه السبيكة على طور الـسرعة فـي صـناعة المناطيد خلال الحرب العالمية الأولى. ثم استخدمت بعد ذلك في صناعة الطائرات. أمـا السبيكة ذات التركيب (Al-4,4Cu-0,5Mg-0,9Si-0,8Mn) فتستخدم حالياً في صـناعة السيارات واستخدمت إلى حين في صناعة طائرات الكونكورد (الأسرع مـن الـصوت) وهي سبيكة تقاوم الزحف مدة 50,000 ساعة عند درجة حرارة تبلغ (120درجة مئوية) وقد اشتقت هذه السبيكة من السبيكة ذات التركيب (Al-4Cu-1,5Mg-2Ni) المعروفة باسم سبيكة (Y). وفي الوقت الحاضر تستخدم سبائك الألمنيوم نحاس مغنزيوم الأقل مقاومـة كمادة لإنتاج الألواح اللازمة لصناعة السيارات، مثل السبيكة المحتوية على 2,5% نحاس و0,45% مغنزيوم، ومن المعتقد أن إضافة المغنزيوم إلـى سـبيكة الألمنيـوم- نحـاس الثنائية يحسن كثيراً من قابلية المادة للتقسية بالترسيب. وترجع زيادة المقاومة والقـساوة إلى مراحل الترسيب التي يمكن تمثيلها بالعلاقة :

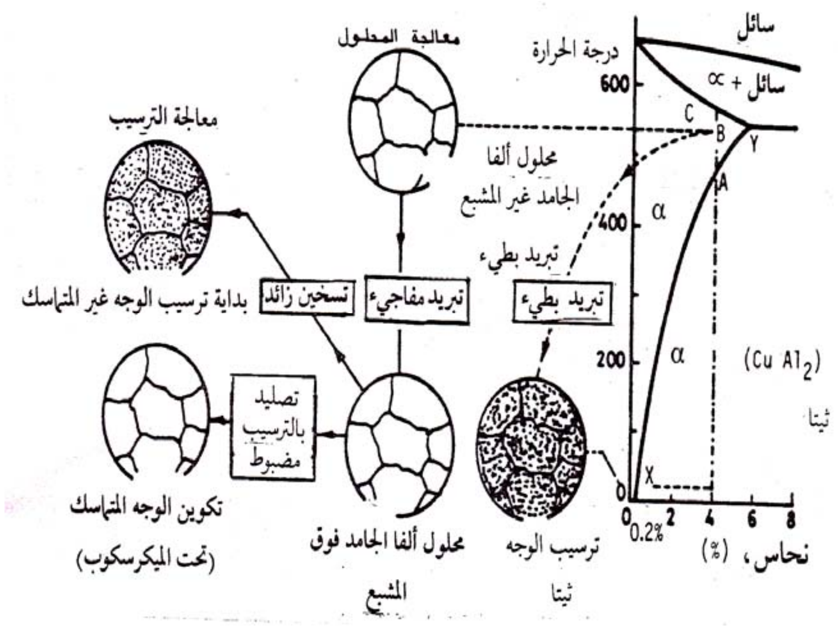
محلول جامد فوق مشبع ← مناطق (GP) ← (Al_2CuMg) ← S(Al_2CuMg)

حيث S الطور المتكون، ولكن طبيعة تكوين هذه المناطق وحجمها غيـر معـروفين، ومن المرجح أن تكون زيادة معدل تكوين الترسبات في سـبائك (AlCu) عنـد إضـافة المغنزيوم راجعة إلى زيادة معـدل الانتـشار عندئـذ. وقـد أمكـن حـديثاً باسـتخدام الميكروسكوب الالكتروني النفاذ التعرف على الطور (S) المتكون- الشكل(2)[1].



الشكل (2) صورة مجهرية لسطح العينة المعالجة حرارياً

وتتميز سبائك الألمنيوم بقابليتها لتغيير خواصها عند معالجتها حرارياً نظراً لاختلاف ذوبانية العناصر في الألمنيوم مع اختلاف درجات الحرارة وقد اكتشف ظاهرة المعالجـة الحرارية لسبائك الألمنيوم عالم الفلزات الألماني –الفريد ويلم –1906م، إذ لاحظ زيـادة قساوة سبائك الألمنيوم- نحاس عند تبريدها فجاءة من الدرجة 500 درجـة مئويـة إلـى درجة الحرارة العادية، وعرفت هذه السبائك باسم (ديورالومين)، أنتجت في عام 1910 م أول سبيكة عولجت بهذه الطريقة، وعند تسخين السبائك المبردة فجاءة مرة أخـرى إلـى درجة حرارة 180 مئوية فإن ذلك يسرع من التقسية بالتزمين إضافة إلى الوصـول إلـى مقاومة أعلى، أطلق على هذه العملية اسم التـصليد الاصـطناعي بـالتزمين (التـصليد بالترسيب). وتحدث ظاهرة التصليد بالتزمين للسبائك المختلفة عامة ولسبائك الألمنيـوم- نحاس بصفة خاصة، وما ينطبق على سبائك الألمنيوم – نحاس ينطبـق علـى الـسبائك الأخرى[1].



الشكل (3) الجزء الغني بالألمنيوم في مخطط التوازن للألمنيوم – نحاس، وفيه تظهـر البنيـة البلورية الحادثة نتيجة المعالجات الحرارية المختلفة. تبريـد بطـيء، والمعالجـة المحلولية الحرارية، ومعالجة الترسيب[1]

النموذج الرياضي للانتشار في الطور الأساسي[9] :

يتغير التبلور الأولي في عناصر مخطط التوازن للنحاس والمغنيزيوم في الطور ألفـا (α) وفقاً لتغيرات التراكيب السائلة، وهذا يسبب تدرجاً قوياً للتراكيب الـصلبة. يمكننـا القول: إنه بقدر ما تكون هذه التدرجات كبيرة ودرجة الحرارة عالية في أثنـاء التبلـور يكون الانتشار في الحالة الصلبة مميزاً وفعالاً. في هذا النموذج للانتشار يأخذ بالحـسبان فضاء وحيد البعد (1-D) للمعادلات الآتية:

$$\frac{\partial f_\alpha^{Cu}}{\partial \tau} = D_{Cu}\frac{\partial^2 f_\alpha^{Cu}}{\partial x^2} + D_{Cu-Mg}\frac{\partial^2 f_\alpha^{Mg}}{\partial x^2} ,$$

$$\frac{\partial f_\alpha^{Mg}}{\partial \tau} = D_{Mg-Cu}\frac{\partial^2 f_\alpha^{Cu}}{\partial x^2} + D_{Mg}\frac{\partial^2 f_\alpha^{Mg}}{\partial x^2} .$$

تتضمن الحدود الموجودة على يمين العبارتين ما يسمى معاملات الانتشار العرضـي D_{Mg-cu}, D_{cu-Mg} . تصف هذه الحدود تأثير تدرج التراكيب لعنصر واحد في الطور الأولي في عنصر آخر والعكس بالعكس. يمكن حل المعادلتين السابقتين عددياً من أجل شـروط أولية معرفة على الشكل الآتي :

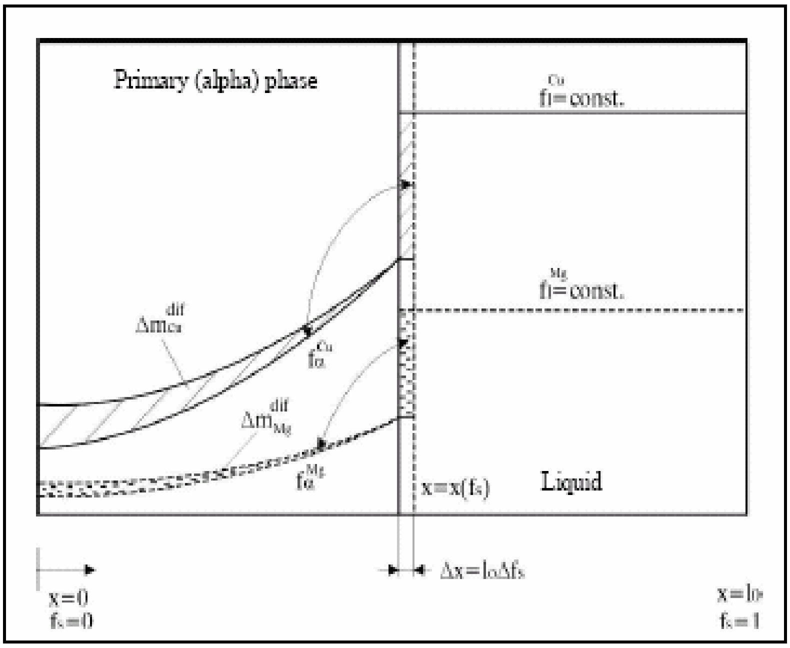
$$x = 0 : \frac{\partial f_\alpha^i}{\partial x} = 0;\ x = x(f_s) : f_\alpha^i = k_\alpha^i f_l^i;\ \ i = (Cu, Mg)$$

ويعرض الشكل (4) منحنيات التراكيب النموذجية للنحاس والمغنيزيوم خلال التبلـور الأولي، حيث ميزت المساحات التي تشير إلى الكتلة المضافة من النحاس والمغنزيوم تبعاً للانتشار من أجل خطوة واحدة، وتظهر الكتلة المضافة فقط ابتداء من الطـور الـسائل. وهكذا فإن معادلات التوازن للكتل الجديدة ينبغي أن نجد لها صيغة وفقـاً للانتـشار فـي الطور الأولي حيث الزيادة الصغيرة لمنطقة الوصل بين الصلب والسائل تعـد حاضـرة خلال كامل الوقت اللازم للتبلور الأولي، ومن ثم الصلب المضاف في الطـور الأولـي ينبغي أن يخضع للمعادلات الآتية:

$$(f_l^{Cu} - f_\alpha^{Cu}) \cdot l_0 \frac{\partial f_s}{\partial \tau} = D_{Cu} \left(\frac{\partial f_\alpha^{Cu}}{\partial x} \right)_{x=x(fs)} + D_{Cu-Mg} \left(\frac{\partial f_\alpha^{Mg}}{\partial x} \right)_{x=x(fs)},$$

$$(f_l^{Mg} - f_\alpha^{Mg}) \cdot l_0 \frac{\partial f_s}{\partial \tau} = D_{Mg-Cu} \left(\frac{\partial f_\alpha^{Cu}}{\partial x} \right)_{x=x(fs)} + D_{Mg} \left(\frac{\partial f_\alpha^{Mg}}{\partial x} \right)_{x=x(fs)}.$$

حيث l_0 تشير إلى مجال بعدي للتبلور و يأخذ عادة شكل فراغ تشعبي. وتقدر قيمتـه من أجل أغلب الحالات لخلائط Al-Cu-Mg بـ $I_0 = 50\ \mu m$.



الشكل (4) ظاهرة الانتشار المتأخر أثناء التبلور الأولي[9]

مواد البحث وطرائقه

1 ـ عينات الألمنيوم (ألمنيوم تجاري من إنتاج شركة ألمنيوم دبي مـستورد محلـي بواسطة شركة مدار للألمنيوم) اسم المنتج شركة دوبال المحدودة /Dual/ بنقـاوة قـدرها 98.82% المنيوم يحتوي على 0.5% مغنزيوم ويوضح الجـدول (1) التحليـل لعينـات الالمنيوم المستخدمة في تحضير السبائك، وعينات النحاس من النوع التجاري المـستخدم في أسلاك نقل الطاقة الكهربائية.

2-فرن لصهر العينات .

3- فرن خاص بالمعالجات الحرارية .

4-جهاز نووب لقياس القساوة.

الجدول (1) التحليل الداخلي لتركيبة العناصر في عينات الألمنيـوم المـستخدمة فـي تحـضير السبائك بواسطة المطياف ARL-2460

رمز المادة	النسبة الوزنية من المنشأ%	النسبة الوزنية عند إجراء البحث %
Si	0.45	0.456
Fe	0.17	0.167
Cu	0.01	0.001
Mn	0.01	0.002
Mg	0.50	0.542
Zn	0.01	0.0020
Ti	0.008	0.0063
Cr	0.01	0.0008
Ni	------	0.0048
Pb	------	0.0008
Al	98.83	98.82

تحضير العينات:

يظهر الجدول (2) السبائك الثلاث التي حضرت وفق آليات معينة، تحوي كل سبيكة محضرة على نسبة وزنية معينة من النحاس، حضرت ثلاث نماذج لكل نسبة لضمان تكرارية النتائج. وبهذا يكون عدد العينات التي حضرت تسع عينات. ومن ثم قصت كل عينة إلى نصفين لتصبح عدد العينات الجاهزة للمعالجة الحرارية ثماني عشرة عينة.

الجدول (2) العينات التي حضرت من خليطة ألمنيوم ـ نحاس للمعالجة الحرارية

م	رقم السبيكة المحضرة	قساوة نووب للألمنيوم قبل التحضير	وزن الألمنيوم المذاب بالجرام	وزن النحاس المضاف بالجرام	إجمالي وزن السبيكة بالجرام	النسبة المئوية للنحاس
1	1-1	69	201.340	4.350	205.690	%2.5
	2-1	69	186.737	4.787	191.524	%2.5
	3-1	69	179.490	4.601	184.091	%2.5
2	1-2	69	199.187	8.299	207.486	%4
	2-2	69	173.903	7.246	181.149	%4
	3-2	69	192.440	8.018	200.458	%4
3	1-3	69	170.616	8.039	178.655	%4.5
	2-3	69	206.700	9.739	216.439	%4.5
	3-3	69	211.330	9.957	221.287	%4.5

يوضح الجدول (3) العينات التي عولجت حرارياً، حيث توضع كل عينة بالفرن عند درجة حرارة 548 درجة مئوية مدة ساعتين ثم تبرد فجاءة بالماء البارد أو الثلج ثم تعاد

العينة إلى الفرن مباشرة بعد التبريد الفجائي عند درجة حرارة 190 درجة مئوية لفتـرة زمنية محددة في المجال 8-30 ساعة. التزمنا بهذا المسار للمعالجة الحرارية توافقاً مـع المخطط الطوري بالشكل (3) وعند هذه النسب المتغيرة الموضحة ودرجة الحرارة التـي عولجت بها خليطة النحاس والألمنيوم تنتمي للطور (α) بعد ذلك فُحصت قساوة العينات (السبائك) بجهاز نووب للقساوة.

جدول (3) شروط المعالجات الحرارية لسبائك الألمنيوم المحضرة وقساوتها

م	رقم السبيكة المحضرة	قساوة نووب للألمنيوم النقي	النسبة المئوية للنحاس	زمن المعالجة بالساعات	درجة حرارة المعالجة مئوية	قساوة نووب للسبيكة بعد المعالجة
1	1-1	69	%2.5	8	190	85
	2-1	69	%2.5	12	190	90
	3-1	69	%2.5	16	190	112
	4-1	69	%2.5	20	190	118
	5-1	69	%2.5	24	190	133
	6-1	69	%2.5	30	190	126
2	1-2	69	%4	8	190	203
	2-2	69	%4	12	190	248
	3-2	69	%4	16	190	191
	4-2	69	%4	20	190	165
	5-2	69	%4	24	190	165
	6-2	69	%4	30	190	130
3	1-3	69	%4.5	8	190	165
	2-3	69	%4.5	12	190	177
	3-3	69	%4.5	16	190	176
	4-3	69	%4.5	20	190	191
	5-3	69	%4.5	24	190	203
	6-3	69	%4.5	30	190	144

تحليل النتائج التجريبية

نلاحظ من الجدول ما يأتي:

1- ارتفاع قساوة الألمنيوم بعد سبكه ومعالجته حرارياً.

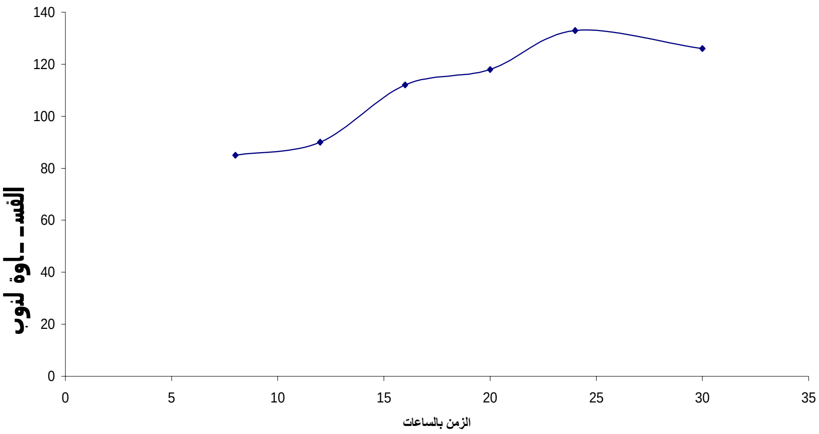
2- أعلى قساوة للسبيكة Al-%2.5Cu عند معالجتها مدة 24 ساعة.

3- أعلى قساوة للسبيكة Al-%4 Cu عند معالجتها مدة 12 ساعة.

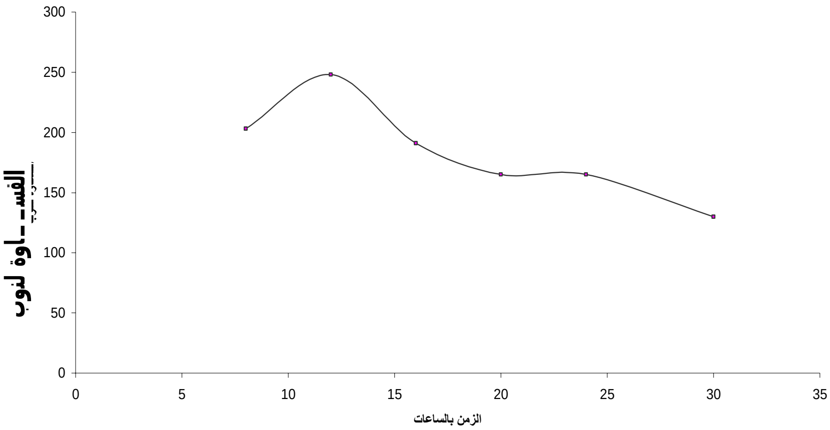
4- أعلى قساوة للسبيكة Al-%4.5 Cu عند معالجتها مدة 24 ساعة.

5- أعلى قساوة حصِل عليها كانت للسبيكة Al-%4 Cu .

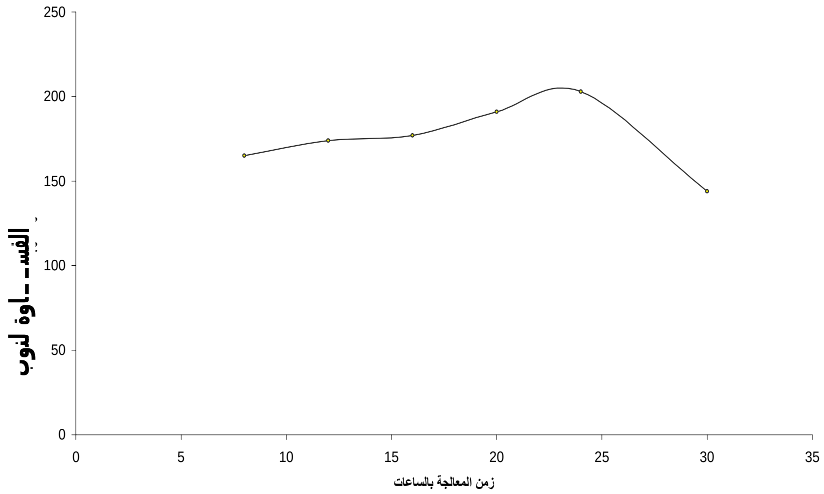
والرسوم البيانية الآتية توضح العلاقة بين القساوة وزمن المعالجة الحرارية حيث نلاحظ من الأشكال (8،7،6،5) العلاقة اللاخطية بين القساوة وزمن المعالجة الحرارية مع وجود نهايات عظمى للقساوة تختلف باختلاف نسبة النحاس في السبيكة .



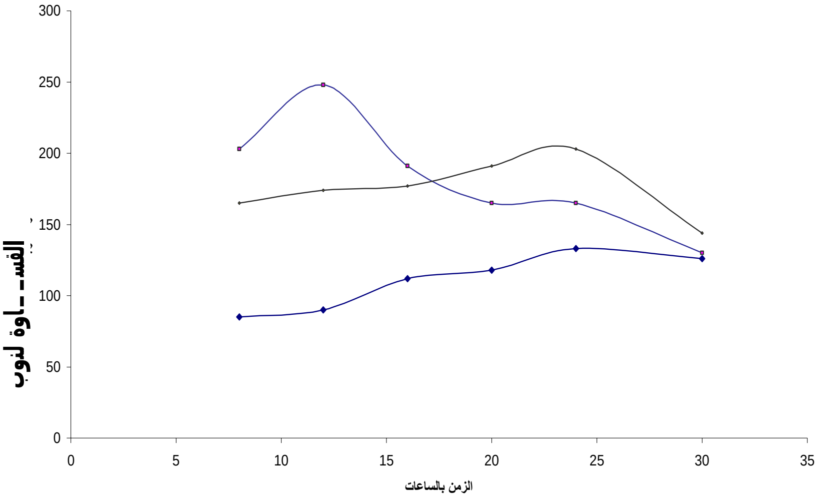
الشكل (5) العلاقة بين القساوة وزمن المعالجة للسبيكة 2.5% نحاس.



الشكل (6) العلاقة الزمن بالساعات بيكة 4% نحاس .

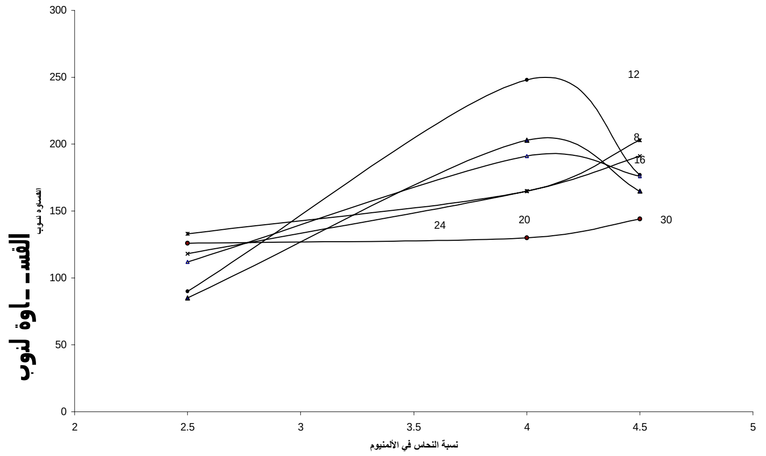


الشكل (7) العلاقة الزمن بالساعات بيكة 4.5% نحاس .



الشكل (8) العلاقة بين القس ... الزمن بالساعات ... جة الحرارية للسبيكة Al-Cu

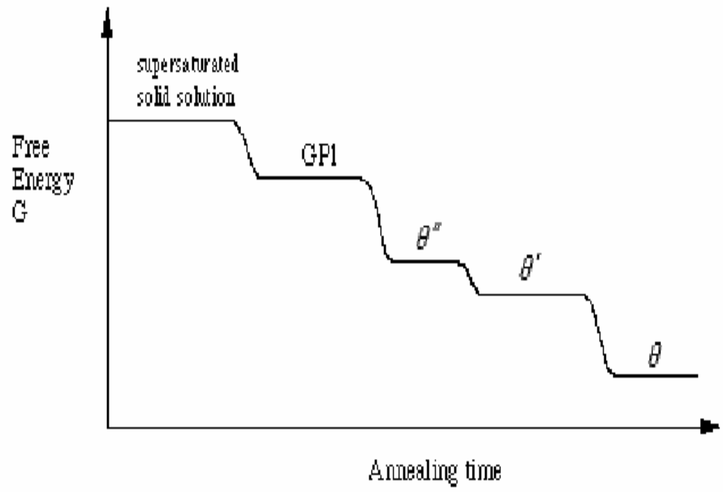
يبين الشكل (9) تغير القساوة مع تغير النسبة الوزنية للنحاس في الألمنيوم مع ثبـات درجة الحرارة وأزمنة المعالجة، تشير المراجع[8] إلى انخفاض قيمة الطاقة الحرة لأطوار سبيكة Al-Cu في أثناء عملية التلدين كما هو موضح بالشكل (10) .



الشكل (9) العلا ... الزمن بالساعات ... ي السبيكة Al-Cu

بشكل عام تكون السبيكة عند بداية التادين خليطاً غير متجانس. ومع التقدم في عمليـة التادين تبدأ بالتشكل أطوار مختلفة وسيطة بدأ من ظهور الطورGP1 حيث تكـون ذرات النحاس متوزعة بشكل غير متجانس مع الألمنيوم وبزيادة الزمن تظهر محطات أخـرى لبداية تشكل طور(θ¯¯ ، θ¯) لـ Al_2Cu حتى يتشكل الطور (θ) الذي يعبر عـن مـزيج متجانس من خليطة Al_2Cu ، ويتميز هذا الطور بأخفض قيمة ممكنة للطاقة الحرة. إذا تم تسخين السبيكة مدة قصيرة نحصل على خواص أفضل مقارنـة بـالتزمين الطبيعـي – ويعرف ذلك التزمين بالتطبيع في حين تعرف العملية ككل بمعالجة الترسـيب – ويعـود تحسين الخواص الميكانيكية إلى أن التسخين يزيد من كمية المحلول المتوسط المترسـب المتماسك (θ¯)، وذلك من خلال زيادة معدل انتشار ذرات النحاس. وإذا تم التسخين مـدة أطول يبدأ البناء التركيبي في الارتداد بسرعة إلى حالـة الاتـزان، ويبـدأ الطـور (θ¯) المتوسط التماسك في التحول إلى الطور (θ¯) – (Al_2Cu)- غير المتماسك تبعاً للمعادلة:

المحلول المتوسط المترسب المتماسك (θ¯)، ← الطور غير المتماسك (θ).



الشكل (10) تغير الطاقة الحرة مع زمن التادين لسبيكة Al-Cu[8]

وعند حدوث التفاعل تبدأ المقاومة والقساوة بالانخفاض. وتؤدي أي زيادة في درجـة الحرارة أو زمن التلدين إلى نمو حجم حبيبات الطور (θ) ويصحب ذلـك تـدهور فـي الخواص الميكانيكية، [1]

الخـاتمـة

يتضح من المخططات والنتائج التجريبية أن لكل نسبة وزنية من النحاس في الألمنيوم منحى مختلفاً للوصول إلى أفضل خصائص ميكانيكية.

تم الحصول في هذه الدراسة على نتائج تدل على ارتفاع قـساوة الألمنيـوم مـن40 إلى95 على مقياس برنل، ومن69 إلى 248 على مقياس نوب للصلادة الدقيقـة، وذلـك بإشابة الألمنيوم بالنحاس بنسبة 4% ومعالجته حرارياً بالتزمين عند درجة حـرارة 190 درجة مئوية مدة 12 ساعة. وهذه القيم العالية للقساوة تعطي إمكانية استخدام هذا النـوع من السبائك في التطبيقات الصناعية المتعددة.

المـ ــراجـ ــع REFERENCES

1- الدهشان، محمد عز. (1999). الفلزات الخفيفة وسبائكها، جامعة الملك سعود، الرياض.

2- الدهشان، محمد عز. (1999). الحديد والفولاذ: المعالجات الحرارية والسطحية، جامعة الملك سعود، الرياض.

3- الدهشان، محمد عز. (1999). الحديد والفولاذ:الاتزان الحراري والـسبك، جامعـة المـلك سـعود، الرياض.

4- الدهشان، محمد عز. (1999). الهندسة التطبيقية للمواد، جامعة الملك سعود، الرياض.

5- عزيمة، خليل. (2004). علم المواد وهندستها، جامعة دمشق، سورية.

6- Burg,T., Crosky, A. (2001). School of Material Science and Engineering University of New South Wales.

7- Huang, R. (2003). Web site. Dept of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, The University of Texas at Austin Fall.

8-Lecture7-8. (2003). Heat treatable aluminum alloys. Engineering Mechanics The University of Texas at Austin Fall.

9-Vušanović, I., Voronjec, D., Krane, M. J. M. (2001). Microsegregation phenomena in Al-Cu-Mg alloy with considering of diffusion phenomena in primary phase. Series: Mechanical Engineering Vol.1, No 8, pp. 965 – 980.University of Texas at AustinFall.