الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة العربي التبسي- تبسة
كلية العلوم الدقيقة و علوم الطبيعة والحياة
القسم: علوم المادة

مذكرة ماستر

الميدان: علوم المادة

الشعبة: فيزياء

الاختصاص: فيزياء المواد

الموضوع

تأثير النحاس والفرط في السليسيوم على خصائص سبائك Al-Mg-Si

مقدمة من طرف:

- **هماز شيماء**
- **بخوش منال**

أمام لجنة المناقشة:

زواي سهيلة	أستاذة محاضر(أ)	جامعة العربي التبسي-تبسة	رئيسة اللجنة
بلغيث هناء	أستاذة مساعد (أ)	جامعة العربي التبسي-تبسة	مؤطرة
خشبة مراد	أستاذ محاضر (ب)	جامعة العربي التبسي-تبسة	ممتحن
فرح هشام	أستاذ محاضر(أ)	جامعة العربي التبسي-تبسة	مدعو

تاريخ المناقشة: 2019/06/24

شكر وعرفان

عملا بقوله تعالى:"لئن شكرتم لأزيدنكم ..... ".
واقتداءً بسنة رسول الله عليه الصلاة والسلام
في قوله :"لا يشكر الله من لا يشكر الناس"
نحمد الله عز وجل الذي أتم علينا جزيل نعمته
وعظيم فضله في إتمام هذه المذكرة
كما نتوجه بجزيل الشكر والإمتنان
إلى الأستاذة المشرفة: بلغيث هناء، وهذا لوقوفها
ومساعدتها لنا من خلال نصائحها وتوجيهاتها
وسعة أفكارها التي مهدت لنا الطريق لإتمام هذه المذكرة.
كما نشكر كل من الأستاذة زواي سهيلة لترأسها لجنة المناقشة، والأستاذ
خشبة مراد لحضوره كممتحن في اللجنة
إلى كل الأساتذة وخاصة الأستاذ فرح هشام الذين لم يبخل علينا
بنصائحه القيمة وملاحظاته النيرة طيلة السنة
وما صاحبها من جهد لإنجاز هذا العمل المتواضع
وإلى كل الأصدقاء والزملاء
الذين ساهموا من قريب أو من بعيد
في إنجاز هذه المذكرة.

إهداء

الحمد لله الذي يسر لي أسباب النجاح في وسط كريم

وفي أحضان أسرة تجسدت فيها

معاني الفضيلة والتضحية، والأجدر بهذا الإهداء إلى من قال فيهما عز وجل:

" وأخفض لهما جناح الذل من الرحمة..."

إلى أحن قلب والشمعة التي تنير دربي

إلى الربيع الدائم أمي العزيزة، أطال الله في عمرها

إلى أبي الحنون حفظه الله

إلى أختاي وصديقتاي الحبيبتين إكرام و رفيدة

إلى زوجي العزيز وسندي في الحياة فتحي

إلى ملاكي وقرة عيني ابني رسيم

إلى جميع الأهل والأقارب والأصدقاء

إلى أستاذي الذي ساعدني كثيرا ولم يدخر جهدا في سبيل إنهاء هذا العمل فرح هشام.

إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل...

إهـــداء

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد رب العالمين الذي بتوفيقه وتسهيل منه في علاه أكملت مسيرتي العلمية وأنهيت دراسة سنوات حملت في طياتها الكثير من الصعوبات وها أنا أقطف ثمرة هذا التعب الذي أهديه أولا إلى:

إلى ملاكي في الحياة إلى معنى الحب والحنان إلى من كلله الله بالهيبة والوقار إلى..

من علمني العطاء بدون انتظار إلى من أحمل اسمه بكل افتخار، أرجو من المولى عز وجل أن يمد في عمرك لترى ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار، واعدك أن تبقى كلماتك نجوما اهتدي بها اليوم وفي الغد والى الأبد إلى والدي العزيز.

إلى من كانت سبباً في وجودي إلى مورد الحب الصادق ونبع الحنان الدافق إلى معني الحياة وسر الوجود إلى من كان دعاؤها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى أغلى الحبايب إلى أمي الحبيبة.

إلى القلوب الطاهرة والنفوس البريئة إلى من كانوا يضيؤون لي الطريق ويساندونني ويتنازلون عن حقوقهم لإرضائي إلى رياحين حياتي إخوتي الأعزاء: عبد العظيم، عبد الرزاق، المعتصم بالله.

إلى من الجأ إليه في حزني وآلامي إلى من يزرع على شفتاي الابتسامة كلما غابت إلى من تتعلق به الروح ويسكن الفؤاد زوجي.

إلى زهرتا حياتي أختاي: لويزة و يسري وزوجة أخي أريد أن أقول لكم أنني أحبكم حبا لو مر على ارض قاحلة لتفجرت منها ينابيع المحبة أدامكم الله لي فخرا.

إلى الكتكوت الصغير الذي ينير بضحكاته كل أركان البيت إلى العزيز على القلوب.

ابن أخي الغالي عبد المتين.

إلى أستاذي الذي ساعدني كثيرا و لم يدخر جهدا في سبيل إنهاء هذا العمل فرح هشام.

إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل...

بخوش منال

قَائِمَةُ المُحتَوَيَاتِ

الفهرس

قائمة المحتويات

قائمة الأشكال..... IV

قائمة الجداول..... VII

قائمة الرموز..... VI

مقدمة..... 1

I- الفصل الأول: عموميات حول الألمنيوم وسبائكه.

I- 1. مقدمة..... 2

I- 2. تاريخ الألمنيوم ووجوده في الطبيعة..... 2

I- 3. إنتاج الألمنيوم..... 3

I- 4. الخصائص الفيزيائية للألمنيوم النقي..... 4

I- 5. استخدامات الألمنيوم..... 5

I- 6. سبائك الألمنيوم..... 6

I- 1.6. تعريف السبيكة..... 6

I- 2.6. كيفية تكون السبائك..... 6

I-3.6. تعيين سبائك الألمنيوم..... 6

I- 4.6. المعالجة الحرارية لسبائك الالمنيوم..... 7

I- 1.4.6. تصنيف سبائك الألمنيوم..... 7

I - 2.4.6. أنواع المعالجات الحرارية..... 9

I- 3.4.6. سبائك Al Mg Si (السلسلة 6000)..... 10

I- 7. تأثير العناصر المضافة إلى سبائك الألمنيوم.....11

I- 1.7. تأثير السليسيوم.....11

I- 2.7. تأثير المغنيزيوم.....12

I- 3.7. تأثير النحاس.....12

I- 4.7. تأثير النيكل.....13

II- الفصل الثاني: الترسبات في سبائك Al.Mg.Si.

II-1. عموميات حول ظاهرة الترسيب.....14

II-1.1. مقدمة.....14

II-2.1. آليات الترسيب.....14

II-3.1. أنواع الترسبات.....19

II-2. تأثير الترسبات على الخواص الميكانيكية.....20

II-3. تفاصيل حول الترسبات في سبائك Al-Mg-Si.....21

II-4. الأطوار المشكلة.....22

III- الفصل الثالث: التقنيات التجريبية والأجهزة المستعملة.

III- 1. مقدمة.....28

III- 2. اختيار المادة المدروسة.....28

III- 3. المعالجة الحرارية.....29

III- 4. تحضير العينات.....30

III- 1.4. الصقل.....30

III- 2.4. التنميش الكيميائي.....30

III- 5. الطرق التجريبية.....32

III- 5. 1. المجهر الضوئي.....32

III- 2.5. اختبار الصلادة.....33

III- 1.2.5. اختبار برينل.....34

III- 2.2.5. اختبار ركوال.....34

III- 3.2.5. اختبار فيكرز.....35

III- 3.5. التحليل بواسطة حيود الأشعة السينية.....37

IV – الفصل الرابع: النتائج ومناقشتها

IV - 1. مقدمة.....39

IV - 2. الدراسة باستعمال المجهر الضوئي.....39

IV - 3. اختبار الصلادة.....41

IV - 4. التحليل بواسطة الأشعة السينية.....45

خلاصة عامة.....47

قائمة المراجع

الملحق

الملخص

قائمـــة الأشكـــال

رقم الشكل	عنوان الشكل	رقم الصفحة
الشكل I. 1	البوكسايت	03
الشكل I. 2	طريقة إنتاج الألمنيوم	04
الشكل I. 3	مخطط تصنيف السبائك	08
الشكل I. 4	جزء من بيان الاتزان للسبيكة Al–Mg_2 Si	11
الشكل I. 5	بيان الاتزان للسبيكة Al–Mg	12
الشكل I. 6	بيان الاتزان لسبيكة Al–Cu	13
الشكل II. 1	التغير في الأنتالبي الحر لتشكل نوي كروي ΔG بدلالة قطر هذا النوي	16
الشكل II. 2	رسم تخطيطي للحدود الفاصلة	18
الشكل II. 3	رسم تخطيطي لأشكال الترسبات	20
الشكل II. 4	التطور التخطيطي للصلادة والقوة الميكانيكية لسبائك التصلد البنيوي أثناء التعقيق	21
الشكل II. 5	صورة للطور " β تم الحصول عليها بواسطة المجهر الإلكتروني النافذ (MET)	23
الشكل II. 6	ترسبات الطور " β وفق نموذج Andersen	24
الشكل II. 7	ترسب الطور β' لسبيكة Al–Mg–Si	25
الشكل II. 8	ترسب الطور β لسبيكة Al–Mg–Si و شكل بنيته	26
الشكل III. 1	فرن المعالجات الحرارية نابيرثرم NABERTHERM	29
الشكل III. 2	الورق الكاشط و ماكنة الصقل الميكانيكي	31
الشكل III. 3	سطح العينة قبل الصقل	31
الشكل III. 4	سطح العينة بعد الصقل	32

الشكل III. 5	مجهر ضوئي نوع EUROMEX	33
الشكل III. 6	أداة اختبار برينل	34
الشكل III. 7	أداة اختبار ركوال	34
الشكل III. 8	أداة اختبار فيكرز	35
الشكل III. 9	اختبار فيكرز للصلادة (وضعية الاختبار وشكل الأثر).	35
الشكل III. 10	جهاز قياس الصلادة فيكرز نوع "AFFRI"	36
الشكل III. 11	حيود براج	38
الشكل III. 12	جهاز انعراج الأشعة السينية نوع EQUINOX 100	38
الشكل IV. 1	البنية المجهرية لعينات سبائك الألمنيوم المدروسة	40
الشكل IV. 2	تغير الصلادة HV بدلالة درجة الحرارة للسبيكة (1)	42
الشكل IV. 3	تغير الصلادة HV بدلالة درجة الحرارة للسبيكة (2)	43
الشكل IV. 4	تغير الصلادة HV بدلالة درجة الحرارة للسبيكة (3)	44
الشكل IV. 5	تغير الصلادة HV بدلالة درجة الحرارة للسبائك الثلاثة	45
الشكل IV. 6	أطياف حيود الأشعة السينية للسبيكتين (1) و (2)	46

قائمـــة الجـــداول

رقم الجدول	عنوان الجدول	رقم الصفحة
الجدول 1.III	التركيب الكيميائي للسبيكة المدروسة	28

قائمـــة الرمـــوز

الرمـــــز	التعـــريـــــف
ΔG_v	الطاقة الحجمية الحرة لتشكل نوي أو ترسب
ΔG_s	الطاقة الحرة للسطح
$G_{\alpha\lambda}, G_\beta$	الأنتالبي الحر والحجمي الخاص بالأطوار
r	نصف القطر
r^*	نصف القطر الحرج
γ	الطاقة السطحية
N	درجة الحيود
λ	طول الموجة
d_{hkl}	المسافة بين طبقات الذرات
θ	زاوية الورود للأشعة السينية
MET	المجهر الإلكتروني النافذ
(SSS)	محلول صلب مفرط التشبع
RX	الأشعة السينية
HV	اختبار فيكرز لقياس الصلادة

مُقَدِّمَةٌ عَامَّةٌ

يلعب الألمنيوم وسبائكه دورا هاما في الصناعة إذ يحتل المركز الثاني بعد الحديد من حيث الاستخدامات في العديد من التطبيقات. في العموم نجد أن الخصائص الميكانيكية للألمنيوم ضعيفة ولتحسين هذه الخصائص تضاف له بعض العناصر كالنحاس والسليسيوم فنتحصل على سبائك الألمنيوم. وتنقسم هذه السبائك إلى صنفين سبائك قابلة للمعالجة الحرارية وسبائك غير قابلة للمعالجة الحرارية.

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وفهـــم تأثير النحاس و الفـــرط في السليسيوم على حركية الترسبات والخصائص الميكانيكية (الصلادة) لسبائك Al–Mg–Si . ولتحقيق هذا الغرض تم استخدام عدة تقنيات تجريبية مثل: المجهر الضوئي (OM) و قياس الصلادة فايكرز Hv وحيود الأشعة السينية (XRD).

وعليه تحتوي هذه المذكرة على مقدمة عامة وأربعة فصول.

في الفصل الأول: بدأنا بتعريف الألمنيوم وسبائكه، وتطبيقاته والمعالجات الحرارية المطبقة على سبائك الألومنيوم . أما الفصل الثاني فهو يتناول عموميات حول ظاهرة الترسيب والتحولات الطورية. وقمنا بتعريف شامل لمختلف التقنيات التجريبية المستخدمة وتحديد المعالجات الحرارية المستعملة في الفصل الثالث. أما في الفصل الرابع فقد قمنا بعرض ومناقشة النتائج التجريبية المتحصل عليها. وفي الأخير نختم المذكرة بخاتمة تم قائمة المراجع فملحق وملخص.

الفصل الأول

عموميات حول الألمنيوم وسبائكه

1.I. مقدمـــة:

يتمثل الهدف من هذا الفصل في التذكير ببعض المفاهيم العامة للألمنيوم وسبائكه وكذا الخصائص الميكانيكية والمعالجات الحرارية له، بالإضافة إلى استخدامات هذه السبائك في الصناعة.

إن الألمنيوم النقي في صورته المعدنية طري ولين، يتميز بقساوة من رتبة (40) على مقياس برنل للقســـاوة، وتعد مقاومة الألـــمنيوم للشد ضعيفة، لذلك يستخدم الألمنيوم على شكل سبائك في معظم التطبيقات الصناعية [1].

ومن أهم سبائك الألمنيوم الأساسية نذكر: Al-Cu، Al-Cu-Mn، Al-Mg،Al-Si، Al-Zn، Al-Mg-Si.

2.I. تاريـــخ الألمنيـــوم ووجـــوده فـــي الطبيعـــة:

يرجع أصل التسمية إلى الكلمة اليونانية Alumen، وقد أكتشف الألمنيوم سنة 1825م من طرف العالم هانز كريستيم أورستيد وظل حتى نهاية القرن التاسع عشر شيئا غريبا و ثمينا، حيث يتواجد في الجدول الدوري ويرمز له بالرمز Al وعدده الذري 13 وهو معدن ذو لون أبيض فضي قابل للسحب وهو ثاني عنصر معدني من حيث الوفرة في الكرة الأرضية بعد السيليكون إذ يدخل في تكوين معظم أنواع الصخور و الطمي[2].

يوجد الألمنيوم في الطبيعة على عدة أشكال أهمها سيليكات الألمنيوم $Al_2(SiO_3)_3$ و البوكسايت $Al_2O_3.XH_2O$ والكريوليت Na_3AiF_6 .

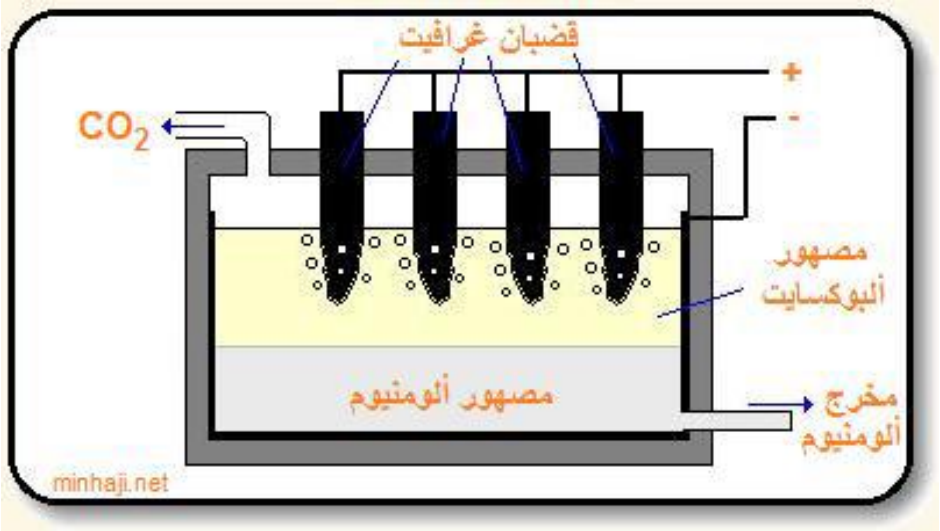
لم يبدأ استخدام الألمنيـــوم على نطاق واسع إلا بعد مطلع القرن العشرين بعد أن تبين أن سبكه مع معادن أخرى يحسن معظم الخصائص كالخصائص الميكانيكية والكهربائية.

الشكل I.1: البوكسايت[3].

I.3. إنتـــاج الألمنيـــوم:

الألمنيـــوم معدن نفيس يمكن الحصول عليه بنسبة نقاوة أكثر من 99.99% بطريقة التحليل الكهربائي.

كان إنتاج الألمنيوم في جميع أنحاء العالم (في عام1866) يتم باختزال الأكسيد بالصوديوم ونظرا لارتفاع تكاليف الصوديوم وخطورة استخدامه، كان لابد من إيجاد طريقة أقل تكلفة وأقل خطرا ففي سنة 1886م تم إنتاج الألمنيوم من خلال الطريقة التي وضعها كل من بول هيرولت وشارل هول بالتحليل الكهربائي للبوكسايت النقي في مصهورة الكريوليت عند 1000°C. حيث يستخدم وعاء من الحديد الصلب مبطن بالجرافيت كقطب سالب، بينما يكون القطب الموجب عبارة عن قضبان كبيرة من الجرافيت ويتكون الألمنيوم النقي على القطب السالب ويسحب من مخرج خاص في أسفل الإناء. كما هو موضح في الشكل I.2.



الشكل 2.I: طريقة إنتاج الألمنيوم[3].

4.I الخصائـــص الفيزيائيـــة للألمنيـــوم النقـــي:

يتبلور الألمنيوم في النظام المكعب الممركز الوجوه عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة انصهاره. من أهم خصائصه نذكر:

ـ ثابـــت الشبكـــة $0{,}405\ nm$ عند $25°C$.

ـ الكتلـــة الحجميـــة عند $25°C$ هـــي $2{,}698 g/cm^3$.

ـ درجـــة حـــرارة إنصهاره $660°C$.

ـ درجـــة حـــرارة التبخر $2270°C$.

ـ معامـــل التمـــدد المتوســـط عند درجـــة حرارة بيـــن $20°C$ إلى $300°C$ هـــو $2{,}55.10^{-5}°C^{-1}$.

ـ الناقليـــة الحراريـــة عند درجـــة حـــرارة $20°C$ $\lambda = 217{,}6 w/km$

ـ المقاومـــة الكهربائيـــة عند درجـــة حـــرارة $20°C$ $\rho = 2{,}63\ \mu\Omega cm$

ـ مقاومـــة الشـــد مـــن $65\ N/mm^2$ إلى $90\ N/mm^2$.

ـ معامـــل المرونـــة $6800\ MPa$.

5.I استخدامـــات الألمنيـــوم:

يستخدم الالمنيوم في العديد من المجالات نذكر منها:

فـــي مجـــال النقـــل:

في صناعة السيارات من أجل تخفيض وزن المركبات ومنه تخفيض استهلاك الوقود. مثلا في السبائك التي تنتمي إلى السلاسل 6009، 6010،6111، 6016 وأيضا 6061. هذه السبائك تدخل في تصنيع معظم هياكل السيارات، العجلات، أعمدة الإنارة...إلخ.

فـــي مجـــال البنـــاء والهندســـة المعماريـــة:

نجد الألمنيوم وسبائكه على شكل منتجات مدرفلة أو مكبوسة وذلك فـــي التطبيقـــات التاليـــة:

لوحات الواجهات والستائر الحائطية، الشرفات، في الهياكل والمعدات المستعملة في البناء.

فـــي مجـــال الهندســـة الكيميائيـــة:

مثل معدات التصنيع وخزانات الغاز الطبيعي السائل.

فـــي مجـــال الصناعـــات الغذائيـــة :

يحتل الألمنيوم جزء كبير في الصناعات الغذائية إذ يستعمل مثلا في تصنيع علب الحفظ وأوراق التغليف.

يستخدم أيضا في منتجات عديدة في حياتنا اليومية مثل أدوات المطبخ، الأثاث، ألعاب الأطفال وأجزاء في الطائرات والصواريخ... إلخ.

I.6. سبائـــك الالمنيـــوم.

I.6.1. تعريـــف السبيكـــة:

السبيكة هي ناتج إتحاد كلي أو جزئي بين عنصرين كيمائيين أو أكثر، بشرط أن يكون أحدهما معدن، فالمعدن هو المكوّن الأساسي للسبيكة ويمثل 90% منها، وهناك مكونات أخرى يُطلق عليها المكونات الفرعية معدنية أو لا معدنية مثل السيليكون والكربون متواجدة بكميات صغيرة جداً.

والعديد من العناصر النقية لينة جدا، أو تصدأ بسهولة، أو بها عيوب أخرى. ولكن هذه العيوب يمكن التغلب عليها بمزج هذه المعادن بعناصر أخرى. وقد تحتوي السبيكة الواحدة على ثلاث أو أربع مواد مختلفة، أو أكثر.

I.6.2. كيفيـــة تكـــون السبائـــك:

بما أن السبيكة عبارة عن خليط من المعادن. وأغلب المعادن تكون في حالة صلبة، كيف يمكن خلطها لتكوين السبيكة؟

في هذه الحالة، الطريقة التقليدية لصناعة السبيكة هي تسخين وإذابة المكونات للحصول على كل سائل على حدى، ثم خلطها معاً بصورة متجانسة وتركها لتبرد تماماً فيما يطلق عليه محلول صلب.

وهناك طريقة بديلة، هي تحويل جميع المكونات إلى مسحوق، وخلطها مع بعض جيداً ومن ثم تعريضها إلى ضغط مرتفع وحرارة مرتفعة حتى تمام التجانس. ويُطلق على هذه الطريقة المسحوق.

الطريقة الثالثة هي غرس الأيونات، وهي طريقة دقيقة جداً في تصنيع السبائك. يمكن استخدامها في تصنيع أنصاف النواقل.

I.6.3. تعييـــن سبائـــك الألمنيـــوم:

استنادا إلى الرابطة الأمريكية للألمنيوم (USA-Washington DC)، يتم تعيين سبائك الألمنيوم باستخدام نظام مكون من أربعة أرقام[4]:

الرقم الأول من 1 إلى 8 يشير إلى عائلة السبائك، يتم تحديده بواسطة العنصر الرئيسي للسبيكة.

- 1xxx: 99,00% Al .
- 2xxx Cu: لسبائـــك Al–Cu–Mg الفئة Al–Cu.
- 3xxx Mn : لسبائـــك Al–Mn.
- 4xxx Si: لسبائـــك Al–Si.
- 5xxx Mg: لسبائـــك Al–Mg.
- 6xxx Mg+Si: لسبائـــك Al–Mg–Si.
- 7xxx Zn: لسبائـــك Al–Zn–Mg الفئة Al–Zn–Mg–Cu.
- 8xxx: مختلـــف السبائـــك الأخـــرى.

الرقم الثاني من اليسار: يعين درجة ضبط الشوائب بالنسبة للسلسلة 1xxx أو التغير في تركيب السبيكة الأساسي بالنسبة للسلاسل الأخرى، فالرقم صفر يعني التركيب الأساسي دون تعديل، ثم يرمز للتعديلات المدخلة بالأرقام من واحد إلى تسعة.

أخر رقمين هما رقمي الترتيب ويتـــم استخدامهما لتحديد السبائك. الاستثناء الوحيد هو السلسلة 1000 حيث يـــشير هذين الرقمين إلى النسبة المئوية للألمنيوم.

4.6.I. المعالجـــات الحراريـــة لسبائـــك الألمنيـــوم:

يقصد بالمعالجات الحرارية التسخين إلى درجة حرارة معينة، ثم التبريد بمعدل يتم التحكم به، تهدف هذه المعالجات إلى رفع المقاومة الميكانيكية للمادة وزيادة قساوتها.

1.4.6.I.تصنيـــف سبائـــك الألمنيـــوم:

تنقسم سبائك الألمنيوم إلى قسمين رئيسين: سبائك قابلة للمعالجات الحرارية وسبائك غير قابلة للمعالجات الحرارية.

السبائـــك القابلـــة للمعالجـــة الحراريـــة:

يتم تحسين الخصائص الميكانيكية لهذا النوع من السبائك بإجراء معالجة حرارية تحتوي على ثلاثة مراحل:

التسخين، التبريد، ثم التعقيق.

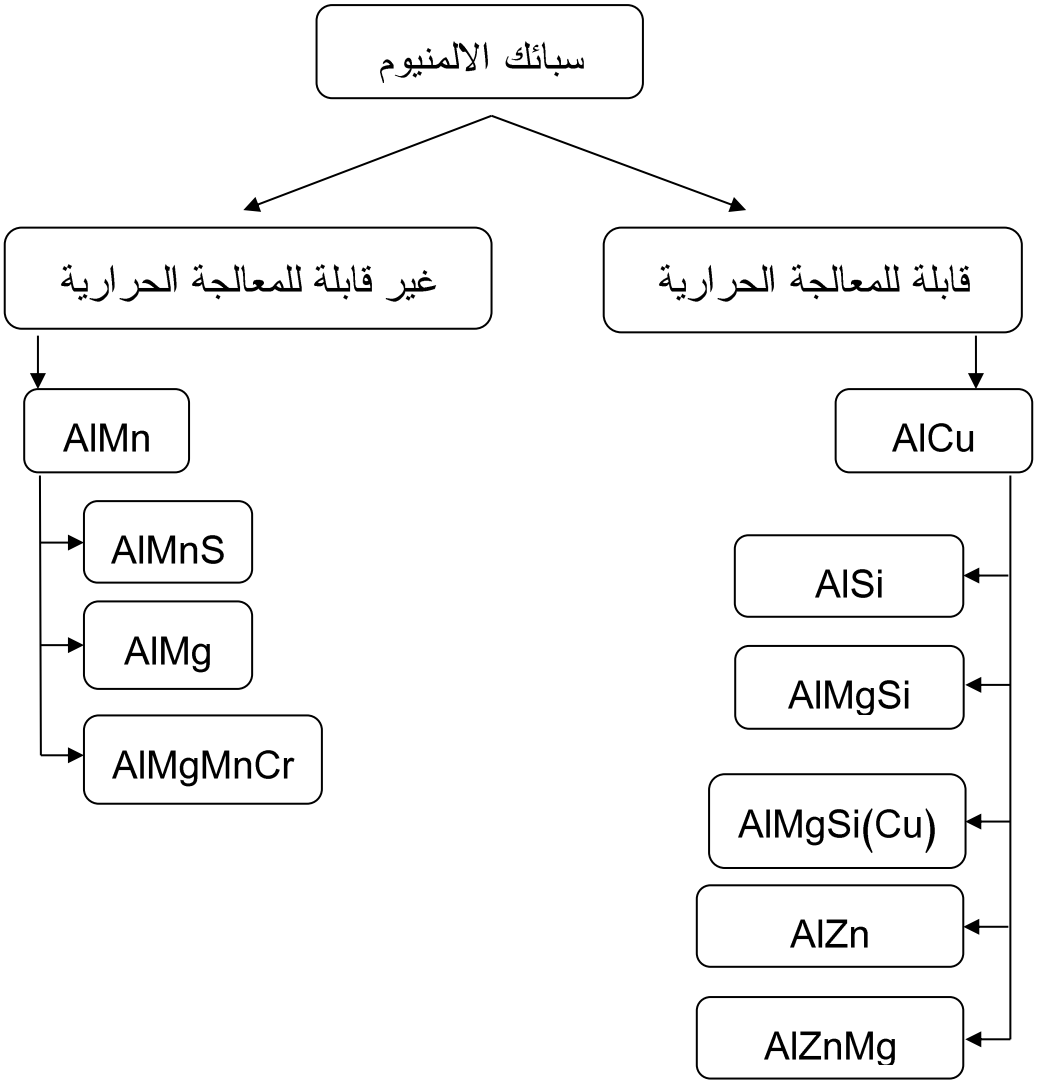
من أهم هذه السبائك نذكر السلاسل 2000،6000،7000.

السبائـــك غيـــر القابلـــة للمعالجـــة الحراريـــة:

تستعمل عدة تقنيات لتحسين خصائص هذا النوع من السبائك نذكر منها:

التقسية بالتشوه اللدن، السحب، الثني، الدرفلة.

من أهم هذه السبائك نذكر السلاسل: 1000، 3000، 5000.



الشكل I.3: مخطط تصنيف السبائك

I.2.4.6.أنــواع المعالجــات الحراريــة:

1-التلديــن:

يتم تلدين السبائك المصلدة بفعل عمليات التشكيل أو بفعل عمليات التبريد السريع مثل معالجات إعادة البلورة (الترميم) المستعملة في حالة تعرض المعدن للتشوه عند تشكيله.

عملية التلدين هي عبارة عن تسخين السبائك خاصة تلك التي تحتوي على ترسبات، مدة زمنية طويلة تحت درجات حرارة مرتفعة.

2-التصلــد البنيــوي:

هذا النوع من المعالجات الحرارية يحتوي على ثلاثة مراحل:

- المعالجة الحرارية للمعدن تحت درجات حرارة مرتفعة نسبيا.
- القيام بعملية السقاية أو التبريد السريع لهذا المعدن الذي يمنع أي انتشار من أجل الحفاظ على الحالة البنيوية المتحصل عليها من عملية التجانس.
- ثم عملية التعقيق وله نوعين تعقيق طبيعي وتعقيق اصطناعي والهدف منهما تسهيل العودة جزئيا إلى شروط التوازن.

- **التعقيــق الطبيعــي:**

السبائك المعالجة حراريا تتغير خصائصها الميكانيكية عند تواجدها في درجة حرارة الغرفة لمدة تتعدى بضع أيام وقد تصل إلى بضع سنوات وهذا ما يعرف بالتعقيق الطبيعي.

بعض سبائك الألمنيوم للسلسلة 6000 تصل صلادتها إلى قيمة عظمى بعد شهر من تعقيقها، التعقيق الطبيعي هدفه الرئيسي هو الرفع من الصلادة.

- **التعقيــق الإصطناعــي:**

يتمثل في التسخين إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الغرفة خلال مدة زمنية حسب الغرض المطلوب.

في حالة سبائك الألمنيوم Al–Mg–Si تتغير درجة حرارة التعقيق الاصطناعي ما بين 100°C إلى 240°C.

3- معالجـــات التجانـــس:

الهدف منها هو الحفاظ على المواد لفترة طويلة في درجة حرارة عالية نسبيا، كما يمكنها تقليل الترسبات المتحصل عليها أثناء عملية الترسيب.

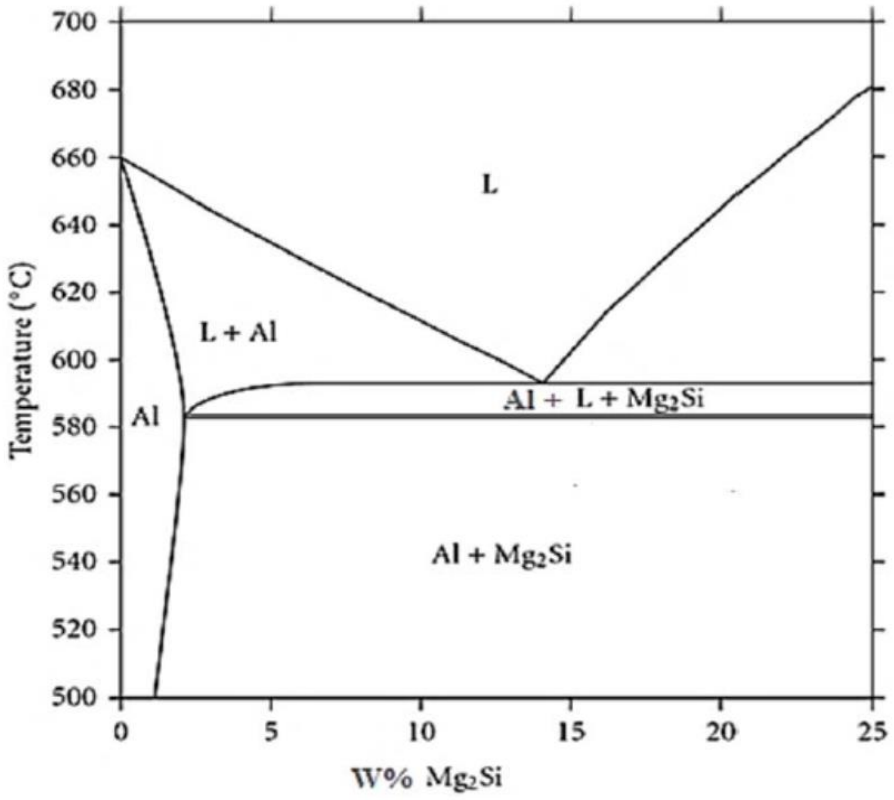
وتعتمد المعالجات الحرارية بالتجانس على درجة حرارة مرتفعة نسبيا، حيث تتراوح درجة حرارة التجانس في معظم الأحيان من 450°C إلى 500°C [5].

3.4.6.I. سبـــائـــك Al–Mg–Si (السلسلة 6000):

سبائك Al–Mg–Si هي سبائك محاليل صلبة من النوع $Al–Mg_2Si$ [6]، السلسلة 6000 التي تنتمي إلـــى فئـــة سبائـــك التصلـــد البنيـــوي والتـــي تكتسب صلادتها اعتمادا على تشكل مختلف الأطوار المترسبة وتكون هذه الأطوار مستقرة مثـــل الطـــور ($\beta(Mg_2Si)$ أو غير مستقرة مثـــل الطـــور"β.

- ❖ مجموعـــة مركباتها غنيـــة بالمغنيزيوم والسليسيوم مثـــل السبائـــك 6061 و6082 المستخدمـــة فـــي تطبيقـــات الهيكلـــة (الإطارات...).
- ❖ فئة أخرى تحتوي على نسبة ضعيفة من السليسيوم مما ينتج عنها خصائص ميكانيكية ضعيفة مثلا السلسة 6060 رغم توفر سرعات عالية للغزل لكن تبقى الخصائص الميكانيكية ضعيفة [7].
- ❖ سبائك السلسلة 6000 لها أهمية كبيرة في مجال الصناعة، تستخدم أساســـا كتشكيلات هيكلية (الألواح الجانبية للشاحنات، لافتات الطريق...).

وتستخدم أيضا في تصنيع أسلاك خطوط النقل والتوزيع الكهربائي [8].



الشكل4.I : جزء من بيان الاتزان للسبيكة$Al–Mg_2 Si$ [9]

7.I.تأثيـــر العناصـــر المضـــافـــة إلى سبـــائـــك الألـــمنيـــوم:

نظرا إلى أن الألمنيوم النقي يمتلك خصائص ميكانيكية ضعيفة تعتبر غير كافية لاستخدامه في مختلف المجالات الصناعية. تتم إضافة عناصر مثل النحاس والمغنيزيوم وغيرهما لتحسين هذه الخصائص.

1.7.I.تأثيـــر السليسيـــوم:

التأثير الملحوظ للسليسيوم في سبائك الألمنيوم هو تحسين خصائص التشكيل، مقاومة التكسير على الساخن، حيث تعتبر السبيكة Al–Si الأكثر استخداما في سبائك الألمنيوم [10].

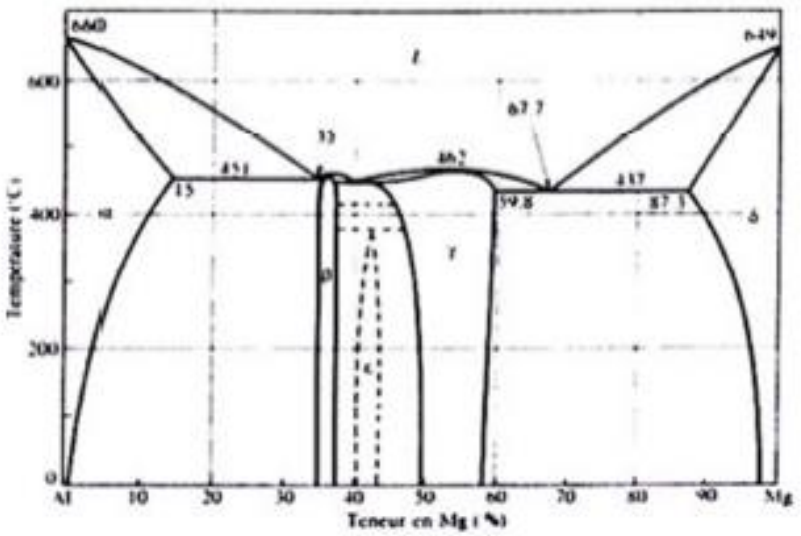
I.2.7.تأثيـــر المغنيزيـــوم:

تستخدم سبائك Al–Mg على نطاق واسع في التطبيقات التي تتطلب مقاومة جيدة ضد التآكل. نسبة المغنيزيوم في هذه الأخيرة تتغير بين 4إلى 10%.

يصنف المغنيزيوم كمعدن خفيف، وعند إضافته إلى سبيكة الألمنيوم بنسبة من 0.1إلى 4.4%. يحسن من عملية الإلتحام [11،12،13].

الزيادة في تركيز المغنيزيوم تؤدي إلى الزيادة في القوة الميكانيكية وانخفاض في الليونة.

يظهر ذلك في بيان الاتزان لسبيكة الألمنيوم مغنيزيوم Al–Mg[12،13].



الشكل I.5: بيان الاتزان للسبيكة Al–Mg[13]

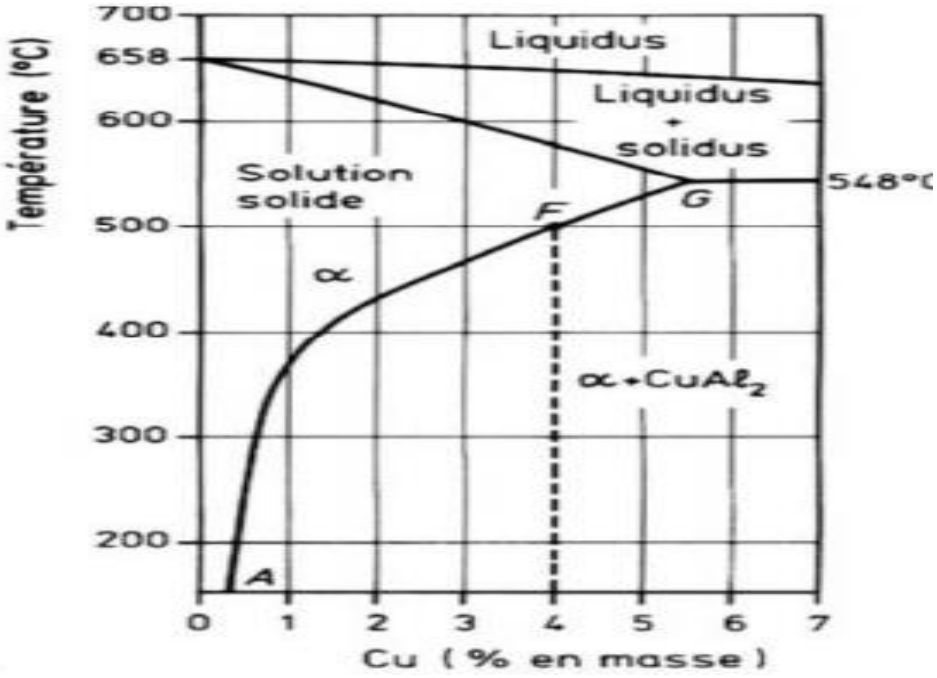
I.3.7.تأثيـــر النحـــاس:

النحاس يحسن إلى حد كبير مقاومة و صلادة السبائك عندما تخضع لعمليتي التشكيـــل والمعالجـــة الحراريـــة.

السبائك التي تحتوي على 4 إلى 6% من النحاس هي التي تستجيب للمعالجات الحرارية. إضافة Cu في الغالب تقلل من مقاومة التأكل ومقاومة التكسير على الساخن والليونة.

سبائك الألمنيوم الأكثر استخداما هي التي تحتوي على 4 إلى 10% من النحاس.

يظهر ذلك في بيان الاتزان لسبيكة الألمنيوم نحاس Al–Cu[12].



الشكل I.6: بيان الاتزان لسبيكة Al–Cu[14].

I.4.7.تأثيـــر النيكـــل:

يستخدم النيكل في العادة مع النحاس لتحسين الخصائص الميكانيكية في درجات الحرارة المرتفعة، يقلل هذا الأخير من معامل التمدد الحراري لسبائك الألمنيوم[10].

الفصل الثانى

الترسبات في سبائك

Al _ Mg _ Si

II .1.عموميـــات حـــول ظاهـــرة الترسيـــب :

II 1.1 مقدمـــة :

هناك عدة عوامل تتحكم في حركية ترسيب محلول صلب مفرط التشبع، نستطيع ذكر منها على وجه الخصوص نوع التحول، ووجود عيوب الشبكة مع توزيعها في السبائك. وقد اهتم الباحثون عند دراسة الترسبات بتعديل الخصائص الميكانيكية للسبائك في منطقة وجودها (أي التشوهات). هذه التغيرات تتمثل عموما في الزيادة في حد المرونة، والصلادة، هذه الأخيرة تتطور مع درجة الحرارة والأطوار البنيوية للمادة.

يمكن وصف ظاهرة الترسيب من خلال 3 آليات: التنوي والنمو والالتحام.

II.2.1.آليـــات الترسيـــب:

أ/التنـــوي:

يعرف التنوي على أنه زيادة في عدد الترسبات خلال المحلول الصلب مفرط التشبع. الترسبات الموجودة تبدأ في الزيادة حيث يزداد نصف قطر الجسيمات المشكلة بينما يبقى عدد الرواسب ثابتا ويقترب التشبع من الصفر، و يسمح هذا بالتطور لأن مساحة الرواسب تقل. عندما يصبح حد التنوي عالياً، يتوقف هذا الأخير.

التنوي خلال عملية التجميد هو عبارة عن تكون بلورة صغيرة الحجم (نوي) في الطور السائل بحيث يمكنه النمو ولقد تم تقسيمه إلى نوعين التنوي المتجانس وغير المتجانس.

- **التنـــوي المتجانـــس:**

نعتبر أن الطورα طور متجانس، يسخن إلى درجة حرارة T فيصبح غير مستقرا ويبدأ في التحول إلى الطور الجديد β، بفرض أنه تكون نوي كروي نصف قطره r، فالتفاعل الفيزيوكميائي عند درجة حرارة T تختلف عن درجة حرارة اتزان الطورين $T \neq Teq$ هو:

$$\alpha \rightarrow \beta$$
(Liq ⟶ Sol مثل)

يعبر عن تغير الطاقة الحرة للمحلول بالعلاقة التالية:

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta G_v 4\pi^2\gamma \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1 \cdot \text{II})$$

حيث:

$\Delta G_v = G_\beta - G_\alpha$ هو تغير الطاقة الحرة الحجمية الخاصة بالتحول أي أنه يرتبط بتكوين الطور الجديد β الناشئ عن الطور الأم α وهو مقدار سالب.

γ: هي الطاقة السطحية البينية.

ليتحقق التفاعل من أجل $T_{eq} \succ T$ تكون $\Delta G_v \prec 0$، بينما يكون المقدار $4\pi r^2\gamma$ دوما موجب:

الشكل (2. II) يمثل منحنى تغير ΔG بدلالة r و يظهر على هذا المنحنى دورة عظمى عند r* توافق (ΔG^*) وعندما:

r* > r: يكون ظهور النوي β مرفقا بارتفاع في الطاقة الحرة وبالتالي فإن النوي يزول.

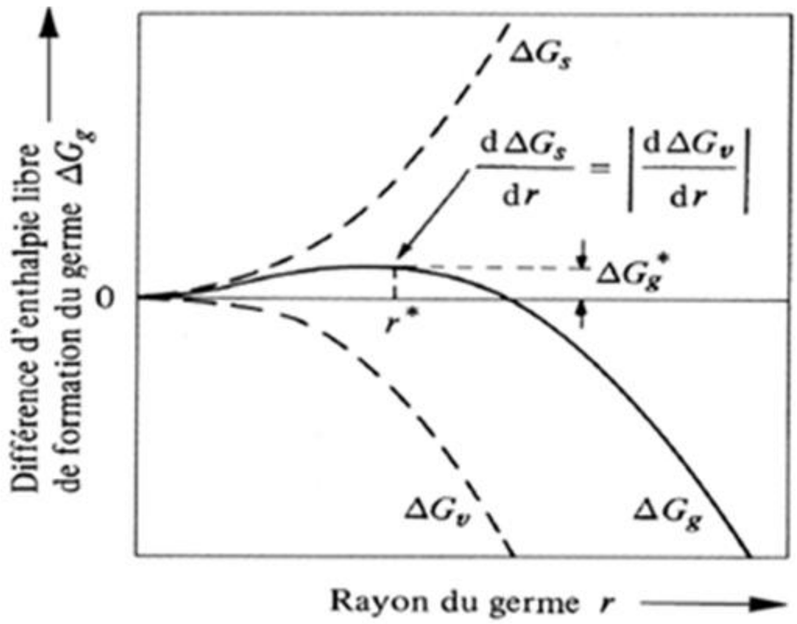
r* < r: يكون ظهور النوي β مرفقا بانخفاض في الطاقة الحرة وبالتالي فإن النوي يبقى مستقرا.

إن مصدر الطاقة اللازمة لتكوين آني للنوي هو مصدر حراري ويمكن تقديره عندما:

$$\partial\Delta G \,/\, \partial r = 0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2 \cdot \text{II})$$
$$r = r^*$$

$$\Delta G^* = \frac{16r^3\gamma}{3(\Delta G)^2 v} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3 \cdot \text{II})$$

$$r^* = \frac{-2\gamma}{\Delta G_v} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4 \cdot \text{II})$$



الشكل 1.II : التغير في الأنتالبي الحر لتشكل نوي كروي ΔG بدلالة نصف قطر هذا النوي[16].

- **التنـــوي الغيـــر متجانـــس:**

يظهر التنوي الغير متجانس عند تجميد المواد المنصهرة حيث يوفر الوعاء الذي يحتوي على سوائل المواد المنصهرة سطحا محفزا لتجميد المواد.

تتكون المناطق المفضلة للتنوي غير المتجانس من كل المناطق التي فقدت استمرارية ترتيبها البلوري حيث تكون طاقتها السطحية منخفضة، ومهما يكن موقع التنوي فلابد من انخفاض درجة الحرارة لتحقيق التنوي الغير متجانس أي يكون ΔT أقل منه في حالة التنوي المتجانس. وهذا راجع للدور الذي تلعبه جزيئات سطح الوعاء الذي يحتوي على المادة المنصهرة في تسريع عملية التنوي.

يعبر عن الطاقة السطحية في أبسط حالات التجميد $L \rightarrow \alpha$ بالعلاقة النظرية التالية:

$$\gamma_{sl} = \gamma_{sg} + \cos\theta \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5 \cdot \mathrm{II})$$

γ_{sl}: الطاقة السطحية بين السطح المحفز (s) والسائل (L).

γ_{sg}: الطاقة السطحية بين السطح النوي المتجمد (α) والسطح المحفز.

γ: الطاقة السطحية بين سطح النوي والسائل.

θ: زاوية الإلتحام بين مماس سطح النوي ومماس السطح المحفز.

تعطى الطاقة الحرة للحاجز الطاقوي بالعلاقة:

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3 f(\theta)}{3(\Delta Gv)^2} \quad (6 \cdot II)$$

$$f(\theta) = (2 + \csc\theta)\frac{(1-\csc\theta)^2}{4} \quad (7 \cdot II)$$

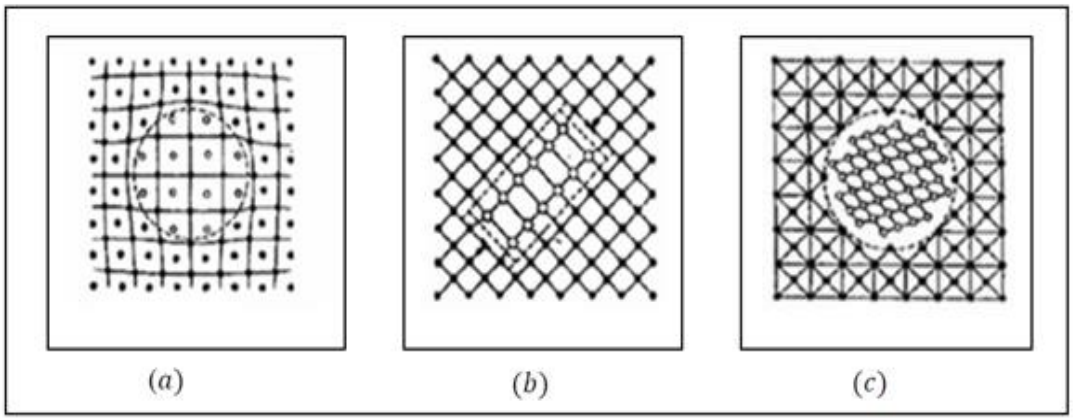
ب) النمــو :

يمثل النمو سرعة التحول بواسطة الانتشار (أي يتم تحريضه حراريا)، يكون النمو في الحد الفاصل بين الطور الأم والطور المتشكل ويتحدد هذا الأخير بواسطة عامليين أساسيين:

- سرعة انتقال الذرات نحو السطح البيني الفاصل بين الطور الأم والطور الجديد.
- قدرة الذرات القادمة على اجتياز السطح الفاصل بين الطور الأم والطور الجديد.

قد يكون أحدهما أسرع من الآخر وذلك حسب مرحلة النمو، فمثلا في حالة ترسيب طور ثاني يكون عدد الذرات التي تشكل البلورة النامية في بداية النمو قليلا ومسافة الانتشار صغيرة وبالتالي يكون اجتياز السطح البيني بطيئا جدا، بينما عندما يكون النمو متقدما فإنه يحدث العكس وتسيطر ظاهرة الانتشار على مرحلة النمو.

هناك ثلاثة أشكال للحدود الفاصلة موضحة في الشكل(**II .2**).



الشكل 2.II : رسم تخطيطي للحدود الفاصلة [17].

- ✓ (a):حد فاصل متماسك.
- ✓ (b): حد فاصل شبه متماسك.
- ✓ (c): حد فاصل غير متماسك.

✓ **الحـــدود الفاصلـــة المتماسكـــة:**

يكون للسطوح البينية المتجاورة نفس الترتيب الذري، بمعنى آخر تترتب بعض المستويات والاتجاهات البلورية للطورين بنفس الصورة، أي أنه توجد علاقات الالتحام البلورية بين الطورين وكذلك تطابق في المستويات البلورية للطورين. إن الاستمرارية في الترتيب الذري لا تعني تساوي في البعد الذري بين الطورين.

يمكن مرور الإنخلاعات عبر الطور الثاني تاركة وراءها إزاحة. غير أن السطح البيني لا يحتوي على إنخلاعات بل يظهر تشوه للبلورة في جوار الطور الثاني وهذا ما يعرف بحقول الإجهادات والتي تم مشاهدتها بواسطة المجهر الإلكتروني النافذ.

عادة ما نحصل على السطح البيني الملتحم بين طورين أحدهما من النوع HC والآخر من النوع CFC عند تطابق المستويين (0001) و(111) وتطابق الاتجاهين $[\bar{2}\bar{1}10]$ و$[\bar{1}10]$.

✓ **الحـــدود الفاصلـــة شبـــه المتماسكـــة:**

يتكون هذا النوع من السطوح في مناطق متماسكة كليا ومفصولة بإنخلاعات عند الحدود الفاصلة بين الطورين نلاحظ أنه يوجد التحام بين الطورين من جهة ووجود إنخلاعات من جهة أخرى.

✓ **الحــدود الفاصلــة الغيــر المتماسكــة:**

لا توجد استمرارية للترتيب الذري بين شبكتي الطورين، ويتكون السطح الفاصل بينهما من ترتيب للإنخلاعات من جهتي الطورين. إذن يوجد حجم مهم للشبكتين البلورتين حيث يكون مشوها ويمتاز هذا النوع من السطوح بحركة بطيئة.

يظهر هذا النوع من العيوب كذلك في حالة ترسيب مكثف كطور ثاني. لا يمكن للإنخلاعات خلال حركتها اختراق السطح البيني بسبب عدم استمراريته مع شبكة الطور الأم لذا تلتف خطوط الإنخلاعات حول هذا النوع من الترسبات.

ج) الإلتحــام:

عندما يوضع نظام معين لطور مشتت عند درجة حرارة مرتفعة نسبيًا، فإن عدد جسيمات الطور المشتت يتناقص بينما يزيد متوسط حجم الجسيمات خلال هذا الإلتحام، تنمو الجسيمات الكبيرة على حساب الجسيمات الصغيرة[18].

تتطلب هذه العملية تدفق ذرات المذاب من المناطق المجاورة للحبيبات الصغيرة إلى المناطق المحيطة بالحبيبات الضخمة، مما يعني أن تركيز هذا المذاب في محلول الاتزان مرتفع بالنسبة لترسبات الجسيمات الصغيرة. ونظرًا لأن نسبة الذرات الموجودة في الحد البيني تزداد عندما ينخفض الحجم، فإن الطاقة الحرة للذرات المترسبة أكبر من طاقة الجسيمات الصغيرة. في نظام يحتوي على جزيئات ذات أحجام مختلفة، توجد تدرجات تركيز في المصفوفة، ويحدث انتشار المذاب من المناطق المحيطة بالجزيئات الصغيرة إلى تلك المجاورة للجزيئات الأكبر. عادة ما يكون الإلتحام مصحوبًا بانخفاض في القوة الميكانيكية للسبائك[18].

3.1.II.أنــواع الترســبــات:

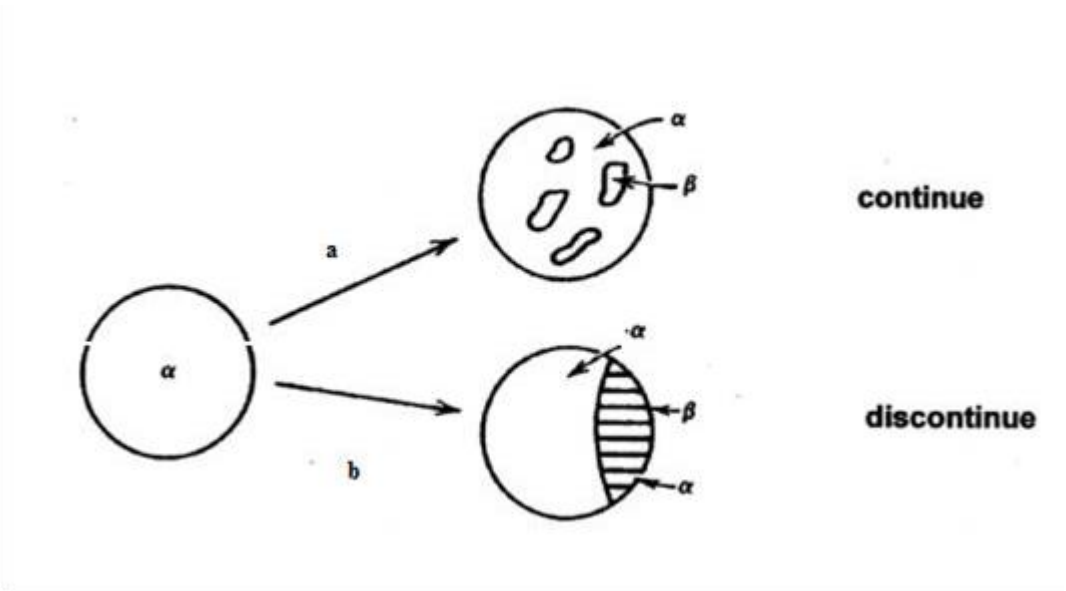
يمكن تعريف نوعين من الترسبات: ترسبات مستمرة وترسبات غير مستمرة.

أ) الترسبــات المستمــرة:

يسمى أي تحول يتغير فيه تركيز المادة المذابة في الطور الأم باستمرار حتى قيمة الإتزان بالترسيب المستمر. يكون تفكك المحلول الصلب الفائق التشبع متبوع بتغير في ثوابت الشبكة.

ب) الترسبـــات الغيـــر المستمـــرة:

يعرّف الترسيب الغير مستمر أو المتقطع بأنه تحول طور يقسم المادة إلى منطقتين: منطقة أين يكون التحول تام ومنطقة لا يزال محلول صلب مفرط التشبع. أثناء التعقيق، يتغير ثابت الشبكة بصفة غير مستمرة (تؤدي هذه العملية إلى ظهور طورين: طور ابتدائي وطور جديد).



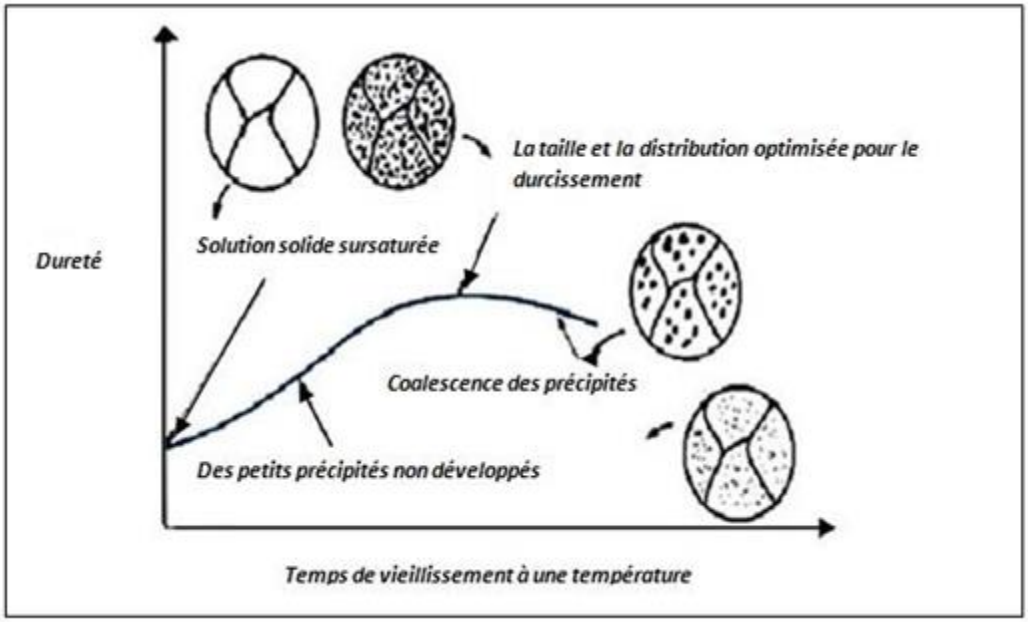
الشكلII.3: رسم تخطيطي لنوعي الترسبات [15].

2.II. تأثيـــر الترسبـــات علـــى الخـــواص الميكانيكيـــة:

أثناء نمو الترسبات لتشكيل سبيكة، فإنه من الضروري التحدث عن الخصائص الميكانيكية للمواد. يتم الحصول على حالة توازن محلول صلب مفرط التشبع من خلال تكون ترسبات، مما يزيد من مقاومتها للتشوه.

تزيد سرعة الترسيب كلما زادت درجة الحرارة. ويعتمد ذلك على التركيبة الكيميائية. ونميز نوعان من السبائك التي تتشكل على البارد والتي تتشكل على الساخن. يعرف التصلد البنيوي على أنه ارتفاع في الصلادة بعد التبريد مع إطالة زمن التعقيق. لا يمكن ملاحظة هذا إلا إذا كانت قابلية الذوبان في المذيب تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة. تتم ملاحظة هذه الظاهرة في بعض سبائك الألمنيوم، أين تكمن الفائدة في الحصول على معدن خفيف ويمتلك خصائص ميكانيكية محسنة.

إن تطور الخواص الميكانيكية لسبائك الألمنيوم مشروط عمليا بنفس خطوات التصلد البنيوي كما هو مبين في الشكل (4.II).



الشكل 4.II : التطور التخطيطي للصلادة والقوة الميكانيكية لسبائك التصلد البنيوي أثناء التعقيق [19].

3.II. تفاصيـــل حـــول الترسبـــات فـــي سبائـــك Al-Mg-Si:

بشكل عام أظهرت التجربة في حالة سبائك الألمنيوم أننا خلال التنوي نتعامل فقط مع الترسبات، أي تشكيل المناطق GP، التي تختلف في عدد ،حجم ،شكل وحركية النمو من سبيكة إلى أخرى، في حين أنه بسبب صعوبات التنوي، فإن الطور المستقر أو الأطوار الأخرى الثابتة لها بنية بلورية مختلفة عن بنية الألمنيوم لا يمكن أن تظهر على الرغم من إمكانية ظهور مناطق GP في البداية ، إلا أنها تستبدل عادة بطور واحد ثابت أو أكثر.

4.II. الأطــوار المتشكلــة:

تمت دراسة حركية الترسبات في سبيكة ألمنيوم السلسلة 6000 خلال دورة التسخين من حالة الصلب الخام إلى درجة حرارة التجانس بواسطة تقنيات تجريبية مختلفة [20،21]. التحليلات التي أجريت في درجة حرارة ثابتة [22،18] مكنت من تحديد التغيرات المتتالية التي حدثت خلال دورة التسخين قبل التجانس ، وكذلك تأثير معدل التسخين على حركيات التحول.

عندما تكون النسبة الذرية Mg / Si تساوي 2، فإن تسلسل حركية الترسبات لهذه السبائك يكون كما يلي :

$$(SSS) \longrightarrow \text{zones GP} \longrightarrow \beta'' \longrightarrow \beta' \longrightarrow \beta\ (Mg_2Si)\ [24،23]$$

حيث:

(SSS): هو المحلول الصلب المشبع لمصفوفة الألمنيوم.

(GP): يمثل مناطق غينير بريستون وهي كروية الشكل ذات بنية غير معروفة.

(β"): تترسب في شكل إبر ممدودة على طول الاتجاه <100> [25 ،26].

(β'): تترسب في شكل قضبان ممدودة على طول الاتجاه <100>، ذو بنية بلورية سداسية (a=0.705nm و c=0.405nm) [25].

(β): طور التوازن β (Mg_2Si) يترسب على شكل صفائح صغيرة على المستوى {100} من المصفوفة α–Al ذات البنية المكعبة ممركزة الأوجه من النوع CaF_2 (a=0.636nm) [27].

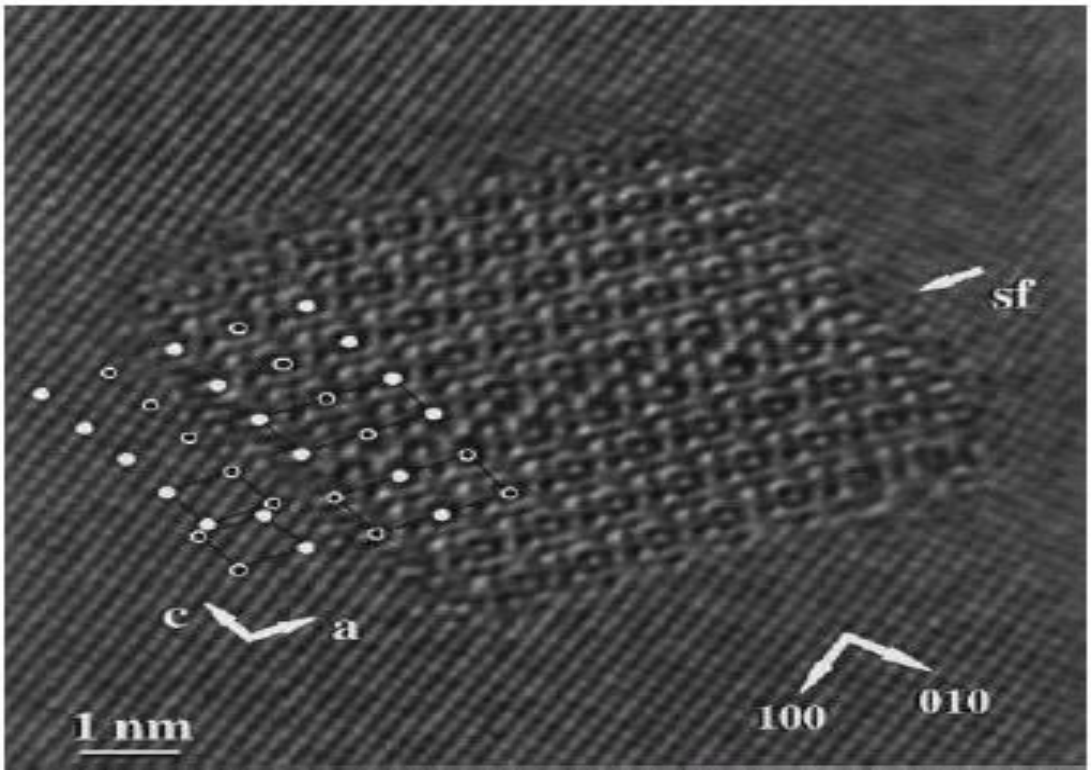
المناطقGp:

من الصعب مراقبة تشكل هذه المناطق تجريبيا بالرغم من أنها تظهر بطريقة غير مباشرة من خلال زيادة صلادة السبيكة، بافتراض أن جميع المناطق لها حجم يتراوح بين 1–5 nm من القطر[28].

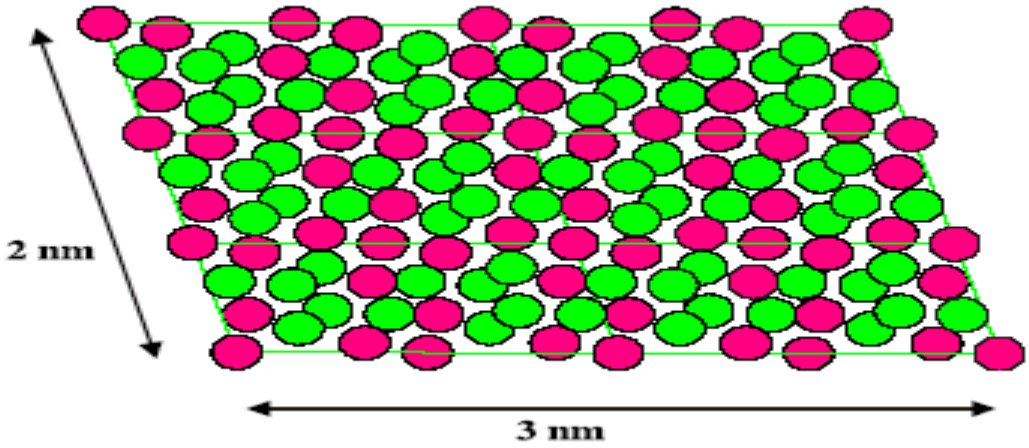
الطور"β :

هو طور شبه مستقر يكون على شكل إبر، يمتد على طول الاتجاه $< 100 >$ [29]، تم اعتباره في السابق طور GP استنادا إلى النتائج الظاهرة على شريط الحيود الإلكتروني [30]، ثم تمت تسمية هذا الطور "β من طرف Wang. بالاعتماد على دراسة لهذا الطور بواسطة الأشعة السينية لسبيكة Al–Mg–Si، تمكن الباحث من تحديد بنية الطور "β و هي أحادي الميل ذات الثوابت:

$$a = b = 0.616nm \text{ و } c = 0.71nm \text{ و } \gamma = 82° \text{ [26،27]}$$



الشكل 5.II : صورة للطور"β تم الحصول عليها بواسطة المجهر الإلكتروني النافذ (MET) [34].



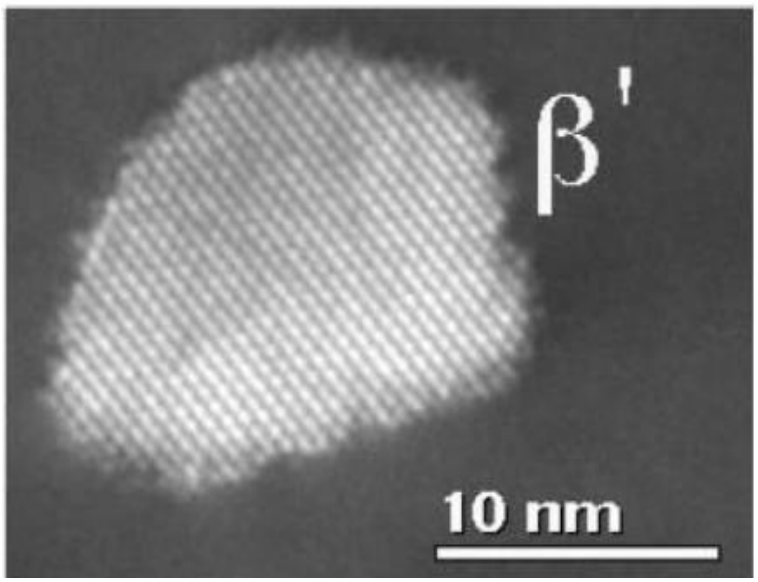
الشكل 6.II : ترسبات الطور"β وفق نموذج Andersen [34].

الطور(β'):

النسبة Mg/Si في الطور المتوسط أضعف مما كانت عليه في طور التوازن. يترسب هذا الطور على شكل قضبان يتراوح قطرها بين 5 و15nm تم تحديد بنية هذا الأخير بواسطة حيود الأشعة السينية [29]. وهي شبكة سداسية ذات الثوابت:

Mg/Si=1.73 ، c=0.405nm، a=0.705nm[29].

Mg/Si=1.54، c=0.405nm ،a=b=0.407nm[29].



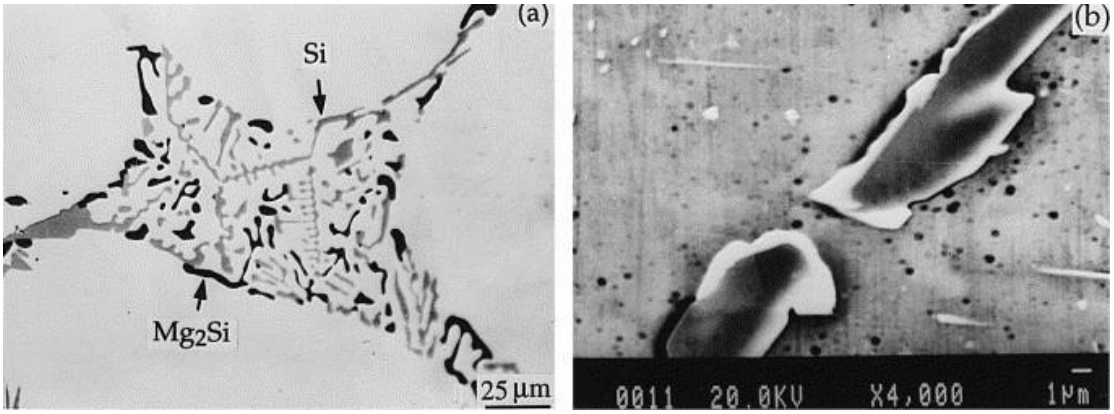
الشكل 7.II : ترسب الطور 'β لسبيكة Al–Mg–Si[21]

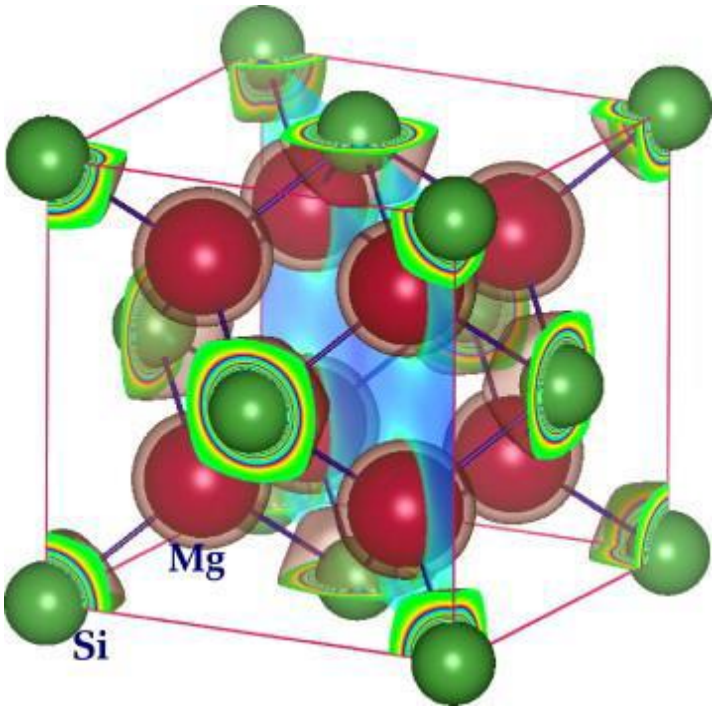
.

الطور(Mg_2Si) β:

الطور المستقر (Mg_2Si) β هو أكثر طور معروف يترسب على شكل صفائح مربعة ذات سمك قريب من 10 nm بنيته مكعب ممركز الوجوه لا يحتوي على الألمنيوم.

الطور(Mg_2Si) β غير متماسك مع المصفوفة.





الشكل 8.II : ترسب الطور β لسبيكة Al–Mg–Si وشكل بنيته[21].

الطور *Q′*:

في حالة سبائك Al–Mg–Si(Cu) :

تتشكل سبائك Al–Mg–Si(Cu) عند إضافة النحاس إلى السلسلة 6000، أو عند إضافة السليسيوم إلى السلسلة 2000[35].

النتيجة الأساسية لإضافة النحاس لسبائك Al–Mg–Si هو تشكل الطور الرباعي Q ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$)، هذا الطور مستقر جدا و يتميز في سبائك Al–Mg–Si بزيادة نسبة السليسيوم فيه،

حتى عند إضافة نسبة قليلة من النحاس (0.25%)، يتشكل هذا الطور أثناء التصلد في حالة توازن الألمنيوم.

النحاس هو العنصر المسؤول عن تشكل الطورين Q و'Q . تتم إضافته خاصة للسلسلة 6000 لتحسين الخصائص الميكانيكية[35].

بعد التجانس و التبريد، تكون حركية تسلسل الترسبات كالتالي:

* ترسب السبيكة مع فرط في السليسيوم و نسبة قليلة من النحاس (0.07%) من الوزن.

$$SSS \rightarrow GP \rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow Q' \rightarrow \beta + Si \qquad [36]$$

* ترسب السبيكة مع فرط في السليسيوم و نسبة كبيرة من النحاس (0.91%) من الوزن.

$$SSS \rightarrow GP \rightarrow \beta'' \rightarrow Q' \rightarrow Q + Si \qquad [37]$$

طور التوازن Q:

هو الطور المستقر في سبائك Al–Mg–Si–Cu، يعرف باسم Q[26] أو W أو h [38،27].

تم تحديد بنيته بواسطة الأشعة السينية و هي سداسية حيث:

$$a = 1.03932nm \ ، \ c = 0.40173nm$$

الفصل الثالث

التقنيات التجريبية والأجهزة المستعملة

1.II مقدمـــة:

الهدف من هذا الفصل هو التعريف بمختلف التقنيات التجريبية والمعالجات الحرارية التي استعملت لإنجاز هذا العمل.

التقنيات التجريبية التي استخدمت في هذا البحث من أجل دراسة تطور البنية المجهرية لمختلف السبائك وقياس نتائج الخصائص الميكانيكية نذكر منها: المجهر الضوئي، حيود الأشعة السينية، اختبار الصَّلادة.

III .2 اختيار المـــادة المدروســـة:

تم توفير سبائك الألمنيوم المدروسة من قبل مختبر قسم فيزياء المعادن بجامعة مانشستر (بريطانيا)، العينات عبارة عن صفائح من سبائك الألمنيوم Al–Mg–Si (سلسلة 6000)، طولها 30 سم و عرضها 4 سم وسمكها 3 مم. التركيب الكيميائي لهذه السبائك مبين في الجدول 1.

السبيكة	Mg%	Si%	Cu%	Fe%	Mn%	Cr%	Zn%	Ti%	Al%
1	0.20	0.20	0.001	0.17	0.03	0.002	0.003	0.022	المتبقي
2	0.20	0.61	0.002	0.17	0.03	0.001	0.003	0.012	المتبقي
3	0.49	0.37	0.1	0.17	0.03	0.001	0.003	0.010	المتبقي

الجدول III .1: التركيب الكيميائي للسبائك المدروسة.

3.III المعالجـــات الحراريـــة:

تمت المعالجات الحرارية في فرن من نوع نابيرثرم NABERTHERM. بمعدل تسخين قدره 5 درجات مئوية في الدقيقة. تم اختيار هذا المعدل البطيء في رفع درجة الحرارة لجعل العناصر المضافة أكثر انحلال في مصفوفة الألمنيوم.

خضعت عينات السبيكة المدروسة إلى عملية التجانس الحراري عند درجة حرارة550°C لمدة نصف ساعة، ثم تم تبريدها تبريدا سريعا بواسطة الماء (السقاية) و تم تعريضها للتعقيق الاصطناعي الحراري لمدة ربع ساعة لكل عينة في درجات حرارة تتراوح بين 25 درجة مئوية إلى 475 درجة مئوية.

الشكل 1.III: فرن المعالجات الحرارية نابيرثرم NABERTHERM

4.III تحضيـــر العينـــات:

تحضر العينات وذلك بتقطيع السبيكة على شكل صفائح صغيرة بالأبعاد التالية تقريبا (طولها$2cm$ ، عرضها $1cm$ وسمكها $3mm$). تتم هذه العملية باستخدام منشار حديدي يدوي، حيث يتم القطع ببطء وتحت تدفق الماء البارد لتجنب التصليد الانفعالي للعينات.

1.4.III الصَّقــل:

استخدمنا الورق الكاشط الخشن للصّقل الميكانيكي الذي يتكوّن أساسًا من حُبيبات كربونات السليسيوم (SiC). ذي درجات النعومة بالتدريج من 100 إلى 1200 كعملية أولية، حيث يسمح هذا الأخير بالتّحسين التّدريجي لاستواء السّطح ثم يتبع الصّقل الخشن صقل ناعم باستخدام قماش رطب ويضاف إليه عجينة الألماس ذات حجم بلوري من رتبةμm 3 و μm 6 عند نهاية العمليتين يصبح سطح العينة شبيه بالمرآة.

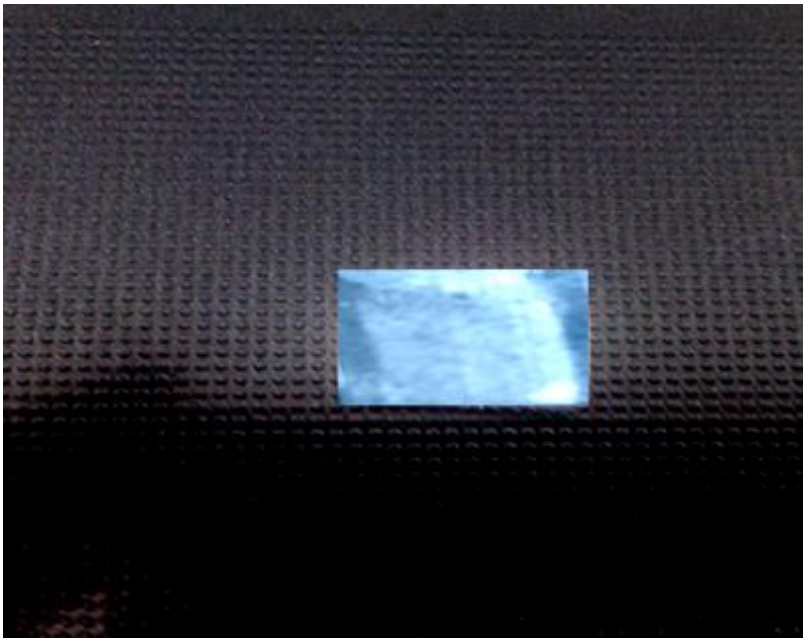
2.4.III التّنميـــش الكيميائـــي:

نعلم أن الفحص المجهري لسطح العيّنات المصقولة لا يبين لنا حدود الأطوار، لذلك نقوم باستخدام مركب كيميائي يسمح بتنميش أسطح العينات.

تم إجراء عدة تجارب التنميش الكيميائي على العينات المصقولة باستخدام محلول ذي التركيب الكيميائي ($17ml$ من حمض النيتريك (HNO_3), $5ml$ من حمض الهيدروفلوريك (HF)، $9ml$ من حمض الهيدروكلوريك (HCl) $78ml$ الماء المقطر) و بزمن إظهار يتراوح بين (10−15) ثانية، غير أن النتائج المتحصل عليها باستخدام كاشف كيلر كانت أكثر فعالية.

بعد إنهاء كل عملية التنميش تنظف العينات بالماء المقطر وتجفف بالهواء.

الشكل 2.III: الورق الكاشط و ماكنة الصقل الميكانيكي (FORCIPOL 2).



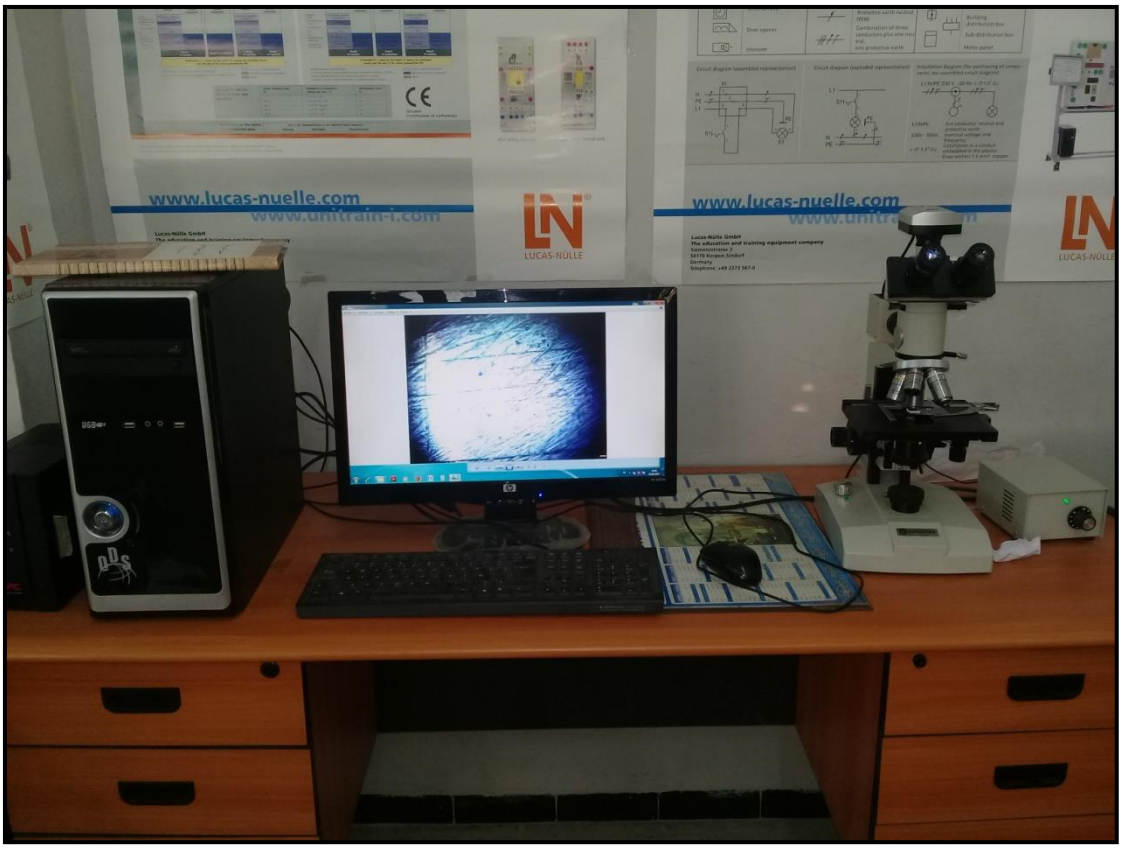
الشكل 3.III: سطح العينة قبل الصقل.

الشكل 4.III: سطح العينة بعد الصقل.

5.III الطــرق التجريبيـــة

1.5.III. المجهر الضوئي Microscope optique (MO):

أجريت عملية المراقبة الميكروسكوبية في مختبر العناصر النشطة والمواد بجامعة العربي بن مهيدي أم البواقي، باستخدام مجهر ضوئي نوع أوروماكس EUROMEX (الشكل 4.III) بتكبيرات مختلفة (500، 600 و 1000) ومجهز بكاميرا رقمية. تسمح هذه التقنية بتسليط الضوء على مختلف التغييرات التي تطرأ على البنية المجهرية لمختلف السبائك.



الشكل **5.III:** مجهر ضوئي نوع EUROMEX

(مختبر العناصر النشطة والمواد بجامعة العربي بن مهيدي أم البواقي)

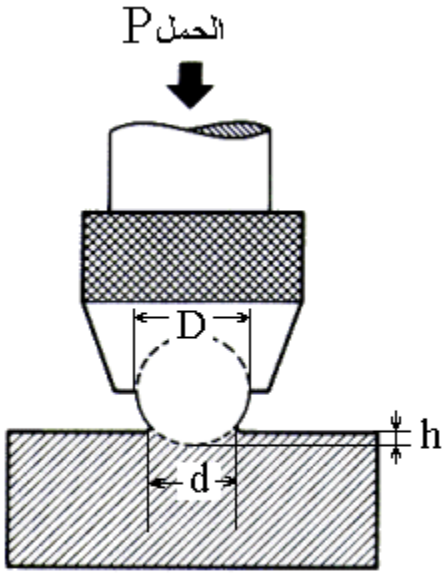
2.5.III اختبار الصـــلادة:

اختبار الصلادة عبارة عن تقنية تمكن المادة من الاحتفاظ بشكل سطحها متماسكا تحت تأثير الأحمال، قصد معرفة خاصية صلادتها.

يستخدم في اختبار الصلادة جسم قاس ذو شكل هندسي محدد ، يتم الضغط به على السطح بعد إزالة القوة الضاغطة يترك أثر انغراسه على العينة. تقاس صلادة المعدن بقياس عرض الأثر فكلما زادت قيمته قلت صلادة المعدن. يتم استخدام عدة أنواع من هذه الاختبارات لها نفس المبدأ، غير أنها تختلف في شكل الأداة.

والتقنيات الثلاثة الأكثر شيوعًا هي اختبار برينل، اختبار ركوال و اختبار فيكرز.

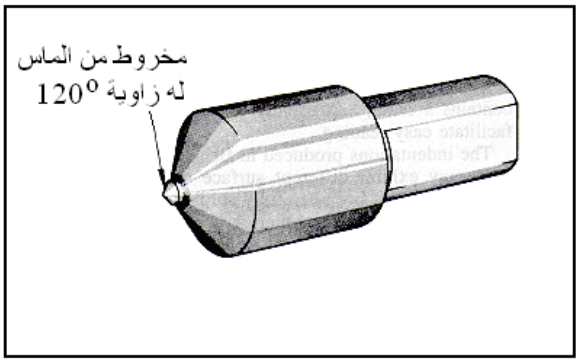
1. اختبـــار برينـــل: شكل الأداة عبارة عن كرات من الصلب المصلد (الشكل **6.III**)



الشكل **6.III**: أداة اختبار برينل

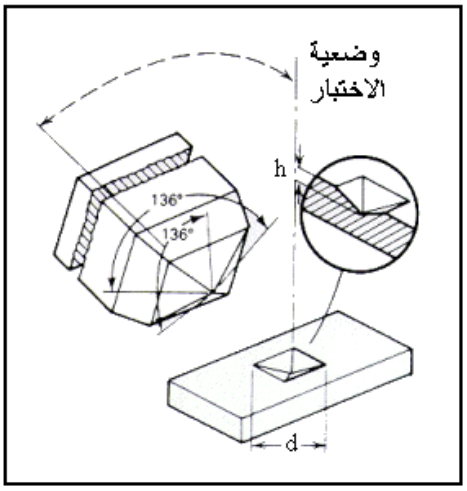
2. اختبار ركـــوال: شكل الأداة عبارة عن مخروط من الألماس له زاوية 120° وحرف مستدير

ويسمى البرايل (الشكل **7.III**)



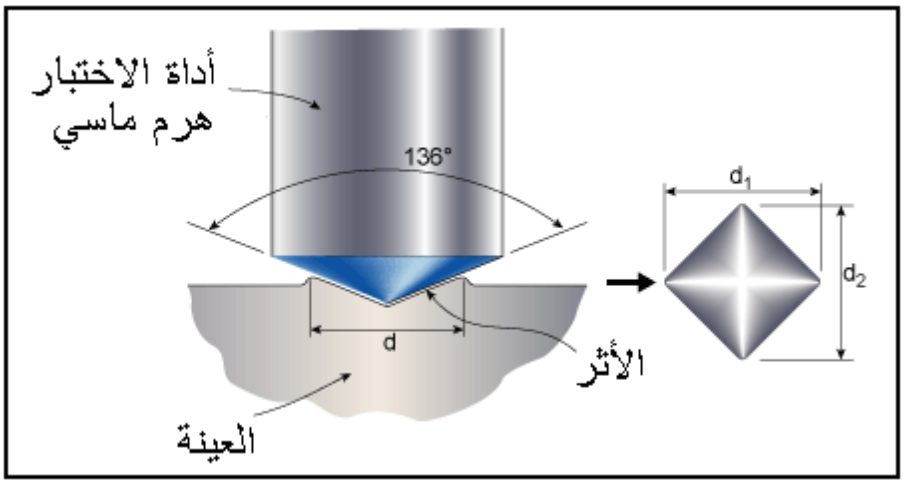
الشكل **7.III**: أداة اختبار ركوال

3. اختبـــار فيكـــرز: شكل الأداة عبارة عن هرم من الألماس مربع القاعدة وتتقاطع مستوياته عند الحروف بزاوية θ قدرها 136° (الشكل **8.III**)



الشكل **8.III:** أداة اختبار فيكرز

بما أن شكل الأداة عبارة عن هرم من الألماس فإن الأثر على سطح عينة الاختبار سيكون مربعا و ذو عمق معين وبالتالي تقاس الصلادة بقياس قطر الأثر (d)



الشكل **9.III:** اختبار فيكرز للصلادة (وضعية الاختبار وشكل الأثر).

يتم حساب صلادة فيكرز (HV) باستخدام العلاقة التالية: $Hv = \frac{1.854F}{D^2}$ أين :

- ✓ F حمل الاختبار (Kg)
- ✓ D قطر الأثر(mm)

في هذه الدراسة تم استخدم جهاز قياس الصلادة فيكرز نوع "AFFRI" (**الشكل III.10**)، حيث تم تحضير العينات المراد قياس صلادتها وذلك بصقلها باستعمال الورق الكاشط تدريجيا من الرّقم الصناعي 100 إلى 1200. أجريت القياسات تحت حمولة مقدارها 300 غرام لمدة 15 ثانية، ولكل عينة تمثل قيمة صلادتها متوسط خمس قياسات.

الشكل III.10: جهاز قياس الصلادة فيكرز نوع "AFFRI" .

3.5.III التحليـــل بواسطـــة حيـــود الأشعـــة السينيـــة:

يستخدم حيود الأشعة السينية بشكل أساسي لتحديد الطبيعة البنيوية و المراحل البلورية الموجودة في المادة ودراسة ظاهرة الترسبات، عند تسليط حزمة من الأشعة السينية أحادية طول الموجة على العينة المتبلورة فأن الطبقات الذرية لهذه المادة تتسبب في حيود هذه الأشعة الساقطة عن مسارها الأصلي طبقا لقانون براج وبمعرفة شدة الانعكاسات وزوايا الانعكاس من نمط حيود الأشعة السينية يمكن تحديد المسافات البينية للطبقات الذرية (d) والذي يكون مميز للمادة التي يتم فحصها، وبالرجوع إلى بيانات ASTM يمكن التعرف على المركبات المكونة للعينة.

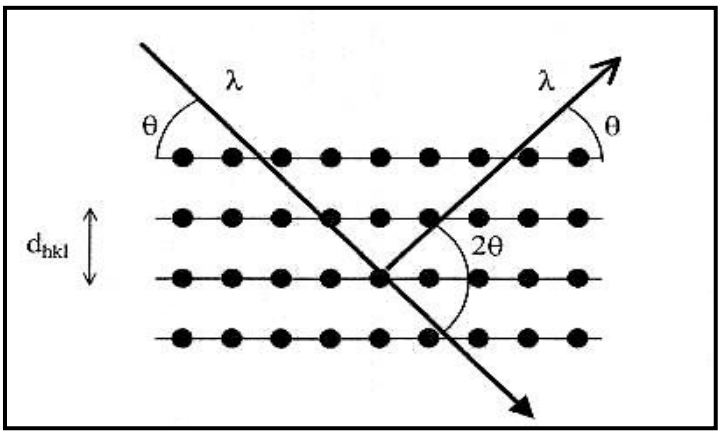
عندما تتداخل الموجات المنعكسة تداخلا بناء، يظل الطور بينهم ثابتا حيث أن مسار كل موجة يساوي عددا كاملا n من طول الموجة λ. ويخضع فارق المسار بين موجتين تداخلتا تداخلا بناء لقانون براغ :

$$2\, d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1.\mathrm{III})$$

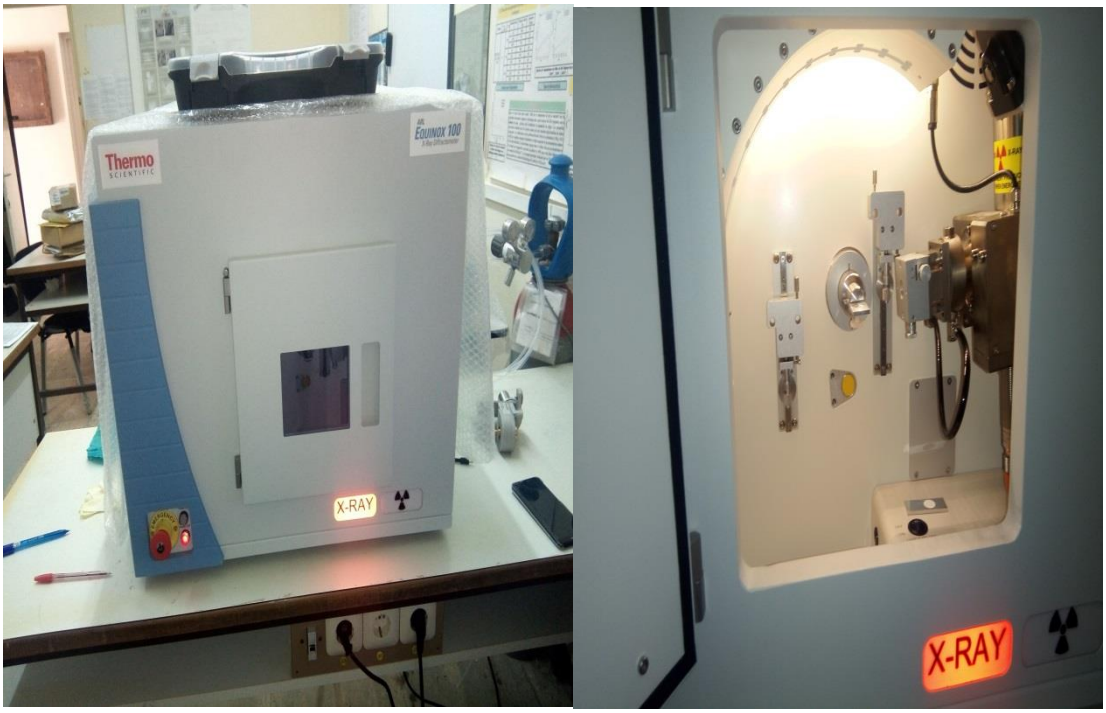
تربط هذه العلاقة بين :

- المسافة d بين طبقات الذرات.
- طول موجة الأشعة λ.
- الزاوية θ بين الشعاع الساقط و مستوي الطبقة البلورية.
- n عدد صحيح يحدد درجة الحيود.

استعملنا في هذه الدراسة جهاز انعراج الأشعة السينية نوع : EQUINOX 100



الشكل III.11: حيود براغ



الشكل III.12 : جهاز انعراج الأشعة السينية نوع EQUINOX 100

الفصل الرابع

النتائج ومناقشتها

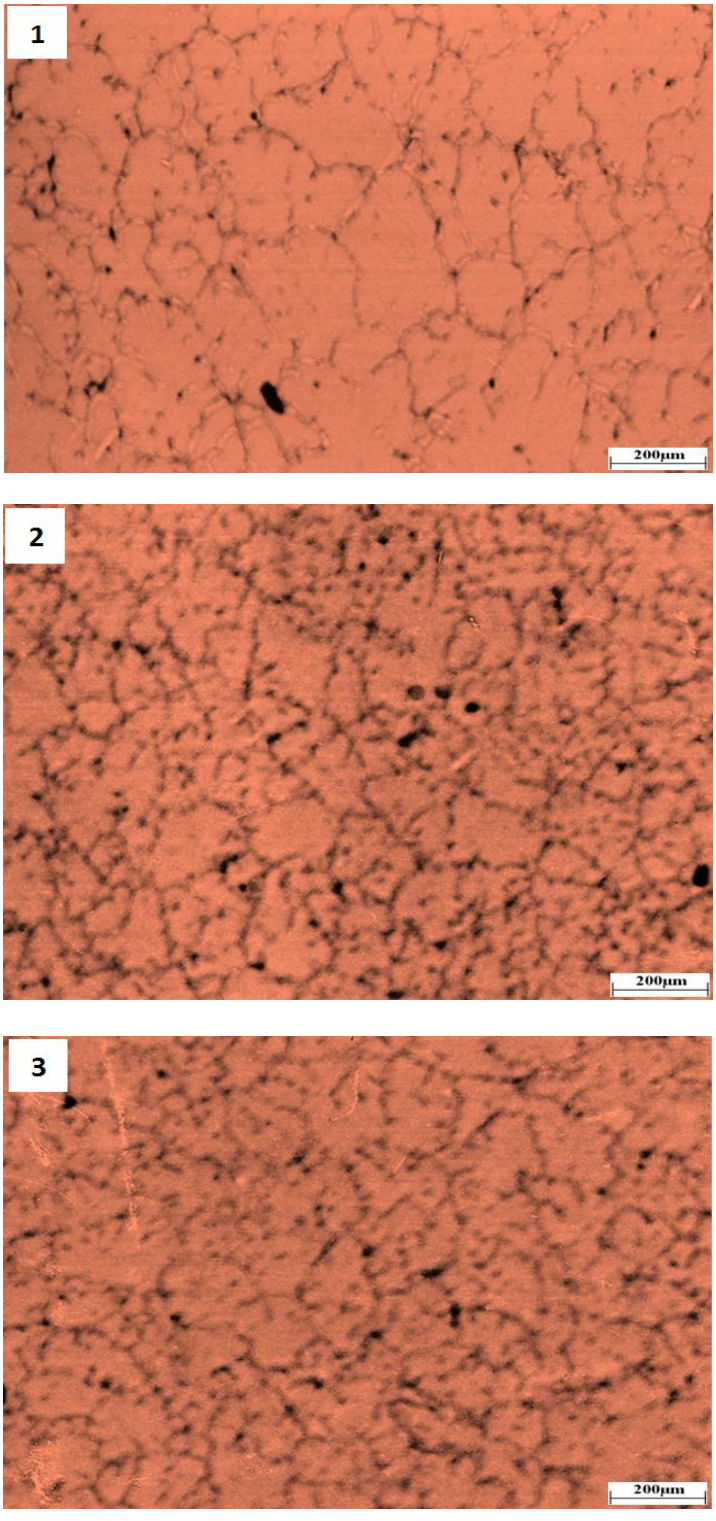
مقدمـــة

سنتطرق في هذا الفصل إلى النتائج التي تم التحصل عليها بالاعتماد على التقنيات التجريبية التي تم استعمالها، بدايةً من نتائج الفحص بالمجهر الضوئي لعينات سبائك الألمنيوم Al–Mg–Si الثلاثة، ثم النتائج التي تم التحصل عليها عن طريق تقنيات تجريبية أخرى مثل حيود الأشعة السينية واختبار الصلادة.

وتتمثل سبائك الألمنيوم الثلاثة في حالة الاستلام حيت السبيكة (2) تحتوي على الفرط في السليسيوم و السبيكة (3) تحتوي على النحاس.

IV.1الدراســـة باستعمـــال المجهـــر الضوئـــي

يبين الشكل (**1.IV**) البنية المجهرية للسبائك الثلاثة التي تمت دراستها في الحالة الخام (حالة الاستلام) ، نلاحظ وجود حبيبات ذات أحجام مختلفة أي غير متجانسة. تتوزع هذه الجزيئات بصورة عشوائية داخل الحبيبات. تشكلت هذه الجزيئات أثناء تحضير السبائك المدروسة. كما أظهرت الصور أيضا أن متوسط حجم الحبيبات في حالة السبيكة (3) صغير مقارنةً بمتوسط حجم الحبيبات للسبيكتين (1) و (2) . وهذا يمكن أن يرجع لوجود النحاس في السبيكة (3) والذي بدوره يعمل على تحسين الخصائص الميكانيكية لسبائك الألمنيوم السلسلة 6000 ويجعل من البنية المجهرية دقيـــقة. هذه النتيجة في اتفاق جيد مع النتائج التي تم الحصول عليها من قبل بعض الباحثين [39–42].

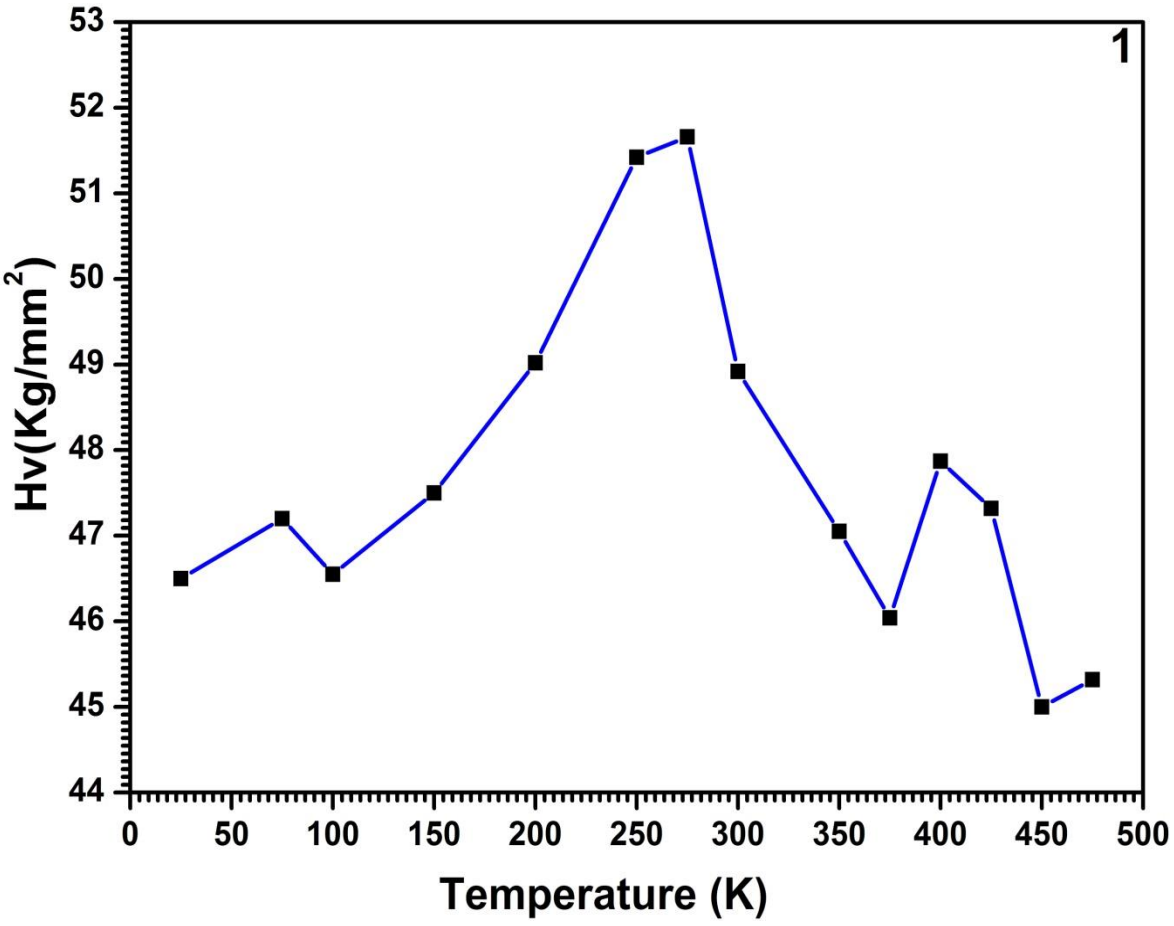


الشكل 1.IV: البنية المجهرية لعينات سبائك الألمنيوم المدروسة

IV .2اختبار الصـــلادة

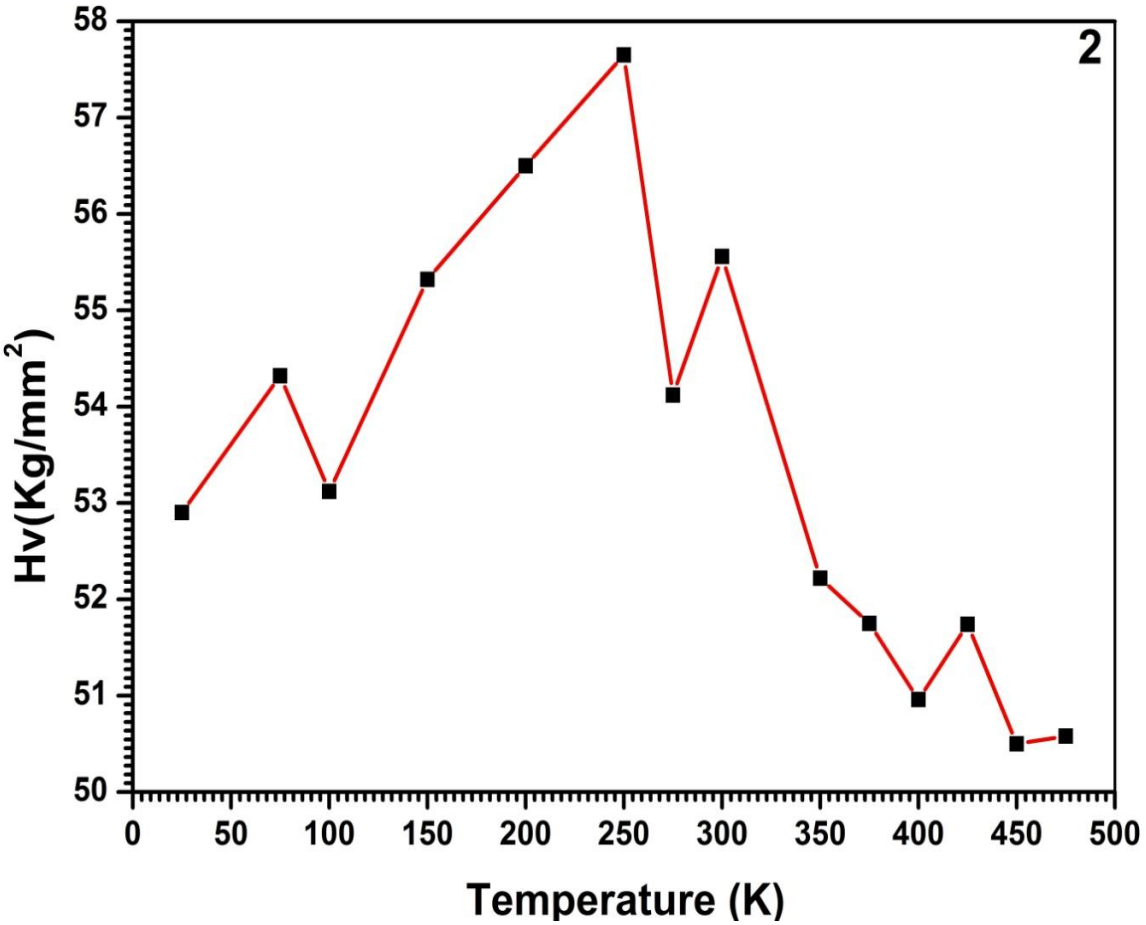
سنتطرق في هذا الجزء إلى دراسة الصلادة HV باستخدام جهاز لقياس الصلادة نوع AFFRI. يتم معالجة عينات السبائك المدروسة بالتعقيق الاصطناعي الحراري لمدة ربع ساعة لكل عينة في درجات حرارة تتراوح بين 25°C إلى 475°C. بعد كل معالجة حرارية تبرد العينات تبريدا سريعا بالماء البارد (عملية السقاية).

يبين الشكل **(2.IV)** تغير الصلادة HV بدلالة درجات حرارة التعقيق الاصطناعي للسبيكة(1). نلاحظ وجود ثلاثة قمم للصلادة. تمثل القمة الأولى الواقعة في جوار 75°C تشكل مناطق غينر بريستون (GP) و تجمعات ذرات كل من Mg و Si. هذه النتيجة في اتفاق جيد مع بعض الدراسات السابقة[43, 44] القمة الواقعة عند 275°C تدل على تكوين الطورين الشبه مستقرين "β و'β . أما القمة الواقعة عند400°C تدل على تكون الطور المستقر ($\beta(Mg_2Si)$).



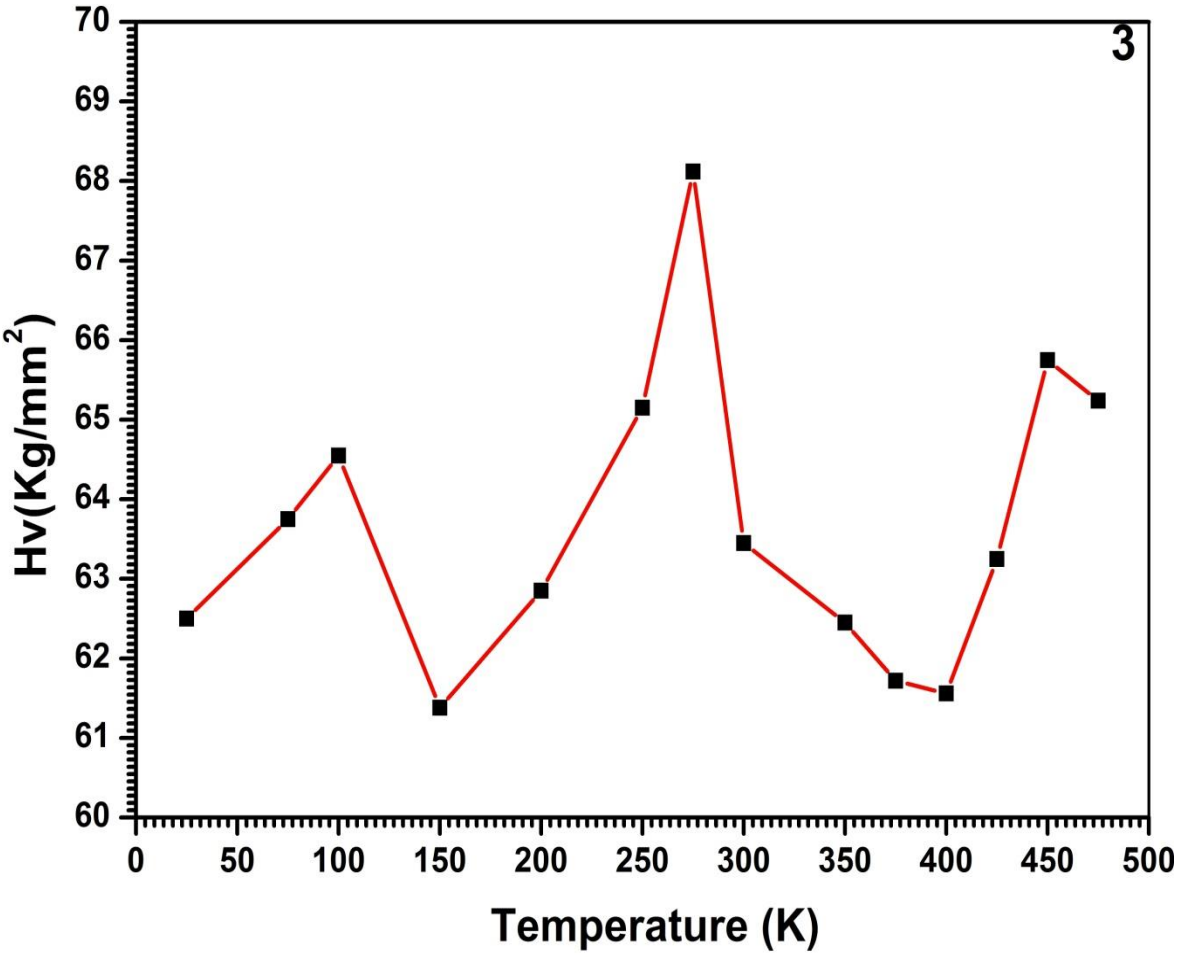
الشكل 2.IV: تغير الصلادة HV بدلالة درجة الحرارة للسبيكة (1)

تغير الصلادة HV بدلالة درجات حرارة التعقيق الاصطناعي للسبيكة(2) مبين في الشكل (3.IV) فلاحظنا أنه بالإضافة إلى القمم التي ظهرت في السبيكة(1) ، وجود قمة جديدة والتي تدل على تشكل الطور الشبه المستقر'β مستقلا على الطور"β [39] .



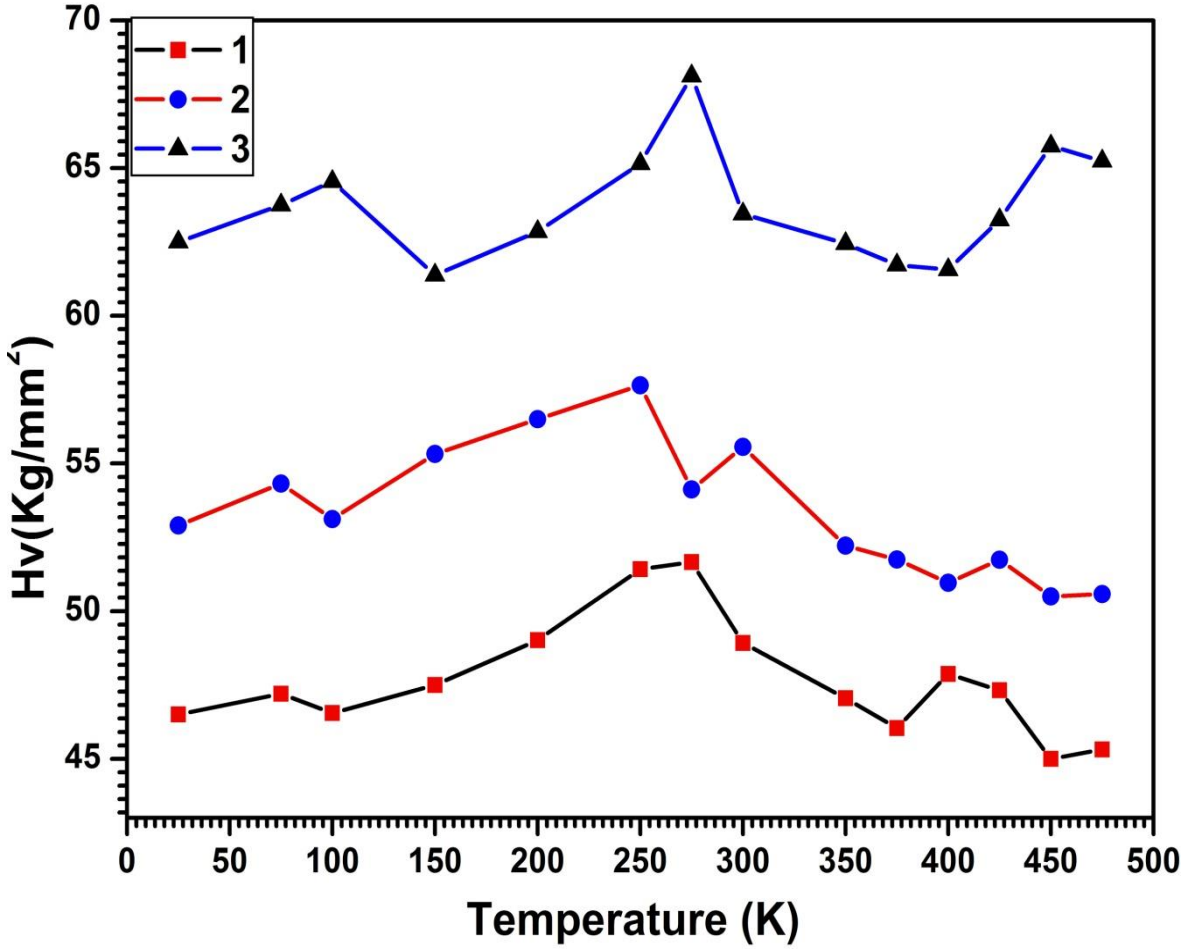
الشكل 3.IV: تغير الصلادة HV بدلالة درجة الحرارة للسبيكة (2)

يبين الشكل (4.IV) تغير الصلادة HV بدلالة درجات حرارة التعقيق الاصطناعي للسبيكة(3). نلاحظ وجود نفس القمم التي وجدناها في السبيكة(1). والتي تمثل تشكل كل من مناطق GP والطورين الشبه مستقرين "β و'β وتكون الطور المستقر (Mg_2Si)β.



الشكل 4.IV: تغير الصلادة HV بدلالة درجة الحرارة للسبيكة (3)

يبين الشكل (5.IV) تغير الصلادة HV بدلالة درجات حرارة التعقيق الاصطناعي للسبائك المدروسة. هذا الأخير يدل على أن إضافة عناصر مثل Cu و Si لسبائك الألمنيوم السلسلة 6000 تكون مصحوبة بزيادة معتبرة في الصلادة. نلاحظ أن السبيكة (3) لها صلادة أكبر من صلادة السبيكتين (1) و (2)، هذه الزيادة راجعة لوجود النحاس والذي يجعل من بنية السبيكة دقيقة. نلاحظ أيضا انتقال قمة تكون الطور الشبه مستقر"β في السبيكة (2) إلى درجات حرارة أقل من التي تكون فيها نفس الطور بالنسبة للسبيكتين(1) و (3)، وهذا راجع للفرط في السليسيوم المتواجد في السبيكة (2) والذي بدوره يساهم في تسريع حركية ترسب الأطوار[39].



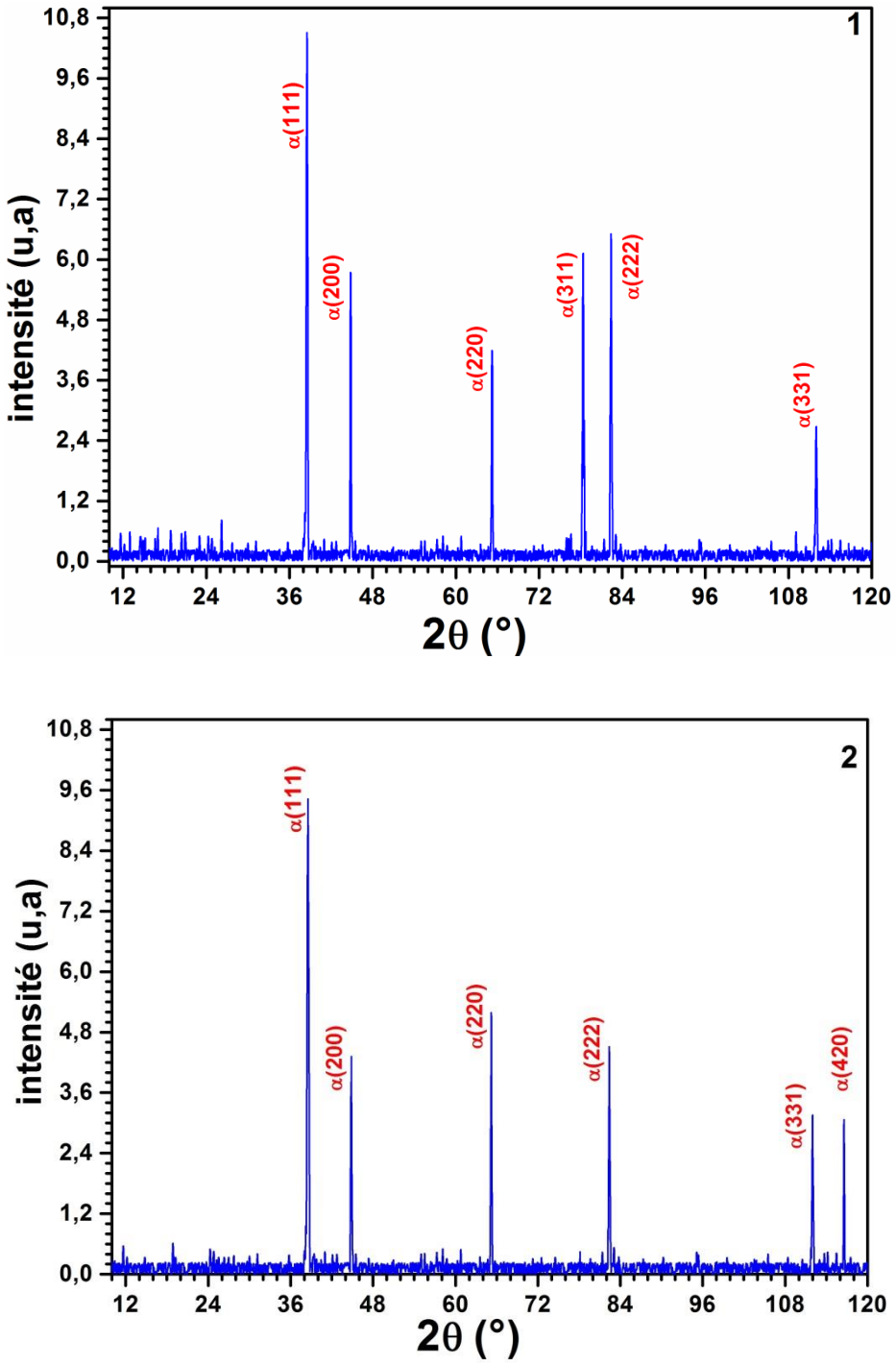
الشكل 5.IV: تغير الصلادة HV بدلالة درجة الحرارة للسبائك الثلاثة

IV .3التحليـــل بواسطـــة الأشعـــة السينيـــة:

إن فيزياء الحالة الصلبة بمختلف مجالاتها تستخدم طريقة حيود الأشعة السينية (XRD) من أجل تحديد البنية البلورية.

لقد درسنا تطور البنية المجهرية للسبيكتين (1) و (2) من خلال تحليلنا لأطياف الحيود التي تم الحصول عليها بواسطة جهاز حيود الأشعة السينية نوع EQUINOX 100 باستخدام حزمة أحادية اللون من طيف النحاس ذات الطول الموجي 0.15406 nm عند التشغيل بفولتية 30 kV وتيار 20 mA وسرعة المسح 0.02deg /s وضمن المدى الزاوي $[10°، 120°] = 2\theta$.

الشكل (6.IV) يبين لنا أطياف حيود الأشعة السينية للسبيكتين (1) و (2) ، وفقًا لصحائف بيانات ASTM ، فإن حالات الانعراج المبينة في الشكل تتوافق مع بنية الألمنيومC.F.C .



الشكل 6.IV: أطياف حيود الأشعة السينية للسبيكتين (1) و (2)

خلاصة عامة

خلاصة عامة

يهدف العمل الذي قمنا به في هذه المذكرة إلى دراسة و فهم تأثير النحاس و الفرط في السليسيوم على سبائك Al–Mg–Si ، تم استخدام العديد من التقنيات التجريبية لدراسة الترسبات والصلادة لسبائك Al–Mg–Si و هي : المجهر الضوئي (MO) وقياس الصلادة HV وحيود الاشعة السينية.

أظهرت الدراسة هذه النتائج والتي كانت في اتفاق جيد مع دراسات بعض المؤلفين، يمكن تلخيص هذه النتائج كالتالي:

1/ الفرط في السليسيوم يسرع حركية الترسبات في سبائك Al–Mg–Si .

2/ إضافة النحاس إلى سبائك Al–Mg–Si يزيد من صلادتها حيث تكون هذه الأخيرة أكبر من صلادة سبائك Al–Mg–Si التي تحتوي على فرط في السليسيوم.

3/ إضافة النحاس إلى سبائك Al–Mg–Si يجعل من حبيبات السبيكة دقيقة.

قَائِمَةُ المَرَاجِعِ

قائمـــة المراجـــع:

[1] G.W. Lorimer; FIZIKA 2 Suppl, 2 (1970) 01.

[2] L.F.Mondolfo, AluminiumAlloys, structures and proprietes, Butterworth, 1st edition, London (1976)

[3] L.Menasria, Mémoire de master, Université de Tébessa, Algérie, (2018).

[4] F. Serradj, Thèse doctorat, Université de Constantine, Algérie, (2014).

[5] H. Farh, Thèse doctorat, Université d4Oum El Bouaghi, Algérie, (2012).

[6] T. Ziar, H. Farh, and R. Guemini, Acta Metall Slovaca. 22(3) (2016) 138

[7] R . Develay, Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Doc. M 1290, Techniques de l'ingénieur, (1991).

[8] M. Zidani, L. Bessais, H. Farh et all, Steel and composite structures, 22 (2016) 745.

[9] J. Zhang, Z. Fan, Y. Q. Wang and B. L. Zhou, materials sciences and technology 17 (2001) 494.

[10] K. Djemmal, H. Farh, R. Guemini, M. Zidani, and F. Serradj, Int J Eng Rres Africa. 28 (2017) 1.

[11] M.A. Moustafa, F.H. Samuel, H.W. Doty et S. Valtierra, International Journal of Cast Metals Research, 14 (2002) 235.

[12] J.E. Gruzleski et B.M. Closset, The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys, American Foundrymen's Society Inc, Des Plaines, IL, (1990) 142.

[13] J. E. Hatch (éd.), Aluminum - Properties and Physical Metallurgy, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, (1984) 84.

[14] M. Nicolas, Thèse de doctorat, Laboratoire de Thermodynamique et de P 1 hysico-Chimie Métallurgiques GRENOBLE. (2002).

[15] W. Kurz, J.P. Mercier, G. Zambili, 2ème édition, presse polytechnique et universitaire Romandes, Suisse Lausane, (1995).

[16] DJ. Chakrabarti, D.E. Laughlin, Progress Mater. Set 49 (2004) 389.

[17] E. Hornbgen, Nucleation, M. Becker, 309, Inc New-york, (1969).

[18] Y. Ohmori, L.C. Doan, Y. Matsuda, S. Kobayashi, K. Naki, Mater. Trans, 42(12) (2001) 2476.

[19] A. Azizi, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Constantine, Algérie, (2012).

[20] DJ. Chakrabarti, Y. Peng, D.E. Laughlin, Mater. Sci. Forum, 396-402 (2002), 857.

[21] C. Cayron, P. A. Buffat, Acta. Mate, 48 (2000), 2639.

[22] S. M. Hirth, G. J. Marshall, S. A. Court, D. J. Lloyd, Mater. Sci.Eng. A, 329-321 (2001), 452.

[23] Y. Aouabdia, A. Boubertakh, and S. Hamamda, Mater Lett, 64(3) (2010) 353.

[24] X. Wang, W. J. Poole, S. Esmaeili, D. J. Lloyd, J. D. Embury, Met. Mater. Trans, 34(A) (2003), 2913.

[25] Y. Aoubdia, Thèse doctorat, Université de Constantine, Algérie, (2011).

[26] S. Esmaeili, D. J. Lloyd et W. J. Poole, Acta. Mater. 51 (2003), 3467.

[27] C. Cayron, L. Sagalowicz, O. Beffort, P. A. Buffat, Phil. Mag, 79(11) (1999), 2833.

[28] F.D. GEUSER. Thèse de doctorat, Université de ROUEN (2005).

[29] A. Fattah, N. Afifiy, High Temp - High Press, 31 (1999) 613.

[30] C. Cayron, P. A. Buffat, Acta Mater, 48 (2000) 2639.

[31] S. J. Andersen, C. D. Marioara, A. Froseth, R. Vissers, H.W. Zandbergen, Mater. Sci. Eng.A, 390 (2005), 127.

[32]Y. Murakami, Structure and Proprietes of Nanoferrous Alloys, (1996),196.

[33] G. A. Edwards, K. Stillep, G. L. Dunlop, M. J. Couper,Acta.Mate, 46(11) (1998), 3893.

[34] S.J.Andersen, H.W.Zandbergen, J.Jansen, C.traeholt, U.Tundal et O.Reiso, Acta Mater, 46 (1998), 3283.

[35] T. Abid, Thèse Doctorat, Université Constantine 1, Algérie, (2014).

[36] D. Vaumousse, A. Cerezo, P. J. Warren, S. A. Court, Mater. Sci. Forum, 396-402 (2002), 693.

[37] S. Esmaeli, L. M. Cheng, A. Deschamps, D. J. Lloyd, W. J. Poole, Mater. Sci.Eng. A, A 319-321 (2001), 461.

[38] F. Dimier, Thèse Doctorat, L'école nationale supérieure Des Mines, Paris, (2003).

[39] H. Belghit, H. Farh, T. Ziar, M. Zidani, M. Guemini, Arch. Metall. Mater, 63 (4) (2018) 1643.

[40] A. Gaber, M. A. Gaffar, M. S. Mostafa, and E. F. A. Zeid, J. of Alloy Compd**.** 429 (1–2), ,(2007) 167.

[41] S. Esmaeili, X. Wang, D.J. Lloyd, W.J. Poole, Metallurgical and Materials Transactions. 34(A), (2003) 751.

[42] K. Matsuda, S.Taniguchi, K.Kiod, Y.Uetani, S. Ikeno, Mater. Trans, 43(11) (2002) 2789.

[43] K. Djabri, Mémoire de master, Université de Tébessa, Algérie. (2016).

[44] A. Chaouaf et l. Trabelssi, Mémoire de master, Université de Tébessa, Algérie. (2017).

قائمة الملاحق

الملحق

Fiche A.S.T.M de l'aluminium

Name and formula

Reference code:	00-004-0787
Mineral name:	Aluminum, syn
PDF index name:	Aluminum
Empirical formula:	Al
Chemical formula:	Al

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225

a (A°):	4,0494
b (A°):	4,0494
c (A°):	4,0494
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	90,0000

Calculated density (g/cm^3):	2,70
Volume of cell (10^6 pm^3):	66,40
Z:	4,00
RIR:	3,62

Subfiles and Quality

Subfiles:	Inorganic Mineral Alloy, metal or intermetalic Common Phase Educational pattern Explosive Forensic NBS pattern Pigment/Dye
Quality:	Star (S)

Comments

Color:	Light gray metallic
General comments:	Mineral species of doubtful validity, *Am. Mineral.*, **65** 205 (1980).
Sample preparation:	The material used for the NBS sample was a melting point standard sample of aluminum prepared at NBS, Gaithersburg, Maryland, USA.
Analysis:	The chemical analysis (%): Si 0.011, Cu 0.006, Fe 0.007, Ti 0.0001, Zr 0.003, Ga 0.004, Mo 0.00002, S 0.0001, Al 99.9+ (by difference).
Additional pattern:	See ICSD 64700 (PDF 01-085-1327).
Temperature:	Pattern taken at 25 C.

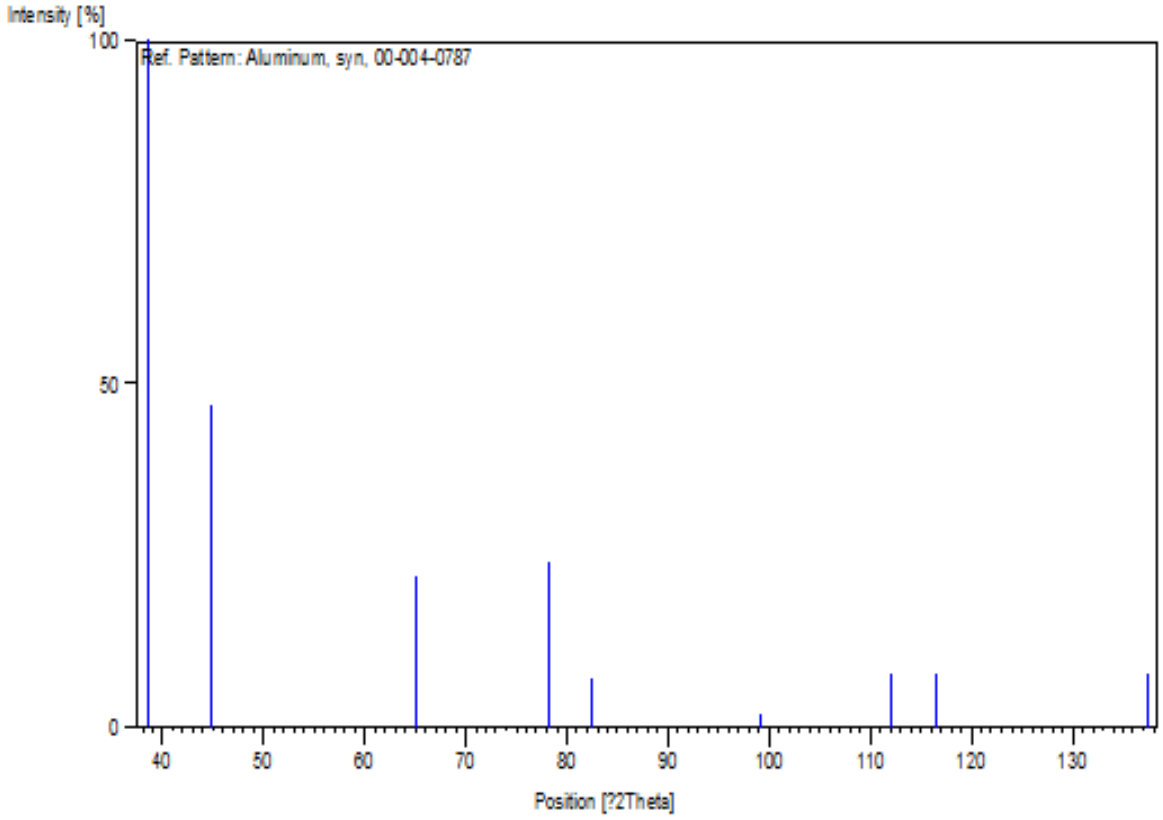
References

Primary reference: Swanson, Tatge., *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539*, **I**, 11, (1953)

Peak list

No.	h	k	l	d [A]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2,33800	38,473	100,0
2	2	0	0	2,02400	44,740	47,0
3	2	2	0	1,43100	65,135	22,0
4	3	1	1	1,22100	78,230	24,0
5	2	2	2	1,16900	82,438	7,0
6	4	0	0	1,01240	99,081	2,0
7	3	3	1	0,92890	112,046	8,0
8	4	2	0	0,90550	116,574	8,0
9	4	2	2	0,82660	137,463	8,0

Stick Pattern



المُلخص

الملخص:

يهدف العمل الذي قدمناه في هذه المذكرة إلى دراسة تأثير العناصر المضافة مثل النحاس والفرط في السيليكون على البنية المجهرية والخصائص الميكانيكية لثلاثة سبائك من الألومنيوم Al–Mg–Si (السلسلة6000). وكذلك تأثير المعالجات الحرارية على الصلادة. ولمتابعة تأثير هذه المعالجات الحرارية على البنية المجهرية ومراحل الترسبات، إستخدمنا العديد من التقنيات التجريبية مثل: المجهر الضوئي، إختبار الصلادة (HV) وحيود الأشعة السينية (XRD).

يمكن تلخيص النتائج الرئيسية للمذكرة على النحو التالي:

- ✓ إضافة النحاس إلى سبائكAl–Mg–Si يجعل الحبيبات دقيقة ويزيد من صلادة السبائك.
- ✓ إضافة السيليكون إلى سبائك الألمنيوم يسرع حركة الترسبات.
- ✓ مراحل الترسبات المتحصل عليها في السبائك الثلاثة المدروسة هي كما يلي:

1. السبيكة التي تحتوي على فرط في السيليكون

$$(SSS) \longrightarrow \text{zones GP} \longrightarrow \beta'' \longrightarrow \beta' \longrightarrow \beta\ (Mg_2Si)$$

2. السبيكة التي تحتوي على النحاس

$$(SSS) \longrightarrow \text{zones GP} \longrightarrow (\beta'' + \beta') \longrightarrow \beta\ (Mg_2Si)$$

3. السبيكة التي لا تحتوي على النحاس وعلى الفرط في السيليكون

$$(SSS) \longrightarrow \text{zones GP} \longrightarrow (\beta'' + \beta') \longrightarrow \beta\ (Mg_2Si)$$

Résumé

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire a pour but essentield'étudier les effetsdes éléments addition tel que, le cuivre et l'excès du siliciumsur la microstructure et les propriétés mécaniquedes troisalliages d'aluminium Al-Mg-Si (série6000).Ainsi que, l'influencedes traitements thermiques sur la microdureté. Pour suivre l'effet de ces traitementsthermique sur la microstructure et la séquence de précipitation nous avons utilisé plusieurs techniques expérimentales tel que: la microscopie optique, la microdureté (Hv) et ladiffraction des rayons X (DRX).

Les principaux résultats du mémoire peuvent se résumer de la manière suivante:

- ✓ L'addition du cuivre aux alliages d'Al-Mg-Si affine la taille des grains et augmente-la dureté.
- ✓ L'addition de silicium aux alliages d'aluminium accélère la cinétique de la précipitation.
- ✓ La séquence de précipitation obtenue dans les trois alliages étudiés est comme suit :

1. l'alliage contenant l'excès du silicium :

(SSS) $\longrightarrow$ zones GP $\longrightarrow$ β" $\longrightarrow$ β' $\longrightarrow$ β (Mg_2Si)

2. l'alliage contenant le cuivre :

(SSS) $\longrightarrow$ zones GP $\longrightarrow$ (β" +β') $\longrightarrow$ β (Mg_2Si)

3. l'alliage sans cuivre et sansexcès du silicium :

(SSS) $\longrightarrow$ zones GP $\longrightarrow$ (β" + β') $\longrightarrow$ β (Mg_2Si)

Abstract

The work that we presented in this memoir essential aim to study the effects of the addition elements such as, the copper and the excess of the silicon on the microstructure and the mechanical properties of three Al-Mg-Si aluminum alloys (6000 series). As well as, the effect of heat treatments on the micro-hardness. To follow the effect of these heat treatments on the microstructure and the precipitation sequence, several experimental techniques have been used such as: optical microscopy, microhardness (Hv) and X-ray diffraction (XRD).

The main results of the memoir can be summarized as follows:

- ✓ The addition of copper to Al-Mg-Si alloys refines the grain size and increases the hardness.
- ✓ The addition of silicon to the aluminum alloys accelerates the kinetics of the precipitation.
- ✓ The precipitation sequence obtained in the studied alloys is as follows:

1. The alloy containing excess silicon:

(SSS) $\longrightarrow$ zones GP $\longrightarrow$ β" $\longrightarrow$ β' $\longrightarrow$ β (Mg_2Si)

2. The alloycontainingCopper :

(SSS) $\longrightarrow$ zones GP $\longrightarrow$ (β" + β') $\longrightarrow$ β (Mg_2Si)

3. The alloy without copper and without excess silicon:

(SSS) $\longrightarrow$ zones GP $\longrightarrow$ (β" + β') $\longrightarrow$ β (Mg_2Si)