

تأثير شروط عملية الصب والمجانسة لسبائك الألمنيوم 6xxx على البنية المجهرية والقساوة الميكروية واستجابتها للتقسية بالتعتيق الصناعي

محمود عبد الغفور القادري^{1*} مهلب الداود²

*. طالب دكتوراه - قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة دمشق.

MahmoudAlqadri@damascusuniversity.edu.sy

². أستاذ مساعد، مهندس، دكتور، قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية -

جامعة دمشق. MohallabAldawood@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

إن نسب العناصر الكيميائية الموجودة في السبيكة هي المؤثر الرئيسي في بنيتها، حيث تعد البنية المجهرية أهم العوامل المؤثرة على الخواص الميكانيكية النهائية لسبائك الألمنيوم. وتم في هذا البحث صب عينات من سبائك الألمنيوم بطريقة التبريد المباشر باستخدام قالب أسطواني من الفولاذ الإنشائي ST37 صب ضمنه الألمنيوم المصهور، وقد استخدم سكراب من سبائك الألمنيوم 6xxx معلومة التركيب الكيميائي، وتمت عمليات الصب وفق ثلاث حالات: - الحالة (1): القالب بارد ومطلي بطبقة من الزيت الصناعي.

- الحالة (2): القالب مسخن مسبقاً للدرجة 350°C قبل عملية الصب.

- الحالة (3): القالب مسخن مسبقاً للدرجة 700°C قبل عملية الصب.

حيث تم في المرحلة الأولى: تنفيذ عمليات الصب للحالات الثلاث السابقة، ومن ثم تحضير عينات من المصبوبات الثلاثة لإجراء التحليل الكيميائي باستخدام مطياف الكتلة، حيث أظهرت العينة الأولى احتوائها على السيلكون 0.61% والمغنيزيوم 0.53% والحديد 0.53% والنحاس 0.234% والكروم 0.35%، واحتوت العينة الثانية على المغنيزيوم 0.6% والسيلكون 0.51% والحديد 0.22%، فيما احتوت العينة الثالثة على نسبة قليلة جداً من المغنيزيوم أقل من 0.1% ونسبة السيلكون 0.53% ونسبة من المنغنيز 0.338% والكروم 0.153%.

وتم الكشف على البنية المجهرية لها باستخدام المجهر الضوئي حيث تبين احتوائها على الطور بين المعدني الشبيه بالإبري غير المستقر β - Al Fe Si ورأسب سيليكات المغنيزيوم Mg_2Si ، وعند قياس القساوة الميكروية لهذه العينات لحالة الصب تراوحت قيم القساوة للحالة الأولى 67 HV وللحالة الثانية 68 HV وللحالة الثالثة 69 HV.

وفي المرحلة الثانية: تم تنفيذ عمليات معالجة حرارية بالمجانسة من أجل الحصول على بنية متجانسة بشكل أفضل، حيث تم إخضاع العينات للتسخين للدرجة 580°C والإبقاء لمدة 6 h وبعدها تم التبريد بالماء لدرجة حرارة الغرفة، وعند الكشف على البنية المجهرية باستخدام المجهر الضوئي ظهر تحول جزء من الأطوار بين المعدنية إلى أطوار أكثر استقراراً α - Al Fe Si لها وأرتفعت قيم القساوة الميكروية للحالة الأولى 96 HV و للحالة الثانية 90 HV و للحالة الثالثة 102 HV.

وفي المرحلة الثالثة: فمن أجل التحقق من استجابة العينات بعد المعالجة بالمجانسة للتقسية بالتعتيق الصناعي تم إخضاعها لتجربة تقسية بالتعتيق بالدرجة 200°C والإبقاء لمدة 6 h وبعدها تركت لتبرد لدرجة حرارة الغرفة بدون أي وسيط تبريد، وبعد ذلك تم الكشف على البنية المجهرية لها باستخدام المجهر الضوئي وتراوحت قيم القساوة الميكروية للحالة الأولى 72HV و للحالة الثانية 76 HV و للحالة الثالثة 64 HV.

الكلمات المفتاحية: سبائك 6XXX - الطور بين المعدني - الصب بالتبريد المباشر المجانسة - التعتيق الصناعي.

تاريخ الإيداع: 2023/6/18

تاريخ القبول: 2023/8/7



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب CC BY-NC-SA

Effect of Casting and Homogenizing Process Conditions for Aluminum Alloy 6xxx on the Microstructure, Microhardness and their Response to Artificial Aging

Mahmoud Abdlghfor Alqadri*¹ Mohallab Aldawood²

*1. PHD student , Department of Mechanical Design Engineering ,Faculty of Mechanical and Electrical Engineering ,Damascus university ,Damascus, Syria.

MahmoudAlqadri@damascusuniversity.edu.sy

². Asst. Prof, Dr, Department of Mechanical Design Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus university, Damascus, Syria.

MohallabAldawood@damascusuniversity.edu.sy

Abstract:

The proportions of the chemical elements present in the alloy are the main influence on its structure, as the microstructure is the most important factor affecting the final mechanical properties of aluminum alloys.

In this research, samples of aluminum ingots were cast by the direct cooling method using a cylindrical mold of structural steel ST37. Molten aluminum was poured into it. Scraps of aluminum alloys 6xxx with known chemical composition were used.

Casting operations were carried out according to three cases:

- Case (1): The mold is cold and coated with a layer of synthetic oil.
- Case (2): The mold is preheated to 350°C before the casting process.
- Case (3): The mold is preheated to 700°C before the casting process.

In the first stage, casting operations were carried out for the three previous cases, and then samples were prepared from the three castings to conduct chemical analysis using mass spectrometry, as the first sample showed that it contained 0.61% silicon, 0.53% magnesium, 0.53% iron, 0.234% copper, and 0.356% chromium, second sample contained 0.6% magnesium, 0.51% silicon, and 0.22% iron, while the third sample contained a very small percentage of magnesium less than 0.1%, 0.53% silicon, 0.338% manganese, and 0.153% chromium.

The microstructure was detected, it was found using a light microscope, as it was found to contain the unstable needle-like intermetallic phase (β -Al Fe Si) and a magnesium silicate Mg_2Si precipitate, when measuring the microhardness of these samples for the casting condition, the hardness values ranged for the first case 67 HV, for the second case 68 HV, and for the third case 69 HV.

In the second stage: heat treatment processes were carried out by homogenization in order to obtain a better homogeneous structure, where the samples were subjected to heating to 580°C and kept for 6 h, after which they were cooled with water to room temperature, and the microstructure was detected using light microscopy, where a part transformation appeared from intermetallic phases to more stable α -Al Fe Si phases, the microhardness values ranged for the first case 96 HV, for the second case 90 HV, and for the third case 102 HV. And in the third stage: to verify the response of the samples after treatment by homogenization to hardening by artificial aging, they were subjected to a hardening by aging experiment at 200°C and kept for 6h, after which they were left to cool to room temperature without any cooling medium, and then their microstructure was detected using light microscopy, and the hardness values ranged of the first case was 72 HV, for the second case it was 76 HV and for the third case it was 64 HV.

Key words: Alloy 6xxx – Intermetallic phase - Homogenizing- Direct Cooling Casting – Artificial aging.

Received: 18/6/2023

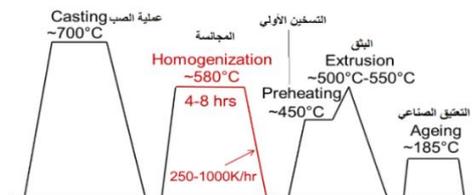
Accepted: 7/8/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a **CC BY- NC-SA**

المقدمة:

حيث يضاف كل من المغنيزيوم بنسبة تتراوح بين (0.61-1.2%) والسيلكون بين (1.3%-0.4%) إلى الألمنيوم لتكوين سبائك 6xxx، وفي جميع الأحوال يجب أن تكون كمية السيلكون والمغنيزيوم المضافة كافية لتكوين الأطوار شبه المستقرة، ويضاف الكروم والمغنيز لزيادة التحكم بالمتانة وحجم الحبيبات، وكما أن إضافة النحاس تزيد من مقاومة هذه السبائك ولكن زيادتها بنسبة أكثر من 0.5% تؤدي إلى تدهور مقاومة السبائك للتآكل، وكما أنه يتم إضافة الرصاص البزموت لتحسين خواص التشغيل.



الشكل (1) مخطط يظهر تسلسل العمليات الأساسية لعملية بثق الألمنيوم

1-1 تأثير الإضافات السبائكية على المعالجة الحرارية

لسبائك الألمنيوم 6xxx: [2]

بشكل عام لا يوجد أي تمازج miscibility في الحالة الصلبة للعناصر مع الألمنيوم، ولكن هناك حالات خاصة للعناصر التالية: - الزنك - الفضة والليثيوم - الفاليوم والجرمانيوم والنحاس والسيلكون

وتكون أكبر قابلية انحلال في الحالة الصلبة للألمنيوم في درجة حرارة اليوتكتيك eutectic، وتنخفض حدود قابلية الانحلال مع تناقص درجة الحرارة كما يظهر الشكل (2).

والعناصر التي تعطي زيادة في المتانة خصوصاً عندما تجتمع التقسية بالانفعال من خلال التشكيل على البارد أو بالمعالجة الحرارية أو مع كليهما هي: النحاس والمغنيزيوم والمغنيز والسيلكون والزنك.

تعدُّ سبائك السلسلة السادسة من الألمنيوم 6xxx من السبائك المشكّلة (الطروقة) والعناصر السبائكية الأساسية لها هي (AL - Mg - Si)، حيث تملك هذه السبائك مجموعة قابلية تشكيل الأشكال المعقدة والمجوفة، بالإضافة إلى أن هذه السبائك ذات متانة متوسطة مع مظهرها الجمالي وجودة السطح النهائي، علاوة على تمتعها بالمواصفات الأساسية لسبائك الألمنيوم، وذلك من حيث الناقلية الكهربائية الجيدة وقابلية اللحام ومقاومة التآكل وسهولة المعالجة الحرارية [1]، ويظهر الشكل (1) المراحل الأساسية لتصنيع الألمنيوم بالبتق.

وتستخدم هذه السبائك كمادة إنشائية متوسطة المتانة وهي ذات مقاومة جيدة للتآكل في الظروف الجوية ومعظم الأجواء الصناعية وحصانة قوية ضد الشقوق الناتجة عن التآكل الإجهادي stress corrosion cracking.

- وكما تقسم سبائك AL - Mg - Si إلى ثلاث مجموعات:

المجموعة الأولى: تحتوي على كميات متوازنة من المغنيزيوم والسيلكون أقل من 1.2% مثال (6063)، فهذه السبائك تتمتع بمستوى منخفض من حساسية السقاية low quench sensitivity وسرعة التبريد الحرجة، بحيث المقاطع الرقيقة ليس من الضروري أن تسقى بالماء، ولكن يمكن تبريدها بالهواء.

المجموعة الثانية: تحتوي على إضافات من المغنيزيوم والسيلكون أكثر من 1.2%، ويمكن أن يتم إضافة عناصر أخرى مثل 0.3% Cu، ومثال (السبيكة) 6061، التي تتطلب معالجة بالانحلال بدرجة حرارة مرتفعة وذات حساسية للسقاية أكثر من المجموعة الأولى.

المجموعة الثالثة: تحتوي على كمية من Mg₂ Si حيث تتداخل المجموعة الأولى والثانية، ولكن تحتوي على سيلكون فائض بشكل كبير، الخليطة 6005 هي مثال على السبائك ذات السيلكون الإضافي.

الإقادي، الداؤد

تأثير شروط عملية الصب والمجانسة لسبائك الألمنيوم 6xxx على البنية المجهرية

للسبيكة بسبب قابلية التشكيل المنخفضة الناتجة عن تشكيل

الدقائق المعزولة، والجزئيات المونوكلنيكية $\beta - AlFeSi$

الشحيرية (الندريئية)، وكما يوجد مذاب معزول solute

segregation في الفراغات غير المنتظمة التوزع داخل بنية

السبيكة وحدود الحبيبات، ولذلك فهو يتطلب تحويل الجزئيات

المونوكلنيكية غير المستقرة وبين- المعدنية $\beta - AlFeSi$

إلى جزئيات أكثر استقراراً هي $\alpha - Al Fe Si$ والتي ليس لها

تأثير ضار على قابلية البثق للسبيكة[3].

1-3- عملية المجانسة: [4]

تتضمن المجانسة تسخين مصبوبات الألمنيوم بعد الصب إلى

درجات حرارة مرتفعة يتشكل عندها المحلول المتجانس ضمن

الألمنيوم ويتم الإبقاء عليها في درجة الحرارة هذه لفترة طويلة

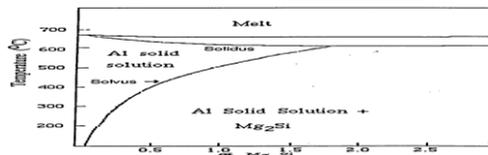
للسماح للسبيكة بالتجانس بشكل فعال ومن ثم تتبع بالتبريد،

وتتم هذه العملية للتخفيف من النتائج غير المقبولة لعملية

الصب من حيث الجودة وقابلية التشكيل المنخفضة، وإن درجة

حرارة المجانسة للبليت لبعض سبائك الألمنيوم أعطيت في

الجدول (1).



الشكل (3) انحلالية Mg_2Si في الألمنيوم

فالمجانسة تؤدي إلى هيكل متجانس مع توزع منتظم للمكونات

المختلفة من $Al - Fe - Si$ ، والذي يجعل عملية البثق أكثر

سهولة، لأن الطور $\beta - Al Fe Si$ غير قابل للذوبان وله

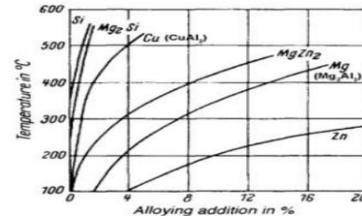
تأثيرات متعددة على قابلية العمل على الساخن والخواص

الميكانيكية النهائية أيضاً، بالإضافة إلى أن سلوك التشكيل

يعتمد على محتوى Mg و Si في المحلول الصلب ومعدل

التبريد بعد عملية المجانسة.[5].

1-4- النقسية بالتعتيق لسبائك الألمنيوم:



الشكل (2) تغير انحلالية العناصر المضافة إلى الألمنيوم مع تغير درجة الحرارة

1-2- تغيرات البنية المجهرية خلال صب البليت:

1-عملية الصب:

تتأثر خواص المصبوبات بعملية القولبة المستخدمة وخواص

مادة القالب، فبعد الصب يحدث تبريد المعدن المصهور عبر

جدران القالب، وهذا يؤدي إلى تشكل طبقة رقيقة من السطوح

البينية (القالب/ المعدن) خلال عملية التجمد، وكما أن سطوح

القالب الخشنة ستسبب انخفاض في معامل الانتقال الحراري

عبر هذه السطوح.

ويعتمد معدل التجمد rate of freezing على معدل انتقال

الحرارة من المصهور إلى القالب، والخواص الحرارية للمعدن

ومعدل التصلب (يتم التحكم به من خلال الشكل الهندسي

للقالب).

الصب بالتبريد المباشر: direct chill (DC) casting

process حيث يصب المعدن المنصهر من بوتقة الفرن داخل

قالب ذي مقطع مجوف، ويحدث التبريد باللامسة مع جدران

القالب، ومن ثم تتعرض البليت المصبوبة لمياه التبريد فور

خروجه من القالب.

وتتميز البنية المجهرية للبليت المصبوب as-cast billet عادة

من خلال وجود المناطق الدقيقة المعزولة micro-segregated

regions بين الشبكات الالندريئية للألمنيوم والتركيز المتدرج

للمغنيزيوم والسيلكون.

فالحديد العديم الذوبان insoluble Fe في سبائك Al-Mg-Si

يتحد مع السيلكون والألمنيوم ليشكل جزئيات الطور الثانوي

المعدني المستقر $Al - Fe$ والطور غير المستقر $\beta -$

$Al Fe Si$ ، والتي تتمتع بتأثير عكسي على قابلية البثق

تأثير شروط عملية الصب والمجانسة لسبائك الألمنيوم 6xxx على البنية المجهرية الاقادي، الداود

يتم إعادة تسخين عناصر سبيكة الألمنيوم لما يعادل 40% من درجة حرارة التصلب Solidus temperature من أجل التعتيق الصناعي قبل أن يتم تبريدها لدرجة حرارة الغرفة مرة أخرى، بغرض الحصول على البنية المجهرية والخواص الميكانيكية المطلوبة للعناصر النهائية لتحسين سلوكها خلال الاستثمار.

حيث أن البنية المجهرية تكون محتوية على الطور الأولي α - Al واليوتكتيك Al - Si، وبالنسبة لعناصر المغنيزيوم والنحاس فتتواجد في الطور α - Al كمحلول صلب أو تترسب كأطوار بين- معدنية مثل Mg_2Si و Al_2Cu .

وكننتيجة للتسخين الأولي والبتق المتبع بالسقاية بالهواء المضغوط خلال مراحل التصنيع بالبتق (أو المعالجة الحرارية بالانحلال في حالات أخرى) يتشكل محلول صلب فائق

ss atomic clusters \rightarrow GP \rightarrow β'' (Mg_5Si_6) needles
 \rightarrow β' ($Mg_{1.7}Si$) rods
 \rightarrow β (Mg_2Si) plates

--

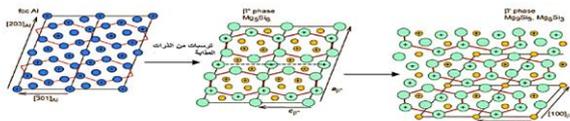
الجدول (1) القيم الاسمية من أجل مجانسة البليت لبعض سبائك الألمنيوم

5454-5456	5083-5086	5052	2014-2024	1100	1060	السبيكة
1022-1040 (550-560)	968-1004 (520-540)	1022-1040 (550-560)	896-914 (480-490)	1076-1112 (580-600)	1040-1076 (560-580)	درجة حرارة المجانسة [°F][°C]
12	12	12	12	6	6	زمن الإبقاء [h]
7075-7079	7001	6463	6101	6063	6061	السبيكة
878-896 (470-480)	860-896 (460-480)	1040-1076 (560-580)	1040-1076 (560-580)	1040-1076 (560-580)	1040-1058 (560-570)	درجة حرارة المجانسة [°F][°C]
12	12	6	6	6	6-8	زمن الإبقاء [h]

3- الرواسب المعدنية β'' : أطوار انتقالية ذات بناء مونوكلينيكي (البناء β'') وتكون متماسكة مع هيكل الألمنيوم.

4- الرواسب المعدنية β' : وهي قضبان تنمو داخل هيكل الشبكي β' وتكون نصف متماسكة مع هيكل الألمنيوم.

5- الأطوار المتوازنة $Mg_2Si - \beta$: راسب مستقر وهو المسؤول عن متانة السبائك المعتقة وتكون غير مرتبطة بهيكل الألمنيوم.



الشكل (4) الأطوار المترسبة المختلفة والأطوار الانتقالية التي تحدث خلال سلسلة الترسيب

وتتم عملية التعتيق الصناعي لسبائك 6xxx بوضع العناصر المشكلة بالبتق في الفرن بدرجة حرارة $0c(220 - 175)$ حيث يتم تسريع نمو الرواسب وينتج بذلك زيادة في المتانة، ويحدث الترسيب بالترتيب التالي [6]:

1- تتشكل عناقيد الذرات -المونوكلينيكية من ذرات Mg و Si الموجودة في المحلول الصلب والذي يتبعه نمو لهذه العناقيد.

2- مناطق Guinier-Preston (مناطق GP): وهي أطوار معدنية من Al و Mg و Si تظهر في هيكل الألمنيوم FCC، وتكون كروية ناعمة جداً قياساً بالمناطق الغنية جداً بالمذابات التي تعيق حركة للانخلاعات.

تأثير شروط عملية الصب والمجانسة لسبائك الألمنيوم 6xxx على البنية المجهرية الاقادي، الداود

إن ذروة المتانة هي المتانة العظمى التي نحصل عليها من خلال التعتيق وبعد هذه النقطة فإن الأطوار β المتوازنة سوف تصل إلى ما يسمى فرط التعتيق الذي يعطي فقد بالمتانة بسبب النمو المستمر للجزيئات وتطور الأطوار β' و β ، وتكبر الجزيئات بشكل كبير جداً لتقص وبذلك ستتجاوزها الانخلاعات المتحركة خلال المادة.

2- الدراسات المرجعية:

1- تأثير التركيب الكيميائي للسبيكة على سلوك الاستجابة للتقسية بالتعتيق:
- فقد وجد [7] Ceresara et al. أن الزيادة بالسيلكون عن المطلوب لتشكيل Mg_2Si له تأثير على الطاقة الحركية للتعتيق للسبيكة $Al-Mg-Si$ ، فزيادة السيلكون تخفض قابلية الذوبان للأطوار Mg_2Si و زيادة الإشباع الممتاز للسبيكة بالإضافة لتحسين كثافة المناطق GP.

- ودرس [8] Ding et al. تأثير إضافة الزنك على سلوك استجابة التعتيق لسبيكة $Al-Mg-Si$ ، فمع زيادة الزنك يتسرع سلوك استجابة للتقسية بالتعتيق وينسب ذلك إلى الأطوار المستقرة $MgZn_2 - \eta$ وتسريع تشكل الراسب من الأطوار التي تمت تقويتها $Mg_2Si - \beta$.

2- تأثير عملية المجانسة على الاستجابة للتقسية بالتعتيق:

قام [9] Zajac et al. بدراسة تأثير معدلات التبريد على الخواص الميكانيكية النهائية لسبائك 6082 و 6005، حيث وجد أن الطور $\beta(Mg_2Si)$ يترسب بشكل سريع خلال التبريد بعد المجانسة ومقدار توزع الطور $\beta(Mg_2Si)$ يعتمد على نمط التبريد، وتظهر الرواسب المتفرقة الدقيقة ضمن البنية المجهرية للعينات التي تم تبريدها بالهواء المضغوط.

قام [10] Reiso بدراسة تأثير معدلات التبريد على قابلية البثق لسبائك الألمنيوم $AL-Mg-Si$ متغيرة التركيب الكيميائي، حيث وجد أن قابلية البثق تتأثر بشكل كبير بنسبة المكونات السبائكية (السيلكون والمغنيزيوم)، حيث يخفض السيلكون من قابلية البثق

عند ما تكون نسبة السيلكون قليلة وزيادة نسبة المغنيزيوم عن 0.5% يكون له تأثير سيئ على قابلية البثق.

وقام [11] Biroi بدراسة تطور البنية المجهرية لسبيكة 6063 خلال المجانسة لدورات حرارية مختلفة، حيث وجد أن الإبقاء لمدة 6h في الدرجة $580^\circ C$ والتي تتبع بالتبريد للدرجة $300^\circ C - 250^\circ C$ هي الطريقة الأمثل لتشكيل المحلول الصلب للألمنيوم دون تشكل جزيئات Mg_2Si الخشنة المستقرة.

ودرس أيضاً [12] Cai et al. انحلال مركب Mg_2Si خلال المجانسة من خلال دراسة المقاومة الحرارية وتوزع العناصر السبائكية بالمجهر الإلكتروني الماسح، وذلك من خلال محاكاة عملية الصب والمجانسة لسبائك 6xxx حيث وجد أن المجانسة تؤدي لتتقية حدود الحبيبات و تساهم في تصغير حجم المتفرقات.

وقام [13] Usta et al. بدراسة حركة الانحلال / التخشن لجزيئات Mg_2Si خلال إعادة التسخين للمواد المجانسة،

3- مواد البحث وطرقه:

3-1 - منهجية البحث:

تم تنفيذ عملية الصب بالتبريد المباشر من خلال استخدام قالب معدني اسطواني الشكل ($d=35mm, 100 \times 1.5mm$) حيث استخدم سكراب الألمنيوم من سبائك 6xxx المشكلة بالبثق و المدرفلة من مصادر مختلفة (ألمنيوم التطبيقات الصناعية - ألمنيوم التطبيقات التزنية)، حيث تم قصها ووضعها ضمن بوتقة صهر سيراميكية نوع مولاييت مبينة بالشكل (5)، و بعد ذلك وضعت في الفرن المبين في الشكل (6).

حيث تم تنفيذ العمليات التالية:

عمليات الصب: وفق ثلاث حالات مبينة بالجدول (2) والشكل (7).

المعالجة الحرارية بالمجانسة: التسخين للدرجة $580^\circ C$ و الإبقاء لمدة 6h ومن ثم التبريد بالماء.

تأثير شروط عملية الصب والمجانسة لسبائك الألمنيوم 6xxx على البنية المجهرية الاقادي، الداود

التقسية بالتعتيق الصناعي بعد المجانسة: التعتيق الصناعي في الدرجة 200°C ولمدة 6 ساعات ومن ثم التبريد داخل الفرن إلى درجة حرارة الغرفة.

3-2- نتائج التجارب ومناقشتها:

3-2-1 التحليل الكيميائي: تم إجراء تحليل التركيب الكيميائي للعينات المصبوبة باستخدام جهاز التحليل الكيميائي " مطياف الكتلة " SPECTRO MAX الذي يظهر في الشكل (9) وأدرجت النتائج في الجدول (3).

ومن خلال نتائج التحليل الكيميائي نجد:

1- السبيكة رقم 1: تحتوي على كميات من السيلكون 0.61% وعلى المغنيزيوم 0.53% وهذا يعني أننا سنحصل على فائض في السيلكون عن المطلوب لتشكيل المركب Mg₂Si وكما أنه يوجد كمية من الحديد 0.53% ونسبة من النحاس 0.234% والكروم 0.356%.

الجدول(2) شروط الصب والمعالجة الحرارية بالمجانسة و التقسية بالتعتيق للحالات الثلاث المدروسة

الحالة	درجة حرارة مصهور الألمنيوم		درجة حرارة القالب		آلية التبريد بعد الصب	المعالجة الحرارية بالمجانسة			المعالجة الحرارية بالتعتيق		
	درجة حرارة الفرن [°C]	درجة حرارة بوتقة الصهر [°C]	المادة	درجة الحرارة [°C]		درجة الحرارة [°C]	زمن الإبقاء [h]		درجة الحرارة [°C]	زمن الإبقاء [h]	
							تسخين	إبقاء		تسخين	إبقاء
1	1000	850	ST37	20	ضمن حوض الماء	580	1	6	200	0,5	6
2	1000	850	ST37	350	ضمن حوض الماء	580	1	6	200	0,5	6
3	1000	850	ST37	700	ضمن حوض الماء	580	1	6	200	0,5	6

الجدول(3) نسب العناصر الكيميائية للعينات المدروسة

	Si %	Mg %	Fe%	Cu%	Mn%	Cr%	Ni%	Zn %	Ti %	Zr %	AL %
1	0.61	0.53	0.53	0.237	0.065	0.356	0.062	>0.264	0.109	0.023	96.6
2	0.51	0.6	0.221	0.031	0.033	0.014	0.05	0.264	0.082	0.019	97.5
3	0.88	0.62	0.0053	0.001	0.338	0.153	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.98



الشكل (6) الفرن المستخدم في عملية الصهر نوع BARFIELD المطيلية بسبب زيادة تشكل الرواسب الشبيه بالإبر الخشنة الكبيرة $\beta - Al Fe Si$ في البنية المجهرية للسبائك [15].



الشكل (9) جهاز مطياف الكتلة



الشكل (10) المجهر الضوئي

وأما الإضافات من المنغنيز والكروم والزركونيوم فتصد تأثير السيلكون الذي يؤدي لهشاشة حدود الحبيبات من خلال منع إعادة التبلور خلال المعالجة بالانحلال. بينما يزيد النحاس تأثير إجهادات التقسية ويزيد أيضا المتانة في المعالجة T_6 ، أما الرصاص والبيزموت فيتم إضافتهما لتحسين خواص التشكيل.

2-2-2 كشف البنية المجهرية للعينات:

تم شحذ العينات بورق الزجاج مع الماء حتى الدرجة (2000) ومن ثم تم صقلها باستخدام جهاز الصقل الدوار مع التغذية المائية ومسحوق الألومينا Al_2O_3 ، وتم الكشف على البنية باستخدام المجهر الضوئي OLYMPU BX60 (الشكل 10)، وتم التخريش باستخدام كاشف keller's حيث وضعت العينة بالحمض لمدة 15 s.
keller's reagent (500 ml water, 12.5 ml HNO_3 , 7.5 ml HCL, 5 ml HF)



الشكل (5) يظهر البوتقة المستخدمة في صهر عناصر الألمنيوم



الشكل (7) العينات التي نفذت عمليات الصب عليها



الشكل (8) العينات بعد تجهيزها بقياسات مناسبة للفحص المجهرية وتجارب المعالجة الحرارية

حيث إن فائض Mg يخفض قابلية الانحلال العظمى لراسب Mg_2Si بدون تغير جوهري في درجة الحرارة لقابلية الانحلال العظمى.

أما فائض Si يخفض درجة حرارة قابلية الانحلال العظمى وأيضاً يخفض قابلية الانحلال الصلب، وبالرغم من أن الفائض من Si يزيد قابلية الانحلال الصلب للراسب Mg_2Si في مجالات درجات الحرارة المنخفضة، لكن زيادة السيلكون تخفض قابلية الذوبان للأطوار Mg_2Si وزيادة الإشباع الفائق للسبيكة بالإضافة لتحسين كثافة مناطق GP، وكما تزداد متانة الشد لعناصر سبائك Al-Mg-Si المصنعة بالبتق بزيادة محتوى السيلكون، مع ارتفاع المطيلية بعد البثق بسبب تأثير البلورات النقية الناتجة عن إعادة التبلور. [14]

أما زيادة محتوى الحديد Fe فتؤدي لزيادة في حد الخضوع بسبب اكتساب التقوية من خلال زيادة نسبة وجود الطور الغني بالحديد $\alpha - Al Fe Si$ في روابط حبيبات $\alpha - Al$ وانخفاض

2-2-1- تحليل التغير بالبنية المجهرية:

حيث يظهر في الشكل (11) البنية المجهرية للمصبوبات للحالة (1) وفق الشكل احتوائها على الأطوار الشبيهه بالإبرية - β Al Fe Si بنسبة كبيرة مع وجود بعض رواسب Mg_2Si بنسبة قليلة، ويلاحظ في الشكل (14) التغير في البنية المجهرية بعد عملية المجانسة بتحول البنية من الشكل الإبري للشكل الكروي الذي يملك استقراراً أكبر $\alpha - Al - Fe - Si$ مع تمييز الراسب Mg_2Si بلون أسود على حدود هذه الاطوار، ويظهر أيضاً في الشكل (17) توزيع الرواسب من الطور Mg_2Si بشكل أكثر توازناً ضمن البنية بشكل القضبان فيه بنسبة قليلة ووجوده بالشكل الصفائحي بالنسبة الأكبر.

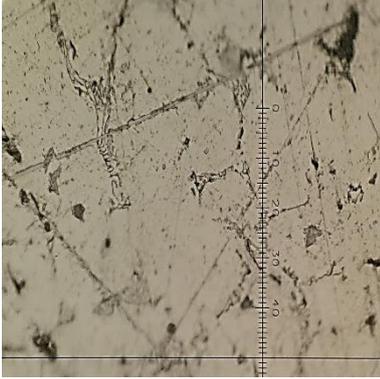
أما بالنسبة للحالة (2) من المصبوبات فيظهر في الشكل (12) احتواء البنية على الطور الشبيه بالإبري

$\beta - Al Fe Si$ مع وجود رواسب Mg_2Si بشكل مشابه للحالة (1)، ويظهر في الشكل (15) أيضاً تغير البنية المجهرية بتأثير عملية المجانسة بالتحول إلى الطور $\alpha - Al Fe Si$ أيضاً بسلوك مشابه للحالة (1)، ويظهر في الشكل (18) البنية المجهرية بعد عملية التقسية بالتعتيق حيث يظهر وجود $\beta' - Mg_2Si$ الذي يأخذ شكل القضبان بالنسبة الأكبر وفقاً لسلسلة الترسيب.

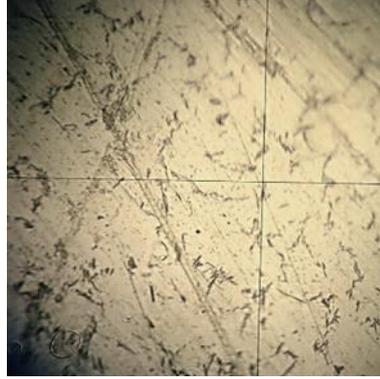
أما بالنسبة للحالة (3) من المصبوبات فإنه يظهر من الشكل (13) وجود أطوار $\beta - Al FeSi$ بنسبة قليلة والطور $\alpha - Al Fe Si$ بنسبة كبيرة، ويظهر في الشكل (16) البنية المجهرية بعد المجانسة، ويظهر فيه تحول كبير إلى الطور $\alpha - Al Fe Si$ وظهور الطور $\beta - Mg_2Si$ ، والشكل (19) يظهر البنية بعد التقسية بالتعتيق ويظهر بها نمو جزيئات الطور $\beta - Mg_2Si$ على شكل كتل سوداء.

الإقادي، الداود

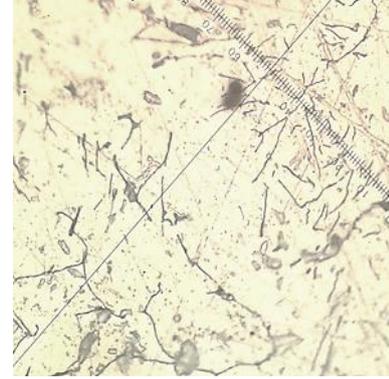
تأثير شروط عملية الصب والمجانسة لسبائك الألمنيوم 6xxx على البنية المجهرية



الشكل (13) البنية المجهرية للحالة (3)
كمصبوبة بنسبة تكبير 50x

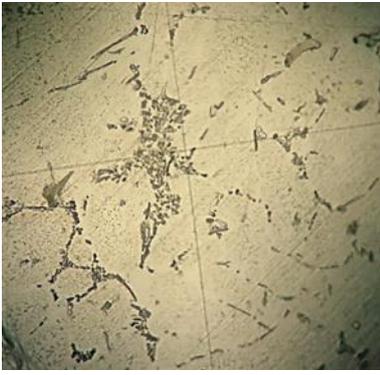


الشكل (12) البنية المجهرية للحالة (2)
كمصبوبة بنسبة تكبير 50x

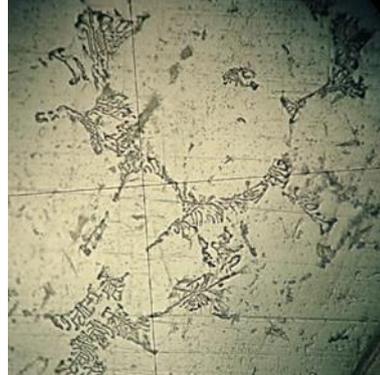


الشكل (11) البنية المجهرية للحالة (1)
كمصبوبة بنسبة تكبير 50x

حالة الصب



الشكل (16) البنية المجهرية للحالة (3)
كمجانسة بنسبة تكبير 50x

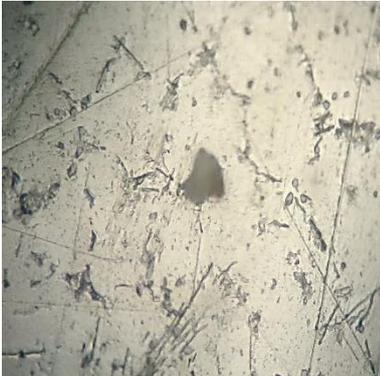


الشكل (15) البنية المجهرية للحالة (2)
كمجانسة بنسبة تكبير 50x



الشكل (14) البنية المجهرية للحالة (1)
كمجانسة بنسبة تكبير 50x

المعالجة الحرارية بالمجانسة



الشكل (19) البنية المجهرية للحالة (3)
كمعتقة بنسبة تكبير 50x



الشكل (18) البنية المجهرية للحالة (2)
كمعتقة بنسبة تكبير 50x



الشكل (17) البنية المجهرية للحالة (1)
كمعتقة بنسبة تكبير 50x

التغطية بالعتيق

3-2-3 اختبار القساوة:

تم إجراء اختبار القساوة باستخدام جهاز GALILEO durometria الشكل (20)، والحمولة المستخدمة 50 gr، وزمن تطبيق الحمولة 15s وتظهر النتائج في الجدول (4).

الإقادي، الداود

تأثير شروط عملية الصب والمجانسة لسبائك الألمنيوم 6xxx على البنية المجهرية

والعلاقة (1) هي التي تربط بين الحمولة المطبقة وقيمة قساوة

فيكرز و قطر الانغماس:

$$HV = \frac{1854.4 L}{d_m^2} \quad (1)$$

حيث: L - الحمولة المطبقة ب $grams$ و d_m - القطر

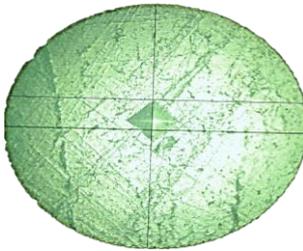
الوسطي للمضلع " الانغماس " μm .



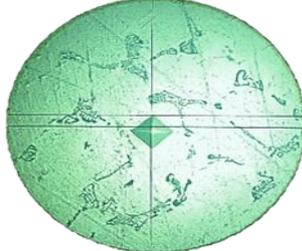
الشكل (20) جهاز قياس القساوة الميكروية

الجدول (4) قيم القساوة للحالات المدروسة

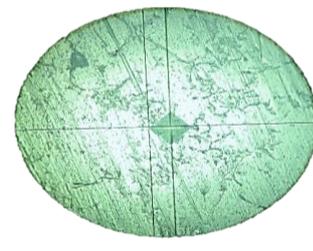
العينة المعتقة		العينة المجانسة		العينة المصبوبة		شروط التجربة			العينة
القطر الوسطي الانغماس D_m [μm]	قيمة القساوة [HV]	القطر الوسطي الانغماس D_m [μm]	قيمة القساوة [HV]	القطر الوسطي الانغماس D_m [μm]	قيمة القساوة [HV]	مدة تطبيق الحمولة [s]	الحمولة المطبقة [g]		
35.88	72	31.07	96	37.2	67	القيمة المتوسطة	15	50	الحالة 1
34.93	76	33.5	82.7	36.9	68	القيمة المتوسطة	15	50	الحالة 2
38.2	63.5	30.15	102	36.8	68.5	القيمة المتوسطة	15	50	الحالة 3



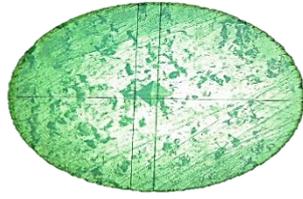
الشكل (23) أثر الهرم الماسي بنسبة تكبير 40x الحالة 1 كمعتقة



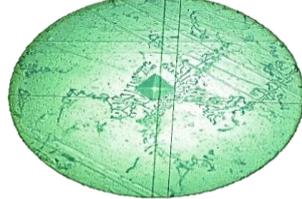
الشكل (22) أثر الهرم الماسي بنسبة تكبير 40x الحالة 1 كمجانسة



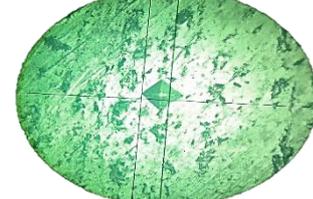
الشكل (21) أثر الهرم الماسي بنسبة تكبير 40x الحالة 1 كمصبوبة



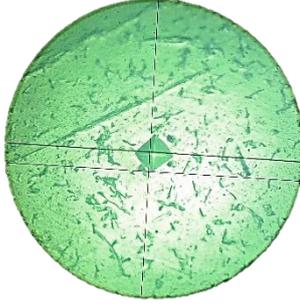
الشكل (26) أثر الهرم الماسي بنسبة تكبير 40x الحالة 2 كمعتقة



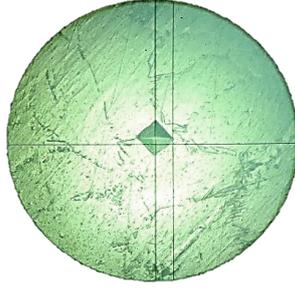
الشكل (25) أثر الهرم الماسي بنسبة تكبير 40x الحالة 2 كمجانسة



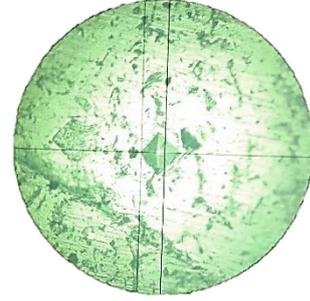
الشكل (24) أثر الهرم الماسي بنسبة تكبير 40x الحالة 2 كمصبوبة



الشكل (29) أثر الهرم الماسي بنسبة تكبير 40x الحالة 3 كمعتقة



الشكل (28) أثر الهرم الماسي بنسبة تكبير 40x الحالة 3 كمجانسة



الشكل (27) أثر الهرم الماسي بنسبة تكبير 40x الحالة 3 كمصبوبة

فائض من السليكون عن المقدار اللازم لتشكيل الراسب Mg_2Si يكون له تأثير كبير على عملية الانحلال وكذلك الأطوار الناتجة في كل من المجانسة والتعتيق.

2- إن نسبة الحديد Fe لها أثر كبير على متانة السبيكة من خلال المركبات بين-المعدنية التي يشكلها مع العناصر الأخرى الموجودة في السبيكة، بالإضافة إلى تأثير الكروم والنحاس على الخواص الميكانيكية.

3- إن درجة حرارة القالب قبل عملية الصب لها ارتباط بسلوك السبيكة خلال عملية المجانسة، حيث لوحظ من العينة الثالثة ارتفاع قيم القساوة بشكل كبير بعد إخضاعها للمجانسة بالدرجة $580^{\circ}C$ ولمدة 6h ولكن عند إخضاعها بالتعتيق $200^{\circ}C$ فإن الإبقاء لمدة 6h كان هناك انخفاض واضح بقيم القساوة، فيما لم يظهر ذلك للحالة الأولى والثانية.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

حيث يظهر عدم تأثر قيم القساوة للعينات المصبوبة مع تغير درجة حرارة القالب خلال عملية الصب للحالات الثلاثة، وبالنسبة لعملية المعالجة بالمجانسة فقد لوحظ ارتفاع قيم القساوة لعينة الحالة 1 بشكل أكبر من العينة بالحالة (2) و بالنسبة للعينة بالحالة (3) فقد أظهرت أكبر ارتفاع بقيم القساوة، أما في حالة التقسية بالتعتيق الصناعي فقد لوحظ أن الحالات الأولى والثانية كانت قيم القساوة أفضل من الحالة الثالثة التي انخفضت قيم قساوتها بعد عملية التقسية بالتعتيق وهذا يعود إلى أن زمن التقسية بالتعتيق كان يجب أن يكون أقصر من الزمن المطبق.

4- الاستنتاجات:

تم في هذا البحث دراسة تغير البنية المجهرية لسبائك الألمنيوم 6xxx خلال عملية الصب والمجانسة والتقسية بالتعتيق حيث:

1- إن نسب العناصر الكيميائية Mg و Si في المصبوبات هي العامل الأكثر تأثيراً على البنية المجهرية وسلوك السبيكة خلال عمليات المعالجة الحرارية بالمجانسة والتقسية بالتعتيق، ووجود

References:

- 1- George E Tot ten, Handbook of Aluminum, Volume 7, Library of Congress Cataloging USA-(2003).
- 2- Aluminum extrusion technology / Pradip K. Saha. p. cm. Copyright © 2000 by ASM International®.PP 1-23.
- 3- ZAJAC. S, GULLMAN L.O, JOHANSSON. A, BENGTSSON. B, Hot Ductility of Some Al-Mg-Si Alloys. Mat. Sci. Forum,1996: 217-222, 1193-98.
- 4- Aluminum extrusion technology / Pradip K. Saha. p. cm. Copyright © 2000 by ASM International®.PP 1-23.
- 5- TROEGER, L.P., STARKE Jr. E.A., Microstructural and Mechanical Characterization of Superplastic 6xxx Aluminum Alloy. Mater. Sci Eng. A, 2000, Vol., 277, 1-2, 31, 102-113.
- 6- K. Laue, and H. Stenger, Extrusion, American Society for Metals, 1981.
- 7- Ceresara S, Di Russo E, Fiorini P, Giarda A, "Effect of Si excess on the ageing behaviour of Al-Mg₂Si 0.8% alloy" Materials Science and Engineering Vol 5 Issue 4 (1970) pp 220-227.
- 8- Ding X.P, Cui H, Zhang J.X, Li H.X, Gui M.X, Lin Z, Zhuang L.Z, Zhang J.S, "The effect of Zn on the age hardening response in an Al-Mg-Si alloy" Materials and Design Vol 65 (2015) pp 1229-1235.
- 9- Mrwka-Nowotnik G, Sieniawski G. Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys. Journal of Materials Processing Technology. 2005;162-163, 367-372.
- 10- Reiso O, Tundal U, Andersen SJ. The effect of cooling rate after homogenisation and billet preheating practice on extrudability and section properties of an AlMgSi alloy. Proc. Sixth International Aluminium Extrusion Technology Seminar, Aluminium Association and Aluminium Extruders Council. 1996:1.
- 11- Birol Y. The effect of homogenization practice on the microstructure of 6063 billets. Journal of Materials Processing Technology. 2004;148:250-258.
- 12- Cai M, Robson JD, Lorimer GW, Parson NC. "Simulation of the casting and homogenisation of two 6xxx series alloys".Mater. Sci. Forum. 2002.396-402, 209- 214.
- 13- Usta M, Glicksman ME, Wright RN. The effect of heat treatment on Mg₂Si coarsening in aluminium 6105 alloy. Metallurgical and Materials Transactions: A (35A). 2004;435-438.
- 14- Wang Y, Liao H, Wu Y, Yang J, "Effect of Si content on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys" Materials and Design Vol 53 (2014) pp 634-638.
- 15- Ji S, Yang W, Gao F, Watson D, Fan Z, "Effect iron on the microstructure and mechanical property of Al-Mg-Si-Mn and Al-Mg-Si die cast alloys" Materials Science and Engineering A Vol 564 (2013) pp 130-139.