

**TJES**

ISSN: 1813-162X

مجلة تكريت للعلوم الهندسية

متاحة على الموقع الإلكتروني: <http://www.tj-es.com>

## تأثير المعاملة الحرارية الايزوثيرمية السريعة والمحلولية (T6) على خواص السبيكة (A319) المنتجة بطريقة السباكة بالضغط

رائد نجيب رزوقي<sup>1</sup> ، نجيب سلمان عبطان<sup>2</sup> ، محمد مهنا متعب<sup>3</sup>  
 قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة تكريت، صلاح الدين، العراق

### الخلاصة

تم انتاج سبيكة الالمنيوم A319 بطريقة السباكة بالضغط عند ضغوط مسلطة (10, 15, 20, 25, 30) ميكاباسكال ودرجة حرارة صب (850°C) وكانت درجة حرارة التسخين المسبق للقالب (300°C). درس تأثير المعاملات الحرارية بنوعها الايزوثيرمية السريعة والمحلولية (T6) على خواص هذه السبيكة المتضمنة الصلادة، الكثافة والبنية المجهرية، وبينت الدراسة أن هناك دور مهم لهذه المعاملات وخاصة الايزوثيرمية فيها على تغيير البنية المجهرية والشكل المورفولوجي للأطوار وتحسين الخواص الميكانيكية للسبيكة بزيادة كل من الصلادة والكثافة.

**الكلمات الدالة:** السباكة بالضغط، المعاملة الحرارية الايزوثيرمية السريعة، المعاملة المحلولية (T6)، درجة حرارة الصب، درجة حرارة القالب، الضغط المسلط.

## *Effect of Fast Isothermal and Solution (T6) Heat Treatments on A319 Alloy properties produced by Pressure Die Casting Method*

### Abstract

Aluminum A319 Alloy under applied pressure ( 10 , 15 , 20 , 25 , 30 ) MPa, and pouring temperature at 850°C were produced, while the pre-heating die temperature at 300°C.

Effect of both fast isothermal and solution (T6) heat treatments were studied, on A319 alloy, which includes: Hardness, Density and Microstructure. Results show an important role of these treatments especially isothermal on the microstructure and morphological phases, as well as, improve the mechanical properties of the alloy, by the increasing of both hardness and density.

**Keywords:** Pressure Die Casting, Fast Isothermal Heat Treatment, Solution Heat Treatment (T6), Pouring Temperature, Die Temperature, Applied Pressure.

مغنيسيوم والزنك. وان حوالي 70% من المسبوكات التي اساسها الالمنيوم تنتج بهذه الطريقة علاوة على ان معظم سبائك الالمنيوم المستخدمة في صناعة اجزاء السيارات تكون بأبعاد على درجة عالية من الدقة وخالية من العيوب وتكون انتاجيتها عالية وذات اشكال أكثر تعقيداً من تلك المنتجة بطريقة السباكة بالجاذبية [3,4,5].

### الجانب النظري

هناك طريقتان للسباكة بالضغط وهما السباكة بالضغط العالي (High Pressure Dies Casting) (HPDC) والسباكة بالضغط المنخفض (Low Pressure Dies Casting) (LPDC)، السباكة

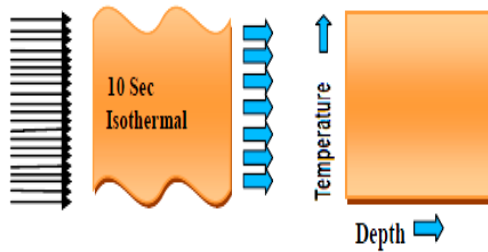
### المقدمة

السباكة بالضغط (Pressure Die Casting) وهي احدى طرائق السباكة المتقدمة والتي اخترعت لتلافي عيوب مسامية الغاز والانكماش وهذه الطريقة لها جهد عالٍ لإنتاج سبائك خالية من العيوب اذ يتم تسليط ضغط عالٍ على المنصهر بعد صبه في تحويف القالب وهو في حالته السائلة [1,2,3].

تتميز هذه العملية بسرعة ملء عالية ومعدل تبريد سريع وخواص ميكانيكية متفوقة علاوة على سرعة الانتاج اذ يمكن للماكه الواحدة انتاج اكثر من 60 سبيكة في الساعة بالاعتماد على الحجم والسبك. وان هذه العملية تكون اكثر شيوعاً بالنسبة لإنتاج السبائك غير الحديدية مثل الالمنيوم،

الشكل غير المنتظم الى جسيمات بيضوية دقيقة [22,21].

ان عملية التسخين الايزوثيرمي السريع (Rapid Heat Isothermal) هي معاملة حرارية تجري على السطح وبزمن قصير قد يستغرق بضعة ثوان لغرض ازالة الاجهادات وتقليل العيوب التي قد تحصل بالبنية المجهرية نتيجة السباكة وتحسين الخواص الميكانيكية. وتمتاز برخص تكاليف اجرائها وبساطة الأجهزة المستخدمة لانجازها مقارنة مع طرائق التسخين الأخرى. وتتم هذه العملية برفع درجة حرارة العينة المراد معالجتها باستخدام مصدر ضوئي الى الدرجة الحرارية المطلوبة بزمن قصير من خلال عملية امتصاص الفوتونات الضوئية ويتم تبريد العينة سريعاً من خلال عملية الاشعاع ( Radiation ) بعد اطفاء المصدر الضوئي مباشرة. والشكل (2) يوضح آلية التسخين الايزوثيرمي السريع [24,23].



الشكل (2) تقانة التسخين الايزوثيرمي السريع [23]

#### الجانب العملي

تم تحضير سبيكة الألمنيوم (A319) عن طريق صهر الألمنيوم النقي عند درجة حرارة (700°C) ثم اضافة عناصر السبك بعد تحديد نسبها وبعد التحليل الكيميائي لهذه السبيكة باستخدام جهاز التحليل الطيفي (ARL) سويدي المنشأ كانت النتائج كما مبينة في الجدول (1).

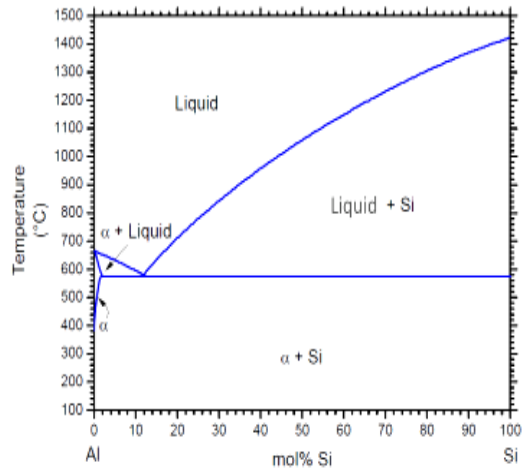
الجدول (1) التركيب الكيميائي لسبيكة الألمنيوم (A319) القياسية والمحضرة

العنصر	Al%	Si%	Cu%	Zn%	Mg%	Ni%	Mn%	Fe%	Ti%	Cr%
السبيكة القياسية	Rem.	6.5-5.5	4.0-3.0	1.0	0.10	0.35	0.50	1.0	0.25	-
السبيكة المحضرة	Rem.	6.23	3.98	0.63	0.08	0.31	0.45	0.81	0.12	0.001

تتكون منظومة السباكة بالضغط من القالب والمكبس الهيدروليكي، يتكون القالب من الكابس (Punch) والقالب (Die) الذي يستند على قاعدة تمثل الجزء السفلي للقالب، اما منظومة التسخين الايزوثيرمي للقالب فتتكون من سلك كهربائي ذو مقاومة عالية وحاضنة لغرض حماية السلك الكهربائي

بالضغط العالي (HPDC) يتم فيها حقن المعدن المنصهر الى تجويف القالب بسرعة عالية (30-100) متر/ثانية. وان لهذه الطريقة استعمالات واسعة لتصنيع منتجات مختلفة الانواع وبأبعاد عالية الدقة علاوة على استخدامها في الانتاج الكمي ومعدل انتاج اعلى من طرائق السباكة الأخرى وانها طريقة اقتصادية وقادرة على إنتاج اجزاء ذات خشونة سطحية قليلة (اكثر نعومة)، اما السباكة بالضغط المنخفض (LPDC) فتستعمل بصورة واسعة في تصنيع اجزاء ذات أسماك رقيقة وتتأثر نوعية او جودة الاجزاء المنتجة بالظروف المحيطة بها. وتتميز هذه الطريقة بقدرتها على انتاج مسبوكات عالية الجودة ومسامية قليلة علاوة على الانتاجية العالية لذلك تكون هذه التقانة شائعة الاستعمال في انتاج سبائك الألمنيوم [18-6].

تعتمد الخواص الميكانيكية لسبائك الألمنيوم - سيلكون على التكوين الكيميائي وخواص البنية المجهرية (Microstructure) مثل ترتيب الأذرع الشجرية للألمنيوم الأولي والمسافات الفاصلة بينها ودرجة نعومتها علاوة على شكل وترتيب ونعومة طور اليونكتك ونوع وشكل المركبات السبائكية المعدنية (Intermetallic)، الشكل (1) يوضح الأطوار الثلاثة في سبيكة الألمنيوم - سيلكون [20,19].



الشكل (1) مخطط التوازن الحراري للنظام الثاني الألمنيوم - سيلكون [20]

تشتمل عملية التعامل الحراري على تسخين السبيكة الى درجة حرارية معينة وبعد الوصول الى الدرجة الحرارية المطلوبة يتم تثبيت تلك الدرجة لفترة زمنية يحددها التركيب المجهرى وحجم السبيكة وبعد ذلك يتم التبريد في اوساط تبريد مختلفة (معدل تبريد مختلف) اذ تساهم المعاملات الحرارية على تغيير البنية المجهرية مما يؤدي الى تحسين الخواص الميكانيكية. وتلعب المعاملة المحلولية (T6) والتعتيق الاصطناعي دوراً مهماً في تحسين الخواص الميكانيكية لسبائك الألمنيوم - سيلكون من خلال تغيير الشكل المورفولوجي للأطوار المتكونة وتقوم بتحويل شكل الطور الايوتكتيكي للسليكون من

بعد اجراء مسح كامل لسطح العينات وتحديد المناطق المناسبة تم تصوير البنية المجهرية باستخدام المجهر الضوئي وقياس الصلادة باستخدام منظومة قياس الصلادة بطريقة فيكرز إذ تم تسليط قوة (حمل) ثابت مقدارها (500) غم لمدة زمنية مقدارها (5) ثانية.

تم حساب قيم الكثافة باستخدام طريقة الإزاحة من خلال معرفة وزن العينة وهي جافة ووزن العينة وهي معلقة بالسائل ومعرفة كثافة السائل من خلال تطبيق القانون الآتي :-

$$\rho_s = P_1 \frac{m_s}{m_l} \dots \dots \dots (1)$$

$\rho_s$  : كثافة العينة ( $\text{g/cm}^3$ )

$P_1$  : كثافة السائل ( $\text{g/cm}^3$ )

$m_l$  : وزن العينة وهي معلقة بالسائل (g)

$m_s$  : وزن العينة وهي جافة (g)

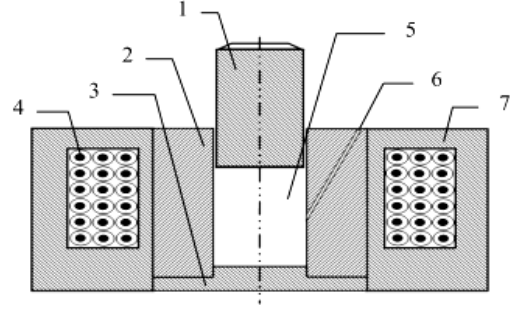
اجريت المعاملة المحلولية والتعتيق الاصطناعي (T6) من خلال تسخين العينات داخل الفرن الى درجة حرارة ( $500^\circ\text{C}$ ) ولمدة ساعة لتجانس درجة حرارة العينة وبعد ذلك تم اخمادها في الماء المقطر ومن ثم التعتيق عن طريق اعادة تسخين العينة داخل الفرن الى درجة حرارة ( $200^\circ\text{C}$ ) ولمدة (5) ساعات وتركت بعدها لتبرد داخل الفرن الى درجة حرارة الغرفة. اما المعاملة الحرارية الايزوثيرمية السريعة فقد شملت تسخين العينات بواسطة الجهاز الموضح بالشكل (6) بعد معايرته، يتكون الجهاز المصنوع من قبل الباحثين من مصباح تنكستن مفرد نوع (Narva) ذي قدرة (660W) مثبت على قاعدة خزفية ومرآة مقعرة ببعد بؤري (5cm) اذ تم تثبيتها على قاعدة حديدية علاوة على منظم الفولتية. والجهاز يحتوي ذراع لحمل العينة وقارئ رقمي لدرجات الحرارة ومزدوج حراري نوع (K) ذو قطر (0.5 mm).

تم تثبيت العينة على الذراع الحامل لها وعلى بعد ثابت (5cm) من المصباح، ثبت المزدوج الحراري ملامساً للعينة وتم توصيله الى مقياس درجة الحرارة الرقمي، استخدام منظم فولتية وربط مع المصباح للتحكم على التوالي بكمية الفولتية الواصلة وبالتالي درجة الحرارة لحين ثبوتها عند درجة حرارة ( $500^\circ\text{C}$ ) وبالتالي حساب زمن تعرض العينة لتلك الدرجة الحرارية ، سخنت العينات ذات المتغيرات قيد الدراسة لمدة بضع ثواني وبعد تجانس درجة حرارة العينة اخمدت في الماء المقطر . وتم تعتيق العينات وفق نفس الالية المتبعة في تعتيق العينات المعاملة محلولياً (T6).

#### النتائج والمناقشة

يلاحظ من خلال الشكل (7) ان العلاقة بين الضغط المسلط والصلادة تكون طردية قبل اجراء المعاملات الحرارية اذ تزداد الصلادة بزيادة الضغط المسلط وازدادت قيمة الصلادة بنسبة (5.68%) عند ازدياد الضغط المسلط من (10MPa) الى (30MPa). ويمكن ان يعزى ذلك الى التأثير المباشر للضغط المسلط على زيادة معدل التبريد والذي يؤدي بدوره الى نعومة البنية المجهرية وتقليل كل من حجم الحبيبة والمسافة بين الأذرع

والشكليين (3) و (4) يبينان منظومة السباكة وموقع المزدوج الحراري داخل المصبوبة للسيطرة على دقة الدرجة الحرارية التي يصل عندها المنصهر الى منتصف الحالة العجينية والتي هي بحدود ( $575^\circ\text{C}$ ).



الشكل (3) منظومة السباكة بالضغط

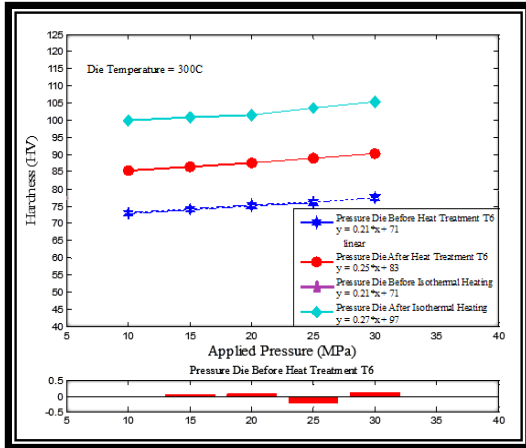
(1) الكابيس، (2) القالب، (3) قاعدة القالب، (4) سلك كهربائي (هيتز)، (5) تجويف القالب، (6) قناة ادخال المزدوج الحراري، (7) حاضنة السلك الكهربائي (الهيتز)



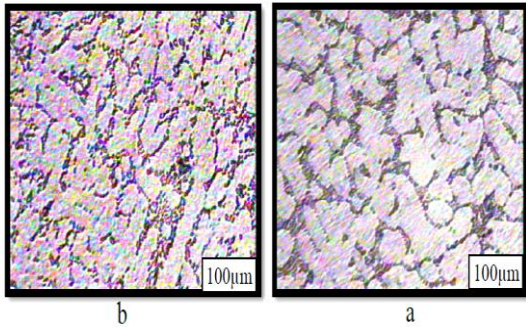
الشكل (4) موقع المزدوج الحراري في المصبوبة

تم اجراء عملية السباكة بالضغط وما تبعها من فحوصات وفق الالية الآتية :-

- 1- طلاء القالب بمسحوق الكرافيت والكحول بسمك لايزيد عن ( $50\mu\text{m}$ ) لتأثيره السلبي على معدل التبريد وتجفيفه لتسهيل اخراج المسبوكة بعد اكتمال عملية السباكة بالضغط.
- 2- صهر السبيكة في الفرن الكهربائي باستخدام بودقة من كاربيد السيلكون وإيصال المنصهر إلى درجة حرارة ( $850^\circ\text{C}$ ).
- 3- تسخين قالب الصب الى درجة حرارة مقدارها ( $300^\circ\text{C}$ ) باستخدام منظومة التسخين ومن ثم صب المنصهر بعد معالجة الخبث وبعد ذلك تم تسليط الضغط على المنصهر وهو في حالته السائلة بقيم هي (10, 15, 20, 25, 30) ميكاباسكال والإبقاء عليه لمدة (100) ثانية لكل حالة الى ان يكتمل إنجماد المعدن.
- 4- تقطيع المصبوبة بعد اخراجها من القالب الى عدة عينات بواسطة جهاز قطع المعادن.
- 5- اجراء عملية تحضير العينات بشكل كامل لتكون جاهزة لفحوصات البنية المجهرية، الصلادة وحساب قيم الكثافة. ويبين الشكل (5) مخطط انسيابي للجانب العملي.



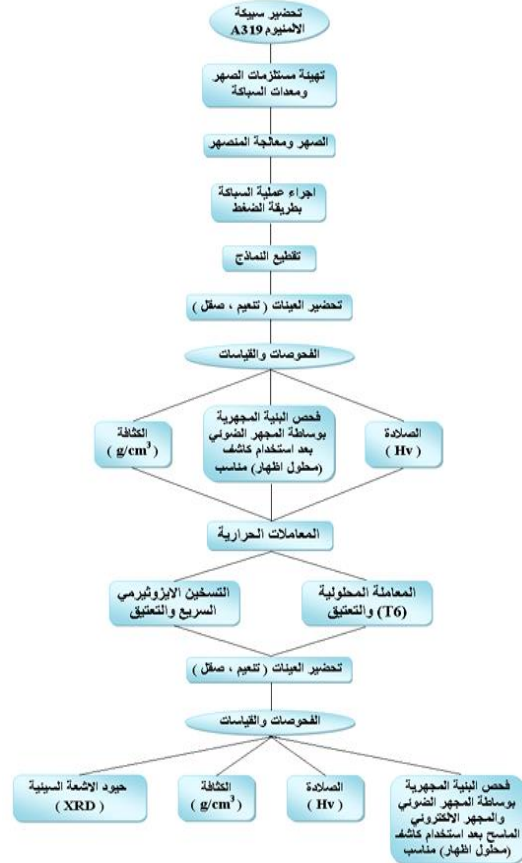
الشكل (7) العلاقة بين الضغط المسلط والصلادة قبل وبعد إجراء المعاملة المحلولية (T6) والايزوثيرمية



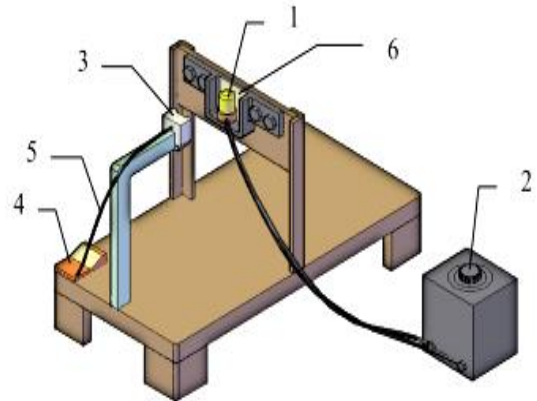
الشكل (8) صورة بالمجهر الضوئي للبنية المجهرية قبل إجراء المعاملات الحرارية عند ضغط مسلط (30MPa) (b) (10MPa) (a)

يبقى السلوك متشابه بعد إجراء المعاملات الحرارية بنوعيتها المحلولية (T6) والايزوثيرمية لما قبل إجراء هذه المعاملات الشكل (7). وتزداد قيمة الصلادة بعد إجراء المعاملة الحرارية الايزوثيرمية عند الضغط المسلط (10MPa) بالنسب (14.6%) و (27%) مقارنة بالمعاملة المحلولية (T6) وقبل إجراء المعاملة الحرارية على التوالي وكذلك الحالة عند زيادة الضغط الى (30MPa) ولكن بنسب مختلفة. ويعزى سبب زيادة قيم الصلادة بعد إجراء المعاملات الحرارية بنوعيتها ربما يعود الى ان درجة الحرارة (500°C) قد سمحت للنحاس الموجود في البنية المجهرية الى التحرر في هذه المرحلة من المعاملة والترسب على شكل طور مستقل ليعمل كدقائق تقوية مما يزيد من قيم الصلادة الاشكال (9) الى (10). وبذلك يمكن القول ان العينة اصبحت عبارة عن مادة مركبة من الالمنيوم الحر والأطوار الأخرى مع النحاس كون النحاس المترسب يقوم بإعاقة حركة الأنخلاعات وكما موضح في الشكل (11). وهذا يتفق بالسلوك مع ما توصل اليه [25] للعناصر او السباتك الأخرى.

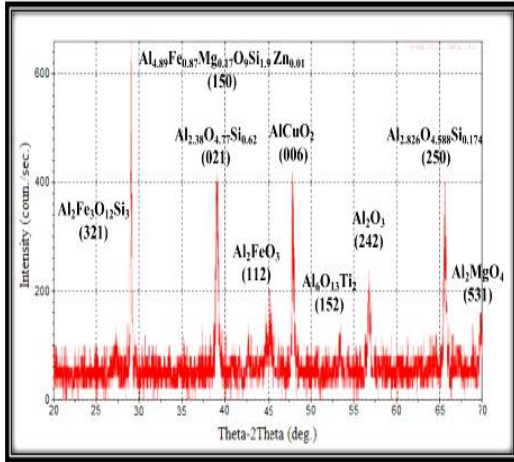
الشجرية (Dendrite Arm Spacing) وكما موضح في الشكل (8) وهذا يتفق بالسلوك مع [6] لعناصر او سباتك اخرى.



الشكل (5) المخطط الانسيابي للجانب العملي



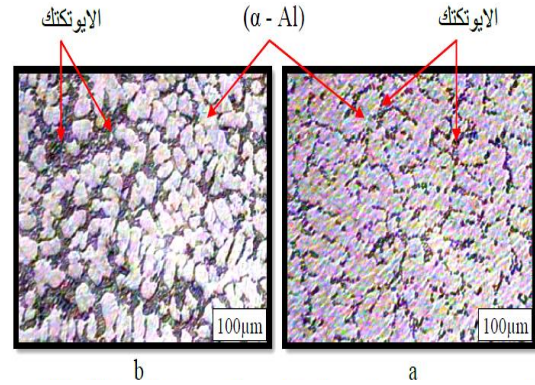
الشكل (6) جهاز التسخين الايزوثيرمي  
(1) مصباح (2) منظم فولتية (3) موقع تثبيت العينة  
(4) مقياس درجة الحرارة الرقمي (5) مزدوج حراري  
(6) مرآة مقرة (8)



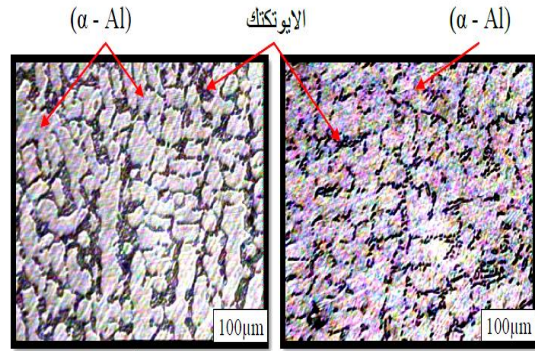
الشكل (11) حيود الأشعة السينية عند ضغط مسلط 30MPa بعد إجراء المعاملة الأيزوثيرمية

تبيين الأشكال (12) و (13) العلاقة الطردية بين قيم الكثافة والضغط المسلط قبل وبعد إجراء المعاملات الحرارية وهذا يتفق في السلوك مع ما تم ملاحظته بالعلاقة بين الضغط المسلط والصلادة الشكل (7). وان قيمة الكثافة قد ازدادت قبل إجراء المعاملات الحرارية بنسبة (2.1%) عند زيادة الضغط المسلط من (10MPa) الى (30MPa). ويعزى سبب ذلك الى التأثير غير المباشر للضغط المسلط (الانضغاطية) اذ كلما زاد الضغط المسلط زادت انضغاطية المنصهر مما يؤدي الى تقليل الفجوات الغازية الموجودة عن طريق تحول الغاز الحر الى مذاب وكذلك يعمل على انضغاط المركبات غير المعدنية مما يزيد من الكثافتها كما مبين في الأشكال (8) و (9) و (10).

كذلك تبين الأشكال (12) و (13) زيادة في قيمة الكثافة بعد إجراء المعاملة المحلولية (T6) عند الضغط المسلط (30MPa) بالنسب (0.02%) و (0.14%) مقارنة بالمعاملة الحرارية الأيزوثيرمية السريعة وقبل إجراء المعاملات الحرارية على التتابع وكذلك الحال عند انخفاض الضغط المسلط الى (10MPa) ولكن بنسب مختلفة. ويمكن ان يعزى سبب ذلك الى قصر الزمن (بضع ثوان) الذي يتطلبه التسخين الأيزوثيرمي السريعة مما يقلل من الية الانتشار ومن ثم التجانس للبنية المجهرية علاوة على تحول الأطوار الغير مستقرة الى مستقرة مثل طور النحاس كما موضح في الشكل (9) الى (11). وهذا يتفق بالسلوك مع ما توصل اليه [25] للعناصر او السبائك الأخرى.



الشكل (9) صورة بالمجهر الضوئي للبنية المجهرية بعد إجراء المعاملة المحلولية (T6) عند ضغط مسلط (30MPa) (b) (10MPa) (a)



الشكل (10) صورة بالمجهر الضوئي للبنية المجهرية بعد إجراء المعاملة الأيزوثيرمية عند ضغط مسلط (30MPa) (b) ، (10MPa) (a)

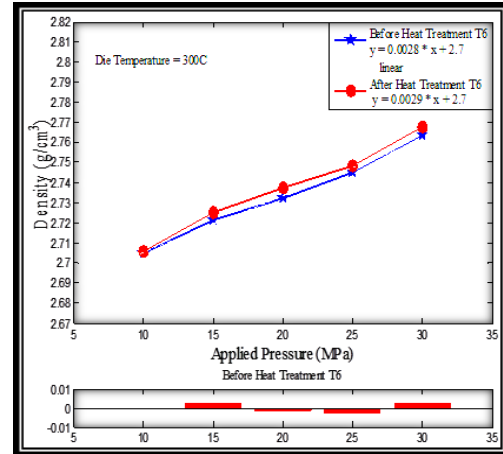
ان زيادة قيمة الصلادة بعد إجراء المعاملة الحرارية الأيزوثيرمية السريعة مقارنة مع المعاملة المحلولية (T6) الشكل (7) فيعود الى ان طاقة الضوء المستخدمة في التسخين في حالة المعاملة الأيزوثيرمية تكون اسرع في رفع درجة حرارة العينة الى الدرجة المطلوبة وبذا يكون معدل تبريد اسرع ولسمك قليل مقارنة بالمعاملة المحلولية (T6) التي تكون فيها عملية انتقال الحرارة في هذه الحالة على شكل طبقات مما يؤدي الى ان تكون التحولات الطورية خلاله اكثر تعقيداً مما هو عليه في المعاملة الأيزوثيرمية علاوة على الفرق في حجم الحبيبات كما مبين في الأشكال من (9) الى (11).

تكون العينات اكثر نعومة بعد إجراء المعاملة الحرارية الأيزوثيرمية مقارنة مع المعاملة المحلولية (T6) اذ يلاحظ ان هناك اختلافاً واضحاً في مورفولوجية السطح لكلا الحالتين الأشكال (9) و (10) ويمكن ان يكون ذلك بسبب قصر فترة تعرض العينة لدرجات الحرارة اثناء التسخين الأيزوثيرمي السريع بالمقارنة مع المعامل الحرارية المحلولية (T6) والتي تقلل من احتمالية التأكسد او زيادة معدل التأكسد وحدوث التكسر والتفشر في طبقة الاوكسيد.

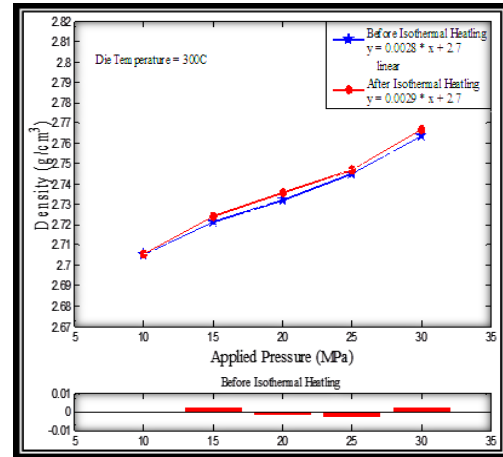
5. حدوث زيادة في قيمة الكثافة بعد اجراء المعاملة المحلولية (T6) عند الضغط المسلط (30 MPa) بالنسب (0.02%) و (0.14%) مقارنة بالمعاملة الحرارية الايزوثيرمية السريعة وقبل اجراء المعاملات الحرارية على التسابع وكذلك الحال عند انخفاض الضغط المسلط الى (10 MPa) ولكن بنسب مختلفة.

#### المصادر

- 1-Alastair Long, David Thornhill, Cecil Armstrong, David Watson, "Predicting Die Life from Die Temperature for High Pressure Dies Casting Aluminum Alloy" Applied Thermal Engineering , Vol. 44, PP. 100 - 107 , 2012.
- 2-Alastair Long, David Thornhill, Cecil Armstrong, David Watson, "Determination of the Heat Transfer Coefficient at the Metaledie Interface for High Pressure Die Cast AISi9Cu3Fe", Applied Thermal Engineering, Vol. 31, PP. 3996-4006, 2011.
- 3- Davis, J. R., " Tool Materials", ASM International, s. I., ISBN 0-87170-545-1, 1995.
- 4-Klobcar, D., Tusek, J., "Thermal Stresses in Aluminum Alloy Die Casting Dies", Computation Materials Science, Vol. 43, 2008.
- 5-Bill Andresen, "Die Casting Engineering", Marcel Dekker, New York, ISBN 0-8247-5935-4, 2005.
- 6-Mohammad Sadeghi, Jafar Mahmoudi, "Experimental and Theoretical Studies on the Effect of Die Temperature on the Quality of the Products in High-Pressure Die-Casting Process", Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2012, Article ID 434605, 9 pages, 2012 .
- 7-Dargusch, M. S., Dour, G., Schauer, N., Dinnis, C. M. and Savage, G., "The Influence of Pressure During Solidification of High Pressure Die Cast Aluminum Telecommunications Components", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 180, No. 1-3, pp. 37-43, 2006.
- 8-Z. W. Chen and M. Z. Jahedi, "Die Erosion and its Effect on Soldering Formation in High Pressure Die Casting of Aluminum Alloys", Materials and Design, Vol. 20, No.6, pp. 303-309, 1999.
- 9-P. W. Cleary, J. Ha, M. Prakash, and T. Nguyen, "3D SPH Flow Predictions and Validation for High Pressure Die Casting of Automotive Components", Applied



الشكل (12) العلاقة بين الضغط المسلط والكثافة للعينات المنتجة بطريقة الضغط وصب المنصهر بدرجة حرارة (850°C)



الشكل (13) العلاقة بين الضغط المسلط والكثافة للعينات المنتجة بطريقة الضغط وصب المنصهر بدرجة حرارة (850°C)

#### الاستنتاجات

1. تزداد الصلادة بزيادة الضغط المسلط قبل اجراء المعاملة الحرارية اذ زادت قيمة الصلادة بنسبة (5.68%) عند ازدياد الضغط المسلط من (10MPa) الى (30MPa)، وتشابه السلوك نفسه بعد اجراء المعاملات الحرارية بنوعيهما المحلولية (T6) والايزوثيرمية.
2. تتميز العينات بصلادتها العالية بعد اجراء المعاملة الحرارية الايزوثيرمية السريعة مقارنة مع تلك التي عوملت محلولياً (T6).
3. تعطي المعاملة الحرارية الايزوثيرمية السريعة مورفولوجية سطح عينات اكثر نعومة ومقبولية مقارنة مع المعاملة المحلولية (T6).
4. تعمل المعاملات الحرارية بنوعيهما على تفعيل آلية الانتشار التي تؤدي الى ترسيب بعض العناصر وأهمها عنصر النحاس ولكن بنسب مختلفة.

- 20- I. Ansara, A. Dinsdale, M. Rand, "Thermochemical Database for Light Metal Alloys", Vol. 2 (Ed.), 1998.
- 21- W. Bolton, "Engineering Materials Technology", Third edition, Heat Treatment, Butterworth-Heinemann, pp. 216, 1998.
- 22- L. Y. Pio, "Effect of T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Gravity Die Cast A356 Aluminum Alloy", Journal of Applied Sciences, Vol.11, No.11, pp. 2048-2052, 2011.
- 23- R. Singh, J. Appl. Phys., Vol. 63, No. 8, pp. R59, 1988.
- 24- R. Jayakrishnan, S R Kumar and R K Pandeyt, "Rapid Thermal Annealing of Multiple Dip-coated CdS Films", Bhopal University, 1993.
- 25- Choong Do Lee, "Effect of T6 Heat Treatment on the Defect Susceptibility of Fatigue Properties to Microporosity Variations in a Low-pressure Die-cast A356 Alloy", Materials Science & Engineering A Vol. 559 pp. 496–505, 2013.
- Mathematical Modelling, Vol.30, No.11, pp. 1406–1427, 2006.
- 10- K. J. Laws, B. Gun, and M. Ferry, "Effect of Die-casting Parameters on the Production of High Quality Bulk Metallic Glass Samples", Materials Science and Engineering A, Vol.425, No.1-2, pp. 114–120, 2006.
- 11- D. McBride, T. N. Croft, and M. Cross, "A Coupled Finite Volume Method for the Computational Modelling of Mould Filling in Very Complex Geometries", Computers & Fluids, Vol.37, No.2, pp. 170–180, 2008.
- 12- C. C. Tai and J. C. Lin, "The Optimal Position for the Injection Gate of a Die-casting Die", Journal of Materials Processing Technology, Vol.86, No.1–3, pp. 87–100, 1998.
- 13- S. W. Youn, C. G. Kang, and P. K. Seo, "Thermal Fluid/solidification Analysis of Automobile Part by Horizontal Squeeze casting process and experimental Evaluation", Journal of Materials Processing Technology, Vol.146, No.3, pp. 294–302, 2004.
- 14- Liqiang Zhang & Rongji Wang, "An Intelligent System for Low-pressure Die-Cast Process Parameters Optimization", Int J Adv Manuf Technol, 65:517–524, 2013.
- 15- Fu PH, Luo AA, Jiang HY, Peng LM, "Low-pressure Die Casting of Magnesium Alloy AM50: Response to Process Parameters", J Mater Process Technol. 205:224–234, 2008.
- 16- Cleary PW, "Extension of SPH to predict Feeding, Freezing and Defect Creation in Low Pressure Die Casting", Appl. Math Model 34:3189–3201, 2010.
- 17- Zhang LQ, Li LX, Zhu BW, "Simulation Study on the LPDC Process for Thin-walled Aluminum Alloy Casting", Mater Manuf Process 24:1349–1353, 2009.
- 18- Zhang B, Maijer DM, Cockcroft SL, "Development of a 3-D thermal Model of the Low-pressure Die-cast (LPDC) Process of A356 Aluminum Alloy Wheels " Mat Sci. Eng. A 464:295–305, 2007.
- 19- G. Chirita, D. Soares, F. S. Silva, "Advantages of the Centrifugal Casting Technique for the Production of Structural Components with Al-Si Alloys", Materials and Design, PP. 20-27, 29, 2008.