

Effect of Heat and Mechanical Treatments on Mechanical Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloys

Fouad El Dahiye

Department of Design and Production, Mechanical and Electric Engineering Collage, Al-University of Baath -Homs-Syria

Mahmoud AlAssaad

Department of Design and Production, Assistant Professor,Mechanical and Electric Engineering Collage, University of Baath -Homs-Syria

Mohamad Yehea Alnefawy

Department of Design and Production, Mechanical and Electric Engineering Collage / Al-University of Baath-Homs-Syria

Yahya.netawy@gmail.com

Submission date:- 20/11/2018

Acceptance date:- 3/1/2019

Publication date:- 20/1/2019

Abstract

In this research the effect of various heat treatments on tensile properties and hardness of Aluminum-Zinc-Magnesium-Copper alloy (7075 Aluminum alloy) was studied, with and without mechanical treatment by extrusion process. The 7075 alloy samples were submitted to two type of heat treatments, T6 heat treatment by artificial ageing samples in 120 °C for 24 h and retrogression and re-ageing (RRA). Where in RRA treatment the first ageing done in 120 °C for 24 h, then the retrogression done in 180 °C for 30 min and re-ageing in 120 °C for 24 h. We got the best results by apply the RRA treatment with extrusion process, where tensile strength was reached to 380 Mpa without extrusion machining process, while reached to 530 Mpa with extrusion process

Key words: Al-Zn-Mg-Cu alloy, Artificial aging, Retrogression and re-ageing, Mechanical treatment, Tensile Properties, Vickers Hardness.

تأثير المعالجات الحرارية والميكانيكية على خواص الميكانيكية لسبائك Al-Zn-Mg-Cu

فؤاد ضحية* محمد يحيى النيفاوي** محمود الأسعد**

* قسم هندسة التصميم والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البصرة/سوريا

** قسم هندسة التصميم والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البصرة/سوريا

*** قائم بالأعمال في قسم هندسة التصميم والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البصرة/سوريا

Yahya.netawy@gmail.com

الخلاصة

يدرس هذا البحث تأثير المعالجات الحرارية المختلفة على خواص الشد والتساوة لسبائك الألمنيوم-زنك-مغنيزيوم-نحاس 7075 مع وبدون المعالجة الميكانيكية بالبثق، حيث تم تعریض عينات من السبيكة 7075 لمعالجين حراريین مختلفین هما المعالجة الحرارية (T6) المعروفة، وذلك بتعتیق العینات اصطناعیاً Artificial Ageing في درجة الحرارة 120 °C لمدة 24 h، والمعالجة الحرارية الثانية هي الإرجاع وإعادة التعتیق (RRA) حيث تم التعتیق الأول في درجة الحرارة 120 °C لمدة 24 h ثم الإرجاع في درجة الحرارة 180 °C لمدة 30 min ثم إعادة التعتیق في درجة الحرارة 120 °C لمدة 24 h .

وقد حصلنا على أفضل النتائج بتطبيق المعالجة RRA مع عملية التشكيل بالبثق حيث بلغت مقاومة الشد 380 Mpa بدون عملية التشكيل بالبثق وبلغت 530 Mpa مع عملية التشكيل بالبثق.

كلمات الدالة: سبيكة الألمنيوم-زنك-مغنيزيوم-نحاس، التعتیق الاصطناعی، إرجاع وإعادة التعتیق، معالجات ميكانيكية، خواص الشد، قساوة فيكرز.

1. المقدمة

ينشر فلز الألمنيوم في صخور الأرض بنسبة تفوق كل الفلزات الأخرى، فهو يمثل نحو 8% من القشرة الأرضية، والألمنيوم معدن ذو لون أبيض فضي، وزنه خفيف جداً فوزنه النوعي 2.7 gr/cm³، أي ما يعادل ثلث الوزن النوعي للفولاذ، وهو موصل جيد للحرارة والكهرباء إذ تبلغ موصليته ثالثي موصلية النحاس، إلا أنه معدن قساوته منخفضة لا تتعدي HB 40 ومقاومته على الشد لا تزيد عن N/mm² 90 ولهذا فإن معظم التطبيقات وال المجالات التي تستخدم فيها الألمنيوم يكون في صورة سباککیة بإضافة عناصر سباککیة للألمنيوم، وإن العناصر السباککیة الأساسية التي تضاف للألمنيوم هي: النحاس Cu ، والمغنيزيوم Mg ، والمنغنيز Mn ، والسيلكون Si ، والزنك Zn، وتحصل بإضافة هذه العناصر للألمنيوم على سباکک الألمنيوم الأساسية والتي ترقم حسب جمعية الألمنيوم Aluminum Association كما يلي [1]

سبائك الألمنيوم - مغنيزيوم	5xxx	الألمنيوم النقى (99.0% أو أكثر نقاوة)	1xxx
سبائك الألمنيوم - مغنيزيوم - سيليكون	6xxx	سبائك الألمنيوم - نحاس	2xxx
سبائك الألمنيوم - زنك	7xxx	سبائك الألمنيوم - منغنيز	3xxx
سبائك الألمنيوم - عناصر أخرى	8xxx	سبائك الألمنيوم - سيليكون	4xxx

تتميز كل سلسلة من هذه السلسل بخاصية تميزها عن باقي السلسل كالموصلية الكهربائية الممتازة التي تتمتع بها سباکک السلسلة الأولى 1xxx لذلك تستخدم في التطبيقات الكهربائية، والمقاومة العالية جداً كسبائك السلسلتين 2xxx و 7xxx و تستخدم بكثرة في صناعة أجزاء ومكونات الطائرات، أما السلسلة 3xxx فتتمتع بقابلية تشكيل وتصنيع عالي

المشروعات الغازية والمبادلات الحرارية، وتتمتع سبائك السلسلة 5xxx مقاومة ممتازة للتآكل لذلك تستخدم في صناعة السفن، أما سبائك السلسلة 6xxx فتتمتع بقابلية ممتازة للتشكيل بالبثق لذلك تصنع منها المنتجات المتعددة ذات المقاطع المختلفة بالبثق [2].

درس العديد من الباحثين خواص سبائك السلسلة 7xxx من سبائك الألمنيوم وهي سبائك ألمونيوم-زنك-مغنيزيوم-نحاس، بسبب خواصها المميزة والمناسبة لعدد كبير من التطبيقات وبشكل خاص تطبيقات الصناعات الجوية والفضائية [3]، حيث تتمتع سبائك الألمنيوم عالية المقاومة 7xxx بخواص ممتازة وخاصةً بعد تطبيق المعالجات الحرارية عليها كمقاومة شد عالية، وقابلية تشكيل ممتازة، ومقاومة تآكل مقبولة، واحدة من أكثر هذه المعالجات الحرارية أهمية هي معالجات الإرجال وإعادة التعting (RRA) التي تؤدي لخواص ميكانيكية ومقاومة تآكل بشكل أفضل من معالجة التعting الاصطناعي T6 التقليدية، وقد بين ذلك الباحث F. Viana وزملاؤه [4] حيث قاموا بدراسة تأثير المعالجات الحرارية T6 وT7 على بنية السبيكة 7075 ومقاومتها للتآكل بالتشقق الإجهادي SCC وحصلوا على أفضل النتائج مع تطبيق المعالجة RRA، أما الباحث Adeyemi Dayo Isadare وزملاؤه [5] فقد قاموا بدراسة تأثير معالجة التلدين على خواص السبيكة 7075، وقام الباحث M.F. Ibrahim وزملاؤه [6] بدراسة تأثير زمن المعالجة الحرارية المحلولية على خواص السبيكة 7075.

وكذلك قام الباحث A.F. Oliveira وزملاؤه [7] بدراسة تأثير معالجات T6 وRRA على مقاومة التآكل بالتشقق الإجهادي SCC والقساوة ومقاومة الشد للسبائك 7050 و7150 وكذلك أعطت المعالجة RRA أفضل النتائج. في حين درس الباحث Hong-ying Li وزملاؤه [8] تأثير التبريد بعد المعالجة المحلولية على خواص الشد للسبائك 7050، حيث قاموا بتبريد السبيكة بعد المعالجة الحرارية المحلولية بدءاً من درجات حرارة مختلفة وحصلوا على أعلى قيم لمقاومة الشد وإجهاد الخضوع عند السقاية بدءاً من الدرجة C° 450 والتي بلغت على التوالي 491 Mpa و 573 .

وقد درس الباحث Prasanta Kumar Rout وزملاؤه [9] تأثير التعting ثنائي المراحل على خواص الشد والقساوة للسبائك 7017. أما الباحث CHEN Song-yi [10] وزملاؤه فقاموا بدراسة تأثير التعting ثلاثي المراحل على منانة ومقاومة السبيكة 7085 للتآكل ولاحظوا زيادة مقاومة الشد في التعting الثلاثي بمقدار 5% عن ثنائي المراحل مع تحسين في مقاومة التآكل بالتشقق الإجهادي.

ودرس الباحث M. Esmailian وزملاؤه [11] تأثير زمن معالجة الإرجال على خواص السبيكة 7055 ذلك في معالجة الإرجال وإعادة التعting RRA، وقد حصل أعلى قيم إجهاد الخضوع 595 Mpa عند زمن إرجاع 40 min .

وقد لاحظنا عدم تطرق الباحثين في الأبحاث المذكورة آنفـاً-تأثير المعالجة الميكانيكية (التشكيل) مع المعالجات الحرارية على خواص سبيكة الألمنيوم 7075 لذلك هدفنا في هذا البحث إلى دراسة تأثير المعالجات الميكانيكية (التشكيل بالبثق) والمعالجات الحرارية (التعting الاصطناعي Artificial Ageing، T6، والإرجال وإعادة التعting RRA Retrogression and re-ageing) على خواص الميكانيكية (خواص الشد والقساوة) لسبائك ألمونيوم-زنك-مغنيزيوم-نحاس 7075.

2. المواد والأساليب Materials and Methods

تم استلام السبيكة 7075 موضوع البحث وكانت على شكل بيليت بسمانة [Cm] 12، وبين الجدول 1 التركيب الكيميائي لسبائك ألمونيوم-زنك-مغنيزيوم-نحاس 7075.

الجدول (1) التركيب الكيميائي لسبائك ألمونيوم 7075

النسبة الوزنية للعناصر في السبيكة 7075 (%) wt)							
Si	Ti	Cr	Fe	Cu	Mg	Zn	Al
0.06	0.03	0.18	0.24	1.8	2.9	6.7	Balance

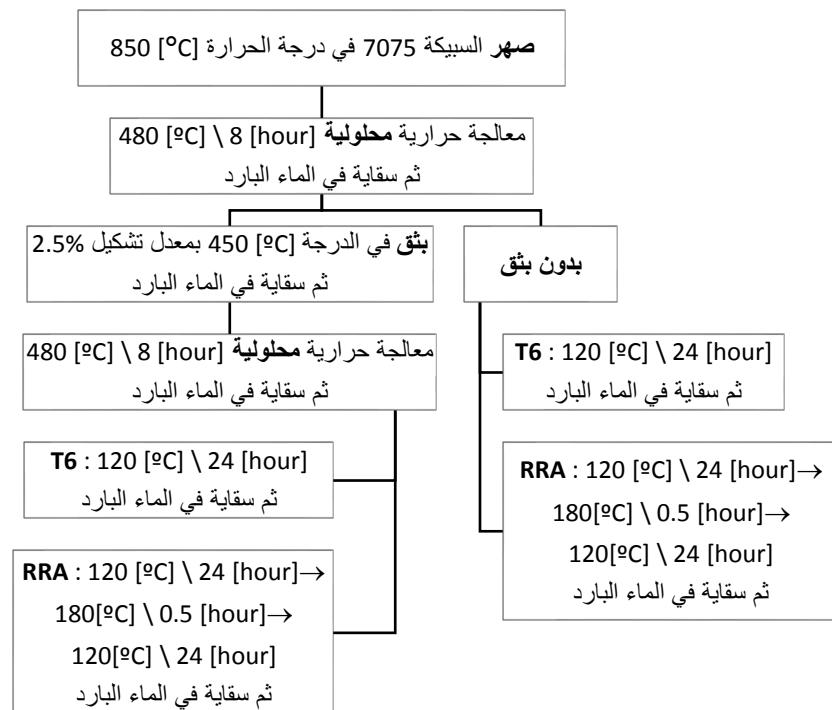
تم صهر كمية من السبيكة 7075 في بونقة غرافيتية في فرن كهربائي، وقد تمت عملية الصهر عند درجة حرارة 300°C لضمان الصهر، ثم سُكب المنصهر في قالب فولاذی المبين في الشكل 1 والمعد مسبقاً للحصول على المسبوکات الاسطوانية والتي كانت بقطر 25 mm وارتفاع 150 mm ، وقد تم تسخين قالب المعدني قبل عملية الصب إلى الدرجة 300°C لتلافي التجمد المسبق للمنصهر وللتقليل من عيوب السباكة في المسبوکات الناتجة، وأخيراً تم إخراج المسبوکات من داخل قالب بعد تبریده.



الشكل 1 قالب الفولاذی المستخدم للصب .

عُرضت جميع المسبوکات للمعالجة الحرارية المحلولية في درجة الحرارة 480°C لمدة 8 h ثم تمت السقاية في الماء البارد. ثم قُسمت المسبوکات لمجموعتين عُرضت مسبوکات المجموعة الأولى فوراً للمعالجات الحرارية (T6 و RRA) بدون تعريضها للمعالجة الميكانيكية بالبثق، أما مسبوکات المجموعة الثانية طُبقت عليها عملية التشكيل بالبثق لدراسة تأثير المعالجات الميكانيكية ثم سقاية في الماء البارد وبعد ذلك طُبقت المعالجات الحرارية (T6 و RRA) ، وكان معدل البث 2.5% إي أن قطر العينات بعد عملية التشكيل بالبثق يكون 10 mm وقد تم بداية تسخين العينات و قالب البثق لدرجة الحرارة 450°C لمدة 30 min وبعد تنفيذ البث قمنا بسقاية العينات المبتوقة بالماء البارد، وبين الشكل 2 مخطط يوضح مراحل العمل هذه.

وقد تمت المعالجة T6 بتطبيق التعنیق الاصطناعي في درجة الحرارة 120°C لمدة 24 h ثم السقاية في الماء البارد، أما المعالجة RRA وهي إعادة التعنیق بعد الإرجاع حيث تم التعنیق الاصطناعي الأول في درجة الحرارة 120°C لمدة 24 h ثم الإرجاع Retrogression في درجة الحرارة 180°C لمدة 30 min ثم إعادة التعنیق الاصطناعي في درجة الحرارة 120°C لمدة 24 h ، وبين الشكل 3 الفرن الكهربائي المستخدم لتطبيق هذه المعالجات الحرارية.



الشكل 2 مخطط عام يبين مراحل العمل.



الشكل 3 الفرن الكهربائي المستخدم في المعالجات الحرارية.

3. المناقشة والنتائج

يبين الجدول 2 مواصفات السبيكة 7075 قبل تعريضها لأي نوع من المعالجات الميكانيكية (التشكيل بالبثق) أو الحرارية (RRA أو T6).

الجدول (2) مواصفات الميكانيكية للسبائك 7075 قبل تعريضها لأي نوع من المعالجات.

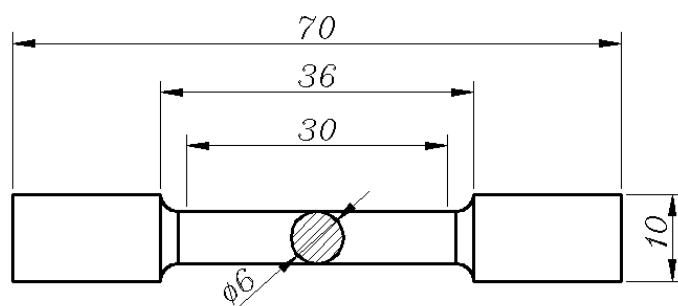
قيمة في كيلوغرام [HV]	إجهاد الخصوع YS [N/mm²]	مقاومة الشد UTS [N/mm²]
100	160	180

3.1. خواص الشد

تم إجراء اختبار الشد وفق الموصفة ASTM-B557 عن طريق جهاز الاختبار TINIUS OLSEN H25KS المبين في الشكل 4، ويظهر في الشكل 5 أبعاد عينة الشد المختبرة، وقد تم إجراء الاختبار خمس مرات لكل حالة من العينات وأخذ المعدل لها، فمثلاً قد بلغت مقاومة الشد الأعظمية UTS للعينات المعالجة بـ T6 والمعرضة للبثق -510-511-509.3 ف تكون القيمة المتوسطة لهذه القيم 512.13 N/mm^2 تقريباً.

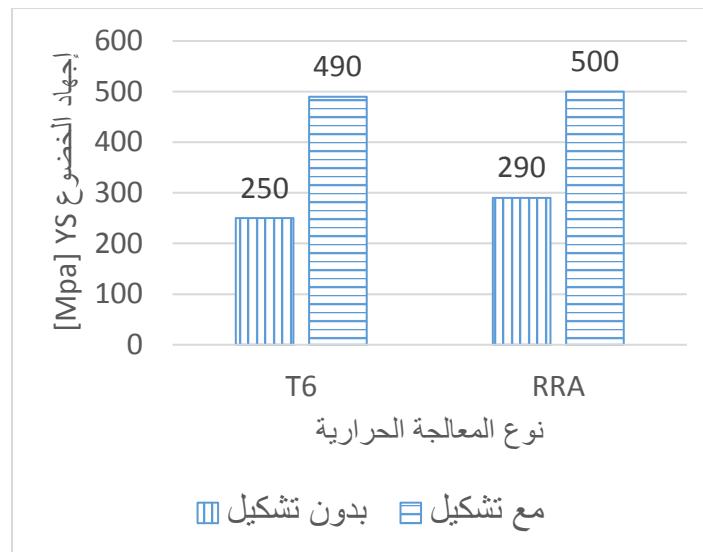


الشكل 4 جهاز اختبار الشد.

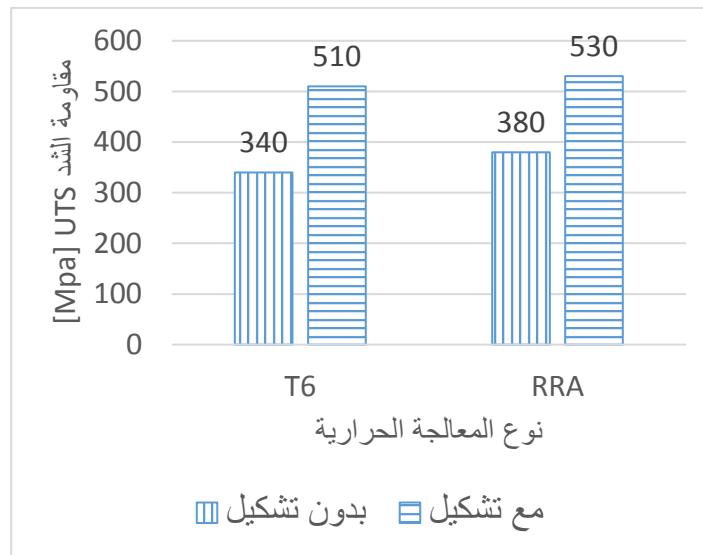


الشكل 5 أبعاد عينة الشد.

ويظهر في الشكل 6 والشكل 7 قيم إجهاد الخضوع (YS) ومقاومة الشد (UTS) على التوالي للسيكية 7075 عند تعریضها للمعالجة الحرارية T6 و RRA مع وبدون التشكيل بالبثق.



الشكل 6 قيم إجهاد الخصوع للسيكة 7075 معالجة حرارياً بـ T6 و RRA قبل وبعد التشكيل.



الشكل 7 قيم مقاومة الشد للسيكة 7075 معالجة حرارياً بـ T6 و RRA قبل وبعد التشكيل.

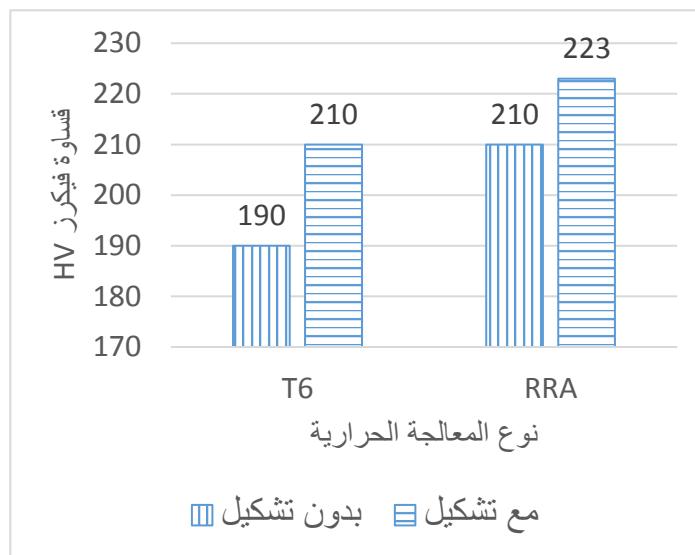
3.2. القساوة

تم إجراء اختبار القساوة وفق المعاصفة ASTM-E92 بواسطة جهاز قياس قساوة فيكرز المبين في الشكل 8 وهو من النوع HARTEPRÜFER GNEHM:230 زمن تطبيق الحمل 20 sec و الحمل المطبق Kgf 4، وقد أخذت خمسة قراءات للقساوة من كل عينة من مناطق مختلفة لتحديد القيمة المتوسطة للقساوة.

ويظهر في الشكل 9 قيم قساوة فيكرز للسيكة 7075 معالجة حرارياً بـ T6 و RRA قبل وبعد التشكيل



الشكل 8 جهاز قياس قساوة فيكرز.



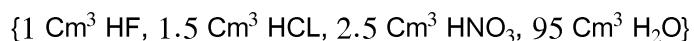
الشكل 9 قيم قساوة فيكرز للسبيكة 7075 معالجة حرارياً بـ T6 و RRA قبل وبعد التشكيل.

ونلاحظ من الأشكال 6 و 7 و 9 بأن خواص الشد (UTS وYS) وقساوة فيكرز للسبيكة 7075 عند معالجتها بتطبيق معالجة الإرجاع وإعادة التعتيق RRA كانت ذات قيم أعلى مما كانت عليه عند معالجة نفس السبيكة بالمعالجة T6، حيث كانت قيم إجهاد الخضوع 250 Mpa ومقاومة الشد العظمى 340 Mpa والقساوة HV 190 ذلك عند تطبيق المعالجة T6، في حين بلغت هذه القيم لإجهاد الخضوع 290 Mpa ومقاومة الشد العظمى 380 Mpa والقساوة HV 210 عند تطبيق معالجة RRA. وإن جميع هذه القيم المذكورة كانت بدون تعريض العينات لعملية التشكيل وبالتالي حيث نلاحظ بأن تعريض العينات لعملية التشكيل وبالتالي أدى بشكل عام لتحسين جميع هذه الخواص لتصبح من أجل المعالجة T6 إجهاد الخضوع 490 Mpa ومقاومة الشد العظمى 510 Mpa والقساوة 210 HV، ومن أجل المعالجة RRA إجهاد الخضوع 500 Mpa ومقاومة الشد العظمى 530 Mpa والقساوة HV 223.

3.3. الصور المجهرية

للحصول على الصور المجهرية وفق المعاصفة ASTM-E3 تم استخدام المجهر الضوئي Met Optika B-353 وبمقدار تكبير 200X حيث شُحذت سطوح العينات باستخدام جهاز الشذ نصف الآلي بورق الشذ المائي ذات الدرجات 800، 600، 400، 200.

1000، ثم صقلت باستخدام معجون الألماس الصناعي $0.25 \mu\text{m}$ ، ثم تم تخريش سطوح العينات بغمصها لزمن يتراوح بين (10-20) ثانية. في محلول الإظهار Keller's Reagent وهو ذو التركيب التالي [12]:



ويبين الشكل 10 الصور المجهرية لعينات مختلفة من السبيكة 7075 ويظهر فيه:

الشكل a-10 عينة من السبيكة 7075 قبل تعريضها للمعالجة الحرارية (T6 أو RRA) وبدون تعريضها للتشكيل بالبثق، وقد احتوت هذه العينة على تشعبات Dendrites أولية للمحلول الصلب الغني بالألミニوم وشبكة التشعبات الداخلية والمكونات المعدنية الداخلية حول الحبيبات الأولية، وتحتوي على العديد من الحبيبات الناعمة المتتساوية والمحتوية على حبيبات متغيرة فيما بينها وقد كان متوسط حجم الحبيبات تقريباً $55 \mu\text{m}$.

الشكل b-10 عينة من السبيكة 7075 معرضة للمعالجة الحرارية T6 قبل تعريضها للتشكيل بالبثق، بدأت كثافة الشبكة التشعبية بالتناقص تدريجاً، وأصبحت الأطوار المتبقية صغيرة ومتفرقة بسبب المعالجة الحرارية، كما أن متوسط حجم الحبيبات كان بحدود $50 \mu\text{m}$ تقريباً.

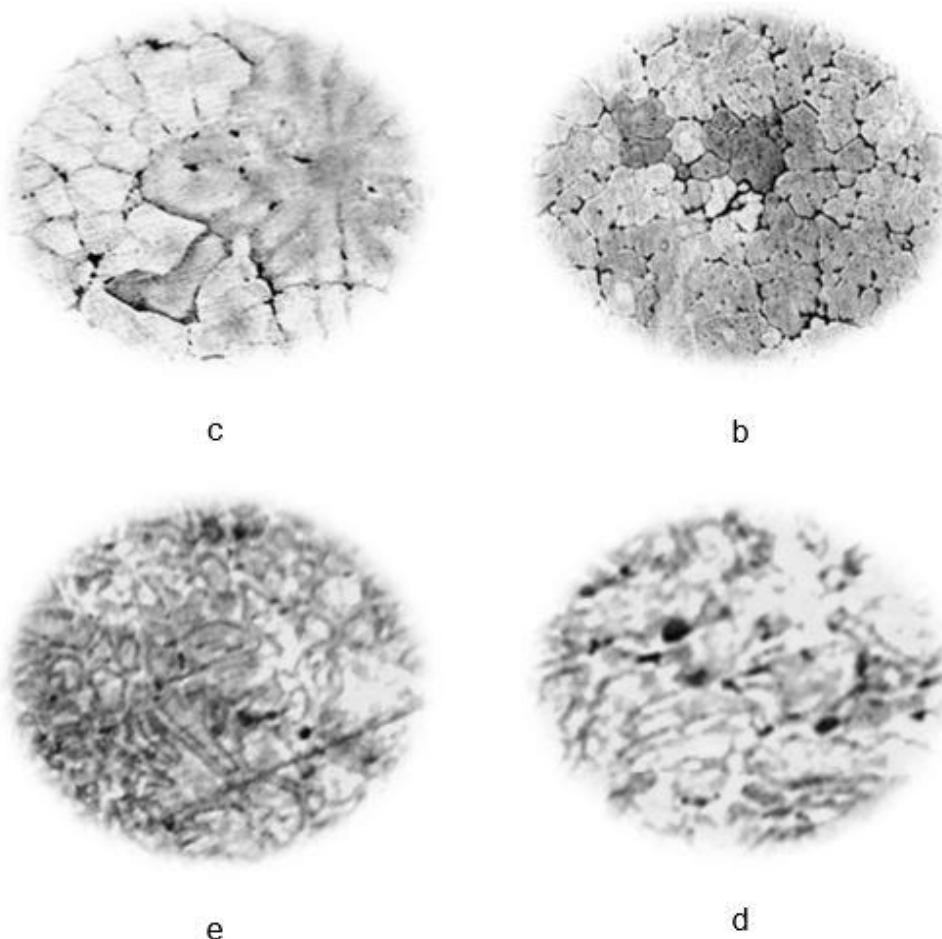
والشكل c-10 لعينة من السبيكة 7075 معرضة للمعالجة الحرارية RRA قبل تعريضها للتشكيل بالبثق، وأصبحت كثافة الشبكة التشعبية أقل من سابقتها، وقد انخفض متوسط حجم الحبيبات إلى $45 \mu\text{m}$ تقريباً.

الشكل d-10 عينة من السبيكة 7075 معرضة للمعالجة الحرارية T6 بعد تعريضها للتشكيل بالبثق، والشكل e-10 عينة من السبيكة 7075 معرضة للمعالجة الحرارية RRA بعد تعريضها للتشكيل بالبثق ونلاحظ فيها تغير شكل الحبيبات بسبب عملية التشكيل بالبثق.

ويمكن ملاحظة أن المعالجات الحرارية قد أدت لانخفاض الحجم الحبيبي وتعيم البنية البلورية للسبائك 7075 وأن الانخفاض في الحجم البلوري بنتيجة المعالجة الحرارية RRA كان أكثر منه عند تطبيق المعالجة T6، وإن هذا التغير الحاصل في الحجم الحبيبي بالإضافة للتغيرات في البنية البلورية والأطوار المترتبة قد أدى لتحسين الخواص الميكانيكية (مقاومة الشد الأعظمية UTS وإجهاد الخصوص YS والقساوة HV) للسبائك 7075. كما وقد أدت عملية التشكيل بالبثق لتحسين إضافي في الخواص الميكانيكية للسبائك 7075 بفعل التخلص الانفعالي.



a



الشكل 10 الصور المجهرية بتكبير $\times 200$ لعينات من السبيكة 7075 معرضة للمعالجات الحرارية T6 و RRA قبل وبعد التشكيل.

4. الاستنتاجات Conclusions

1. حسنت المعالجات الحرارية بشكل عام الخواص الميكانيكية للسبائك 7075 بنتيجة التغيرات الحاصلة في البنية البلورية والحجم البلوري والأطوار المترسبة بالتعتيق، وكذلك حسنت المعالجات الميكانيكية بالبق الخواص الميكانيكية بنتيجة التصليد الانفعالي الحاصل في بنية السبيكة 7075.
2. إن المعالجة الحرارية بالإرجاع وإعادة التعتيق (RRA) لسبائك الألمنيوم 7075 حسنت الخواص الميكانيكية لها أكثر مما قد حسنته المعالجة الحرارية T6، حيث حصلنا على القيم العظمى لمقاومة الشد وإجهاد الخضوع والقساوة للسبائك 7075 عند تطبيق المعالجة RRA، في حين كانت قيم هذه الخواص أقل عند تطبيق المعالجة الحرارية T6.
3. حسنت المعالجات الحرارية البنية المجهرية للسبائك 7075 حيث أدت لانخفاض الحجم الحبيبي، كما أدت لتقليل كثافة الشبكة التشعيبة الموجودة في البنية، وقد كانت كثافة هذه التشعيبات عند تطبيق المعالجة الحرارية RRA أقل منها عند تطبيق المعالجة T6.

CONFLICT OF INTERESTS.

- There are no conflicts of interest.

5. المصادر References

- [1] George E. Tot ten and D. Scott MacKenzie, Handbook of Aluminum Volume 7 Physical Metallurgy and Processes, MARCEL DEKKER, INC, 2003.
- [2] TapanyUdomphol, Aluminum and its Alloy, Suranaree University of Technology, 2007.
- [3] K. S. GHOSH and N. GAO, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 21, 2011, p. 1199.
- [4] F. Viana, A. M. Pinto, H. M.C. Santos and A. B. Lopes, "Retrogression and re-ageing of 7075 aluminium alloy microstructural characterization," *Journal of Materials Processing Technology*, no. 92±93, p. 54±59, 1999.
- [5] A. D. Isadare, B. Aremo, M. O. Adeoye, O. J. Olawale and M. D. Shittu, "Effect of Heat Treatment on Some Mechanical Properties of 7075 Aluminium Alloy," *Materials Research*, pp. 190-194, 2013.
- [6] M. F. Ibrahim, A. M. Samuel, S. A. Alkahtani and F. H. Samuel, "A Novel Solution Heat Treatment Of 7075-Type Alloy," *The Minerals Metals & Materials Society*, pp. 383-390, 2013.
- [7] A.F. Oliveira, Jr., M.C. de Barros, K.R. Cardoso and D.N. Travessa, "Materials Science and Engineering A," *The effect of RRA on the strength and SCC resistance on AA7050 and AA7150 aluminium alloys*, no. 379, p. 321–326, 2004.
- [8] Hong-ying LI, Jiao-jiao LIU, Wei-chen YU, Hui ZHAO and De-wang LI, "Microstructure evolution of Al-Zn-Mg-Cu alloy during non-linear cooling process," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, p. 1191–1200, 2016.
- [9] P. K. Rout, M. M. Ghosh and K. S. Ghosh, "Microstructural, mechanical and electrochemical behavior of a 7017 Al-Zn-Mg alloy of different temps," *Materials Characterization*, 2015.
- [10] CHEN Song-yi, CHEN Kang-hua, DONG Peng-xuan, YE Sheng-ping, HUANG Lan-ping and YANG Dai-jun, "Effect of a novel three-step aging on strength, stress corrosion cracking and microstructure of AA7085," *J. Cent. South Univ*, p. 1858–1862, 2016.
- [11] M. Esmailian 'M. Shakouri 'A. Mottahedi , S. G. Shabestari" 'Effect of T6 and Re-Aging Heat Treatment on Mechanical Properties of 7055 Aluminum Alloy "International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering 'pp. 1291-1294 .2015 '.
- [12] William F. Gale, Terry C. Totemeier, Smithells Metals Reference Book, 8 ed., Butterworth-Heinemann, 2004.