

تحسين القساوة وصلابة الصدم لسبيكة ألمنيوم 2014 باستخدام التعتيق المتقطع T6i6

الدكتور علي هترة*
الدكتور خليل عزيمة**
آرام عبد الرحيم***

(تاريخ الإيداع 28 / 4 / 2008. قُبِلَ للنشر في 2008/7/28)

□ الملخص □

إنّ هدف هذا البحث هو دراسة تأثير التعتيق في صلابة الصدم لسبيكة 2014 Al-Cu-Mg . بعد التخمير الانتشاري solution treatment إلى درجة 493C° والإبقاء لمدة ساعة عند هذه الدرجة، ومن ثم الإسقاء في الماء، عتقت العينات بعد ذلك عند درجة 150C° لفترات مختلفة (من 1 حتى 18 h) خلال فاصل زمني متضاعف لوغاريتميا . ضبطت مراحل الترسيب في أثناء التعتيق بقياسات القساوة. لكل مجموعة عينات، نفذت اختبارات القساوة وصدمة Izode .

تزايدت أولاً بعد التعتيق صلابة الصدم للسبيكة ، و تبعه بعد ذلك، هبوط حاد بسبب ترسب الأطوار الوسيطة، أخيراً وصل إلى حدّه الأدنى في ذروة القساوة. نوقشت الارتباطات بين القساوة، وصلابة الصدم للعينات المدروسة.

الكلمات المفتاحية : التقسية الترسيبية – التعتيق – تطبيع T6 – تطبيع T6i6 – الرواسب.

* أستاذ مساعد – قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – سورية.

**أستاذ – قسم التصميم الميكانيكي – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق – سورية.

***طالب دراسات عليا (ماجستير) – قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – سورية.

Improving Hardness and Impact Toughness for the Aluminum Alloy 2014, using the Interrupt Aging T6i6

Dr. Ali Hatra*
Dr. Khalil Azimeh*
Aram abdulrahim***

(Received 28 / 4 / 2008. Accepted 28 / 7 / 2008)

□ ABSTRACT □

The aim of this study is to investigate the effect of aging on the toughness impact of 2014 Al-Cu-Mg alloy. Following the 1 h solution zing treatment at 493°C and water quench, the specimens were aged at 150°C for various periods (1 to 18 h). The precipitation stages during aging were monitored by hardness measurements. For each specimen group, Izode impact and hardness tests were carried out. During aging, the toughness impact of the alloy first increased, and then, followed a maximal decrease due to the precipitation of intermediate phases; finally it reached a minimum at the peak of hardness. The correlations between hardness and toughness impact were also investigated.

Keywords: age-hardenable, aging, T6 temper. T6i6 temper, precipitate.

* Associate Professor, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering , Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Professor, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

***Postgraduate Student, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

سبائك الألمنيوم القابلة للتصلب بعملية التعتيق ذات فائدة كبيرة للتطبيقات الهندسية بسبب التحسينات الكبيرة في مقاومة الخضوع والقساوة التي تحصل نتيجة المعالجات الميكانيكية المتحكم بها، والتي تجري بعد عملية التعتيق. إن الآليات الميكروية *Micromechanisms* التي تحكم خصائص كسر مثل هذه السبائك تعتمد على تماسك *coherency* وتوزيع الرواسب وحجم وشكل الحبيبات، والرواسب عند حدود هذه الحبيبات، ووجود جزيئات الطور الثاني التي تنتج من الشوائب.

يصبح الكسر المفاجئ غير المستقر متكرراً وإن كان مطيلياً، لأن زيادة مقاومة الصدم تخفض من مستوى الصلابة، وهذا يصبح مشكلة للأجسام ذات الأبعاد الكبيرة. وبما أن عملية كسر العديد من المواد تحصل تحت ظروف ديناميكية، لذلك فهناك حاجة ماسة لفهم سلوك كسر المواد تحت الأحمال الديناميكية.

علاوة على ذلك، فإن ميزات الكسر تحت حمولة الصدم تبدو مهمة، بسبب زيادة تطبيقات عربات النقل. لذا في أثناء الاختبارات الميكانيكية، قد يكون من المفيد إجراء اختبارات صدم Charpy وذلك لتطوير الارتباطات التجريبية بين بارامترات الكسر المختلفة. [4]

نشرت دراسات مختلفة عن تطور البنية المجهرية، وخصائص الشد وصلابة الكسر لسبائك الألمنيوم المصلبة بالترسيب. اهتم بعض الباحثين أيضاً بالتوصيف غير التدميري لسبائك الألمنيوم المعققة. قام العالمان Hagemaiier و Kleint بدراسة علاقة الموصلية الكهربائية- التعتيق-القساوة لسبائك الألمنيوم في مختلف أشكال التطبيق. [6]

درس Gefen وآخرون، الخلاف في التوهين فوق الصوتي *ultrasonic attenuation* في أثناء التعتيق لسبيكة 2014. [7]

أنشأ Hagemaiier العلاقة بين الموصلية الكهربائية مقابل مقاومة الصدم والعلاقة بين القساوة مقابل المقاومة لعينات سبيكة 7075 -T6 و T3 / T4 -2014. [8]

درس Rosen وآخرون. تصلب الترسيب في سبيكة 2219 بقياس سرعة الصوت والتضعيف *attenuation* والقساوة. أنشئت القياسات كتابع لزمان التعتيق في درجات حرارة مختلفة، لعرض التغييرات البارزة والتشوهات المتعلقة بتشكيل الرواسب. كما درس تأثير القوى المحركة *kinetics* للترسيب في أثناء التعتيق في الموصلية الكهربائية والقساوة في كلا التشوهات اللدنة لعينات سبيكة 2014. [9]

طوّر Natan و Chihoski طريقة جديدة لتقييم المعالجة الحرارية لسبائك الألمنيوم بإنشاء حقل الموصلية -القساوة المتشكل من شبكة خطوط إحداثية منحنية لأزمنة التعتيق والإسقاء. [10]

درس Rosen وآخرون، سرعة الصوت والتوهين، وقياسات القساوة والتيار الدوامي (تيارات فوكو) على سبيكة 2014 مصلبة بالترسيب الخاضعة إلى سلسلة مختلفة من عمليات المعالجة الحرارية السابقة للتعتيق وذلك قبل إجراء عمليات التطبيق المتنوعة. [9]

تحزّى Murav'ev تأثير الأنواع المختلفة وظروف المعالجة الحرارية في تردد الرنين وسرعة الصوت في سبائك Al. على أية حال، لحد الآن ليس هناك الكثير من المعلومات فيما يتعلق بتأثير الترسيب في صلابة الصدم.

أهمية البحث وأهدافه:

إحدى الفوائد العملية لتطبيع T6i4 هي التخفيض في التكاليف وذلك بتخفيض مدّة المعالجة الحرارية المطلوبة. والتي تتضمن إمكانية تخفيض أثر فرن التعتيق الاصطناعي ، والتخفيض في الأزمنة بعد التعتيق الاصطناعي، والخصائص الميكانيكية المحسّنة (مثل القساوة والصلابة) وإمكانية تعديل تركيب السبيكة لتحسين الاستجابة للتعتيق الثانوي، لتخفيض أكثر لتكاليف المكونات وزيادة استعمال الألنيوم في عربات النقل. [1]

طرائق البحث ومواده:

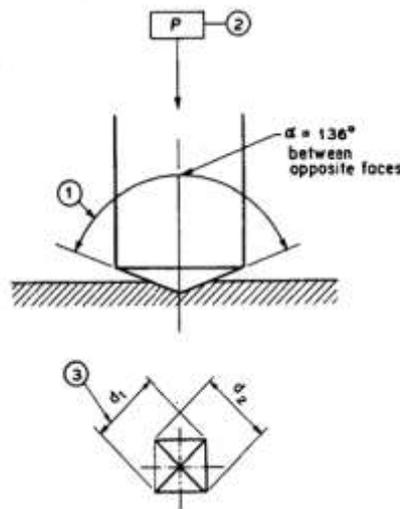
تم تحضير مجموعتين من العينات من سبيكة 2014 ، كلّ مجموعة تحتوي ثماني عينات لاختبار القساوة دائرية الشكل بقطر 10mm وطول 10mm وخمس عينات لاختبار الصدم مستطيلة بأبعاد 55x10x10mm، مع حز على شكل حرف V بزاوية 45° وعمق 2mm كما هو موضح **بالشكل 5**. خمرت العينات عند درجة 493C° لمدة 1h ، ثمّ، سقيت بالماء. وبعدها عتقت بدرجة حرارة 150C° لأزمنة تعتيق مختلفة (1 h - 18) بفواصل زمنية متزايدة لوغاريتميا وفي التعتيق المتقطع *Interrupted* ظلت لمدة 0.5h بالفرن كعملية تعتيق أولي ثم وضعت مدة أسبوعين بدرجة حرارة الغرفة ثم عرضت إلى درجة 150C° في فترات محدّدة مسبقا، برّدت العينات بسرعة إلى درجة حرارة الغرفة وأخضعت إلى القياسات والاختبارات الميكانيكية. وأجريت التجارب عند تطبيع T6-150 و T6i6-150 (تعتيق متقطع) لمعرفة الفرق والتحسين في الخواص الميكانيكية .

تمّت مراقبة تطور البنية المجهرية باستعمال قياسات القساوة باستخدام جهاز قساوة Vickers نوع

HARTEPRÜFER GNEHM Type: 230 بدقة ±0,1.

الحمل المطبق كان 10 Kgf، سرعة التحميل 100 μm/s ، ووقت الضغط 20 ثانية. الرأس المستعمل من الماس الهرمي قاعدته مربع صغير وزوايا وجهه 136°. تم قياس الأقطار d_1 و d_2 ، للأثر الناتج عن الرأس الهرمي بعد تطبيق الحمل وذلك باستخدام مجهر ضوئي، إذ حسب رقم القساوة HV عديم الواحدة ، بشكل آلي من المعادلة التالية:

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{2P \sin(136^\circ/2)}{d^2} = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

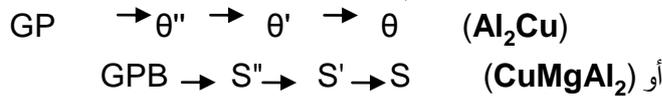


الشكل (1) الرأس الهرمي لجهاز قساوة فيكرز

إذ P الحمولة Kgf ، d القطر الوسطي للأثر mm ، و α زاوية وجه الهرم $= 136^0$ ،
تأخذ خمس قيم للقساوة لكل عينة من العينات المختبرة من مناطق مختلفة لتحديد القيمة المتوسطة للقساوة،
وللحصول على المعلومات حول تجانس البنية المجهرية.
قيست قيم لطاقة كسر الصدم بألة اختبار من نوع نواسي طراز *Broks inspection charpy* في درجة
حرارة الغرفة. فحصت سطوح كسر عينات Izode باستعمال مجهر إلكتروني مسحي وذلك لتحديد شكل الكسر كما هو
مبين في الشكل (9).

النتائج والمناقشة:

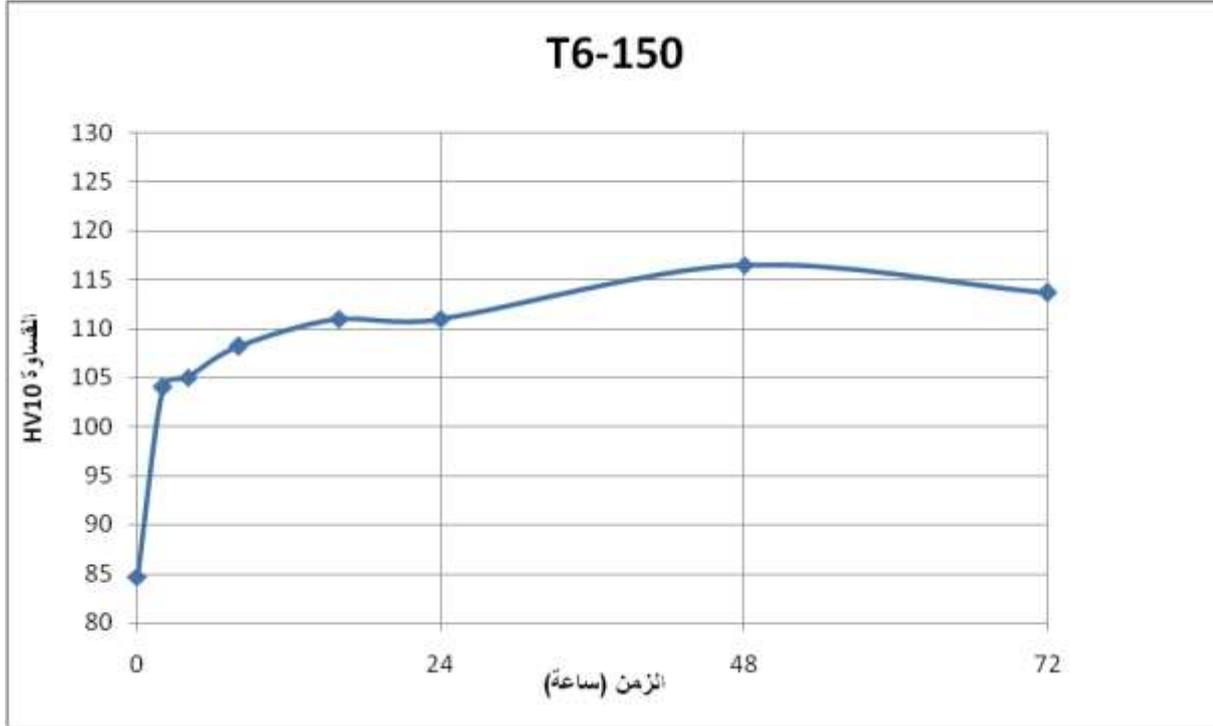
إن تطور البنية المجهرية لسبائك Al-Cu معقد، وتغير سلسلة الترسيب يعتمد على درجة الإشباع الأقصى
للمحلول ودرجة حرارة التعتيق. في حالة سبيكة 2014 توجد تحولات متعاقبة من المحلول المشبع الصلب، حيث تأخذ
سلسلة الترسيب إحدى المعادلتين أدناه حسب نسبة المغنسيوم والنحاس :



إذ ظهر تعبير مناطق GPB (Guinier–Preston–Bagaryatsky) في أعمال Silcock الذي اقترح بأنها قد
تختلف عن مناطق GP (Guinier–Preston) في سبائك Al–Cu والتي هي عبارة عن تجمعات لذرات النحاس
على شكل أقراص متماسكة مع الهيكل البلوري لنسق الألمنيوم ، والتي قد اكتشفت في وقت سابق. في أغلب الأحيان
يؤخذ تسلسل ترسيب السلسلة أعلاه ، لكن ما يزال الجدول قائماً حول تركيب الأطوار .
سلسلة الترسيب الكاملة يمكن فقط أن تحدث عندما تعتنق السبيكة عند درجات الحرارة الواقعة تحت خط السيولة
solvus لمناطق GP. عادة تتضمن آلية سلسلة التحويل تشكل نوى متباين في مواقع الترسيبات السابقة، مما يؤدي إلى
نشأة ناعم وموحد للراسب.

تتشكل مناطق GP عند درجة $150C^0$ بسرعة كبيرة جداً وتبقى مستقرة لمدة أطول كما هو موضح بالمنطقة
المستوية في منحنى التعتيق **شكل 2** وذلك بعد الإسقاء مباشرة. عندما يقترب زمن التعتيق من 24 ساعة تبدأ رواسب
 θ'' بالتشكل سوياً مع مناطق GP ويستمر تشكل طور θ'' ويقاؤه بشكل مستقل حتى 60 ساعة. وبعد حوالي 48
ساعة من التعتيق يمكن أن نرى قمة أخرى ثانية في منحنى التعتيق الذي يدل على تشكل الراسب التالي، θ' سوياً مع
قليل من θ'' .

إن عملية تصلب التعتيق تدرس في أغلب الأحيان عن طريق قياس القساوة التي تراقب سلسلة الترسيب.
الشكل 2 يبين منحنى القساوة للسبيكة 2014 كتابع لزمن التعتيق عند درجة $150C^0$. يبين هذا المنحنى الزيادة الكبيرة
في القساوة من 85HV حتى 110 HV في الساعات الأربعة الأولى ومع الاستمرار في التعتيق يلاحظ بأن قيم القساوة
تزداد بعض الشيء حتى تصل إلى حدها الأعلى 116 HV بعد 48 ساعة من التعتيق وتستمر تقريبا عند هذه القيمة مع
انخفاض بسيط (طفيف) حتى 72 ساعة .



الشكل (2) منحنى القساوة بدلالة الزمن لسبيكة 2014 عند درجة حرارة تعتيق 150C°

تعتمد قيم القساوة على تماسك *coherency* الرواسب في النسق *Matrix* ، وحجم وتوزيع الرواسب وتقارب الجزيئات. عموماً، الزيادة في القساوة تفسر بالاختلاف في حقول الانفعال في جوار الرواسب. بعد التسقية من المحلول الصلب، فإن السبيكة تحتوي على مناطق انعزال للطور المذاب *solute segregation* . هذه التجمعات تنتج انفعالاً محلياً يؤدي إلى زيادة في القساوة. بالتعتيق الإضافي، القساوة تتردد أكثر بترتيب المجموعات الأكبر لذرات Cu على بعض مستويات النسق (θ''). تتشكل الصفيحات الراسبة المحددة θ' ، المتماسكة بالنسق. الرواسب المتماسكة تنتج حقل انفعال متزايد في النسق و زيادة أكثر في القساوة. بعد تعتيق أطول، يتشكل طور التوازن ، الذي لم يعد متماسكاً مع النسق. لذا، فإن القساوة تبدأ بالنقصان.

قد يحدث **التعتيق الثانوي** إذا عتقت سبائك الألومنيوم القابلة للتعتيق تعتيقاً ناقصاً *underage* أولاً في درجة حرارة مرتفعة (ومثال على ذلك: 150C°)، سقيت وعرضت بعد ذلك إلى درجة حرارة أخفض (ومثال على ذلك 25-65 C°). في درجات الحرارة الأخفض هذه ، تتشكل نويات من الرواسب الناعمة التي تستند البنية المجهرية لعناصر المذاب وتسبب التقوية الإضافية . وصفت هذه المعالجة كتطبيع *T6i4* (*Interrupt= i* أي متقطع) [3]

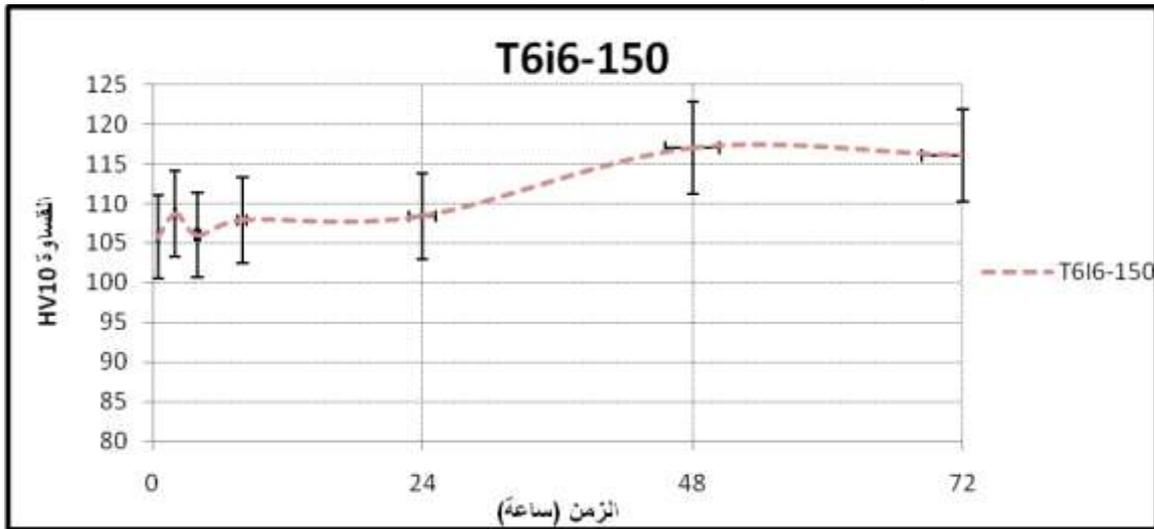
يكتمل تطبيع *T6i6* عندما تمر السبيكة بتطبيع *T6i4* كامل أو جزئي، ثم تعتنق ثانية في درجة حرارة مرتفعة لفترة من الوقت للوصول إلى ذروة المقاومة. نموذجياً، تحدث تحسينات بمتوسط 10-15% ، لقيم القساوة وقيم حد الخضوع ومقاومة الشد القصوى في أثناء إجراء التعتيق هذا ، وتكون هناك تحسينات آنية لصلابة الكسر في أكثر السبائك.

الرواسب المتشكلة في أثناء التعتيق الثانوي

إن نمو الرواسب هو عبارة عن تجمع أكثر للرواسب الموجودة مسبقاً في المذاب. هذا الشكل من الترسيب الثانوي يحدث غالباً إذا توقفت المعالجة عند درجة الحرارة العالية HT بشكل مبكر بحيث يحدث تشكل النوى فقط من

أجنة المذاب الصغيرة. بشكل بديل، قد يصبح مهيمنا في المراحل الأخيرة من التعتيق الثانوي، إذا أوقف انتشار النسق بغياب الفراغات وأصبح الانتشار بين الوجوه هو آلية النقل الأكثر فاعلية. [2]
 في التعتيق المتقطع ، الترسيب الثانوي يستعمل لبدء تشكل نوى لمناطق GP جديدة ، التي قد تحفز عند تعتيق أطول في درجات الحرارة العالية ، تشكيل رواسب أنعم بكثافة أعلى وذلك ضمن نسق الألمنيوم. المجال الزمني الفاصل للتعتيق الثانوي المطلوب في هذه الحالات قد يتراوح من بضع ساعات إلى عدة أيام، إذ إن الحجم الحرج وتشبيت الأطوار الراسبة المطلوبة لتفادي الارتداد *regression* و زيادة التقوية في المرحلة النهائية للتعتيق تتفاوت من سببكية لأخرى .

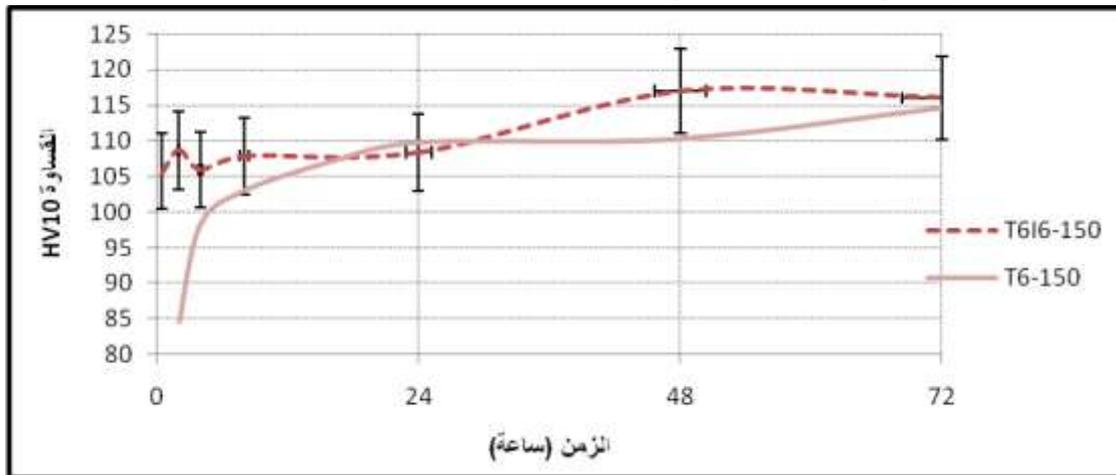
وعند إجراء التطبيع *T6i6* فإن المنحني يأخذ الشكل التالي :



الشكل (3) منحني القساوة بدلالة الزمن للسبيكة 2014 بعد التعتيق المتقطع عند درجة حرارة 150 C^0 لمدة 72h

ونلاحظ تحسناً في قيم القساوة عند الزمن 48 ساعة حيث كانت 116HV في تطبيع T6 وأصبحت 118HV في تطبيع *T6i6* المحسن .

والشكل التالي يوضح المقارنة بعد إخضاع المنحنيين إلى تقريب أسّي :



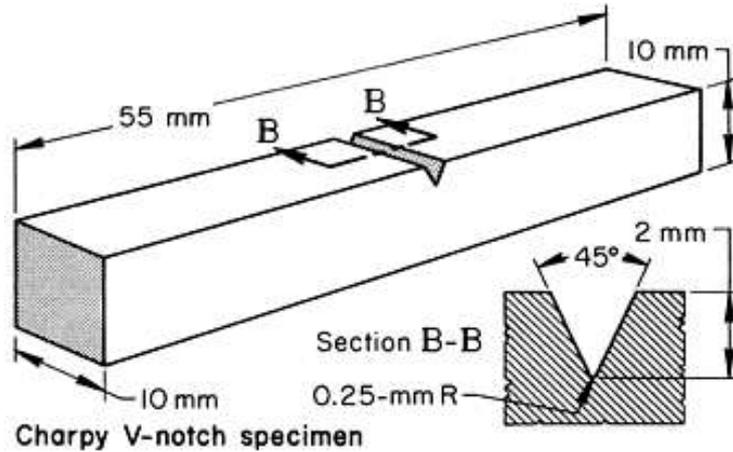
الشكل (4) منحني مقارن للتعتيق الاصطناعي والتعتيق المتقطع بعد تقريب أسّي

اختبار الصدم :

يحدث الكسر الدينامي تحت حمل مطبق بسرعة ، كالناتج عن الصدم أو عن مادة متفجرة . بالمقارنة مع التحميل شبه الساكن quasi-static ، تتضمن الشروط الديناميكية نسب تحميل أكبر من تلك الموجودة في اختبارات الشد التقليدية أو اختبارات ميكانيكا الكسر. [5]

تركز هذه المقالة بشكل خاص على اختبار صدم Izode . استعمل اختبار صدم Izode على نطاق واسع لاختبار أنواع مختلفة من المواد . وبسبب بساطة اختبار Izode ووجود قاعدة بيانات كبيرة، فإن محاولات كثيرة أجريت أيضاً لتعديل عينة الصدم، ومقدار الحمولة، وطرق القياس لاستخلاص المعلومات العددية عن ميكانيكا الكسر الكمية من اختبار Izode .

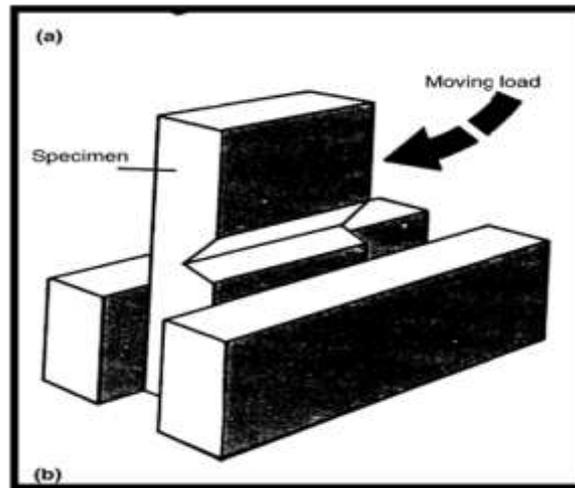
قيست قيم طاقة الكسر بألة اختبار من نوع نواسي طراز Broks inspection charpy عند درجة حرارة الغرفة . واستخدمت طريقة Izode إذ استعملت عينات قياسية وفق معيار ASTM E 23 و ISO148 كما هو موضح على الشكل (5) :



(a)

الشكل (5) تفاصيل الأبعاد لعينة Izode الأكثر استعمالاً لتقييم صلابة التلم. (ASTM E 23 and ISO 148)

والشكل التالي يوضح توضع عينة Izode :



الشكل (6) نوع العينة ووضعيتها اختبار صلابة الصدم البندولي بطريقة Izode

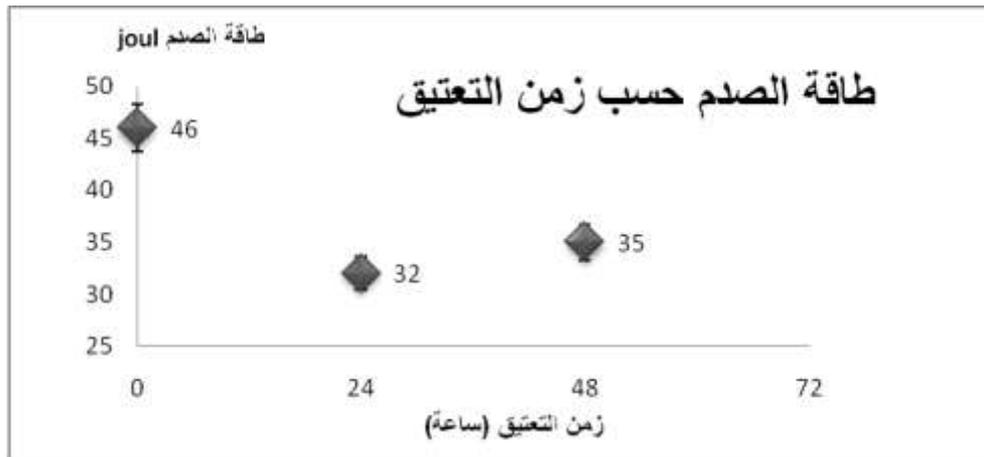
إنّ صلابة الصدم تعتمد بشكل كبير على متغيّرات البنية المجهريّة، وتتأثر بعدد من العوامل، مثل مقاومة الخضوع، المطيلية، درجة حرارة، وآلية الكسر. وكما هو مبين في **الشكل 7**، فإن قيمة طاقة الكسر عند درجة حرارة الغرفة لسبيكة 2014 معتقة عند 150°C تصل إلى (46J) مباشرة بعد الإسقاء، ثمّ تتناقص إلى 32J وذلك بعد 24 ساعة وتعود بعد ذلك للارتفاع قليلاً لتصل إلى 35J عند 48 ساعة. يلاحظ من مقارنة مخطط القساوة ومخطط صلابة الصدم بأن العينة ذات القساوة الأعلى لها صلابة صدم أخفض بسبب تشكل الرواسب الثانوية.

النقصان في طاقة الصدم، على عكس القساوة، يمكن أن يتعلّق بتشكّل الرواسب شبه المستقرة. تكون السبيكة أكثر هشاشة عند زيادة القساوة وحد الخضوع الناتج عن وجود الرواسب وتتنقص طاقة كسر الصدم، إذ يمكن إنتاج عمل لدن أقل قبل أن يكون الانفعال في المنطقة اللدنة كافياً لكسر عينة الاختبار.

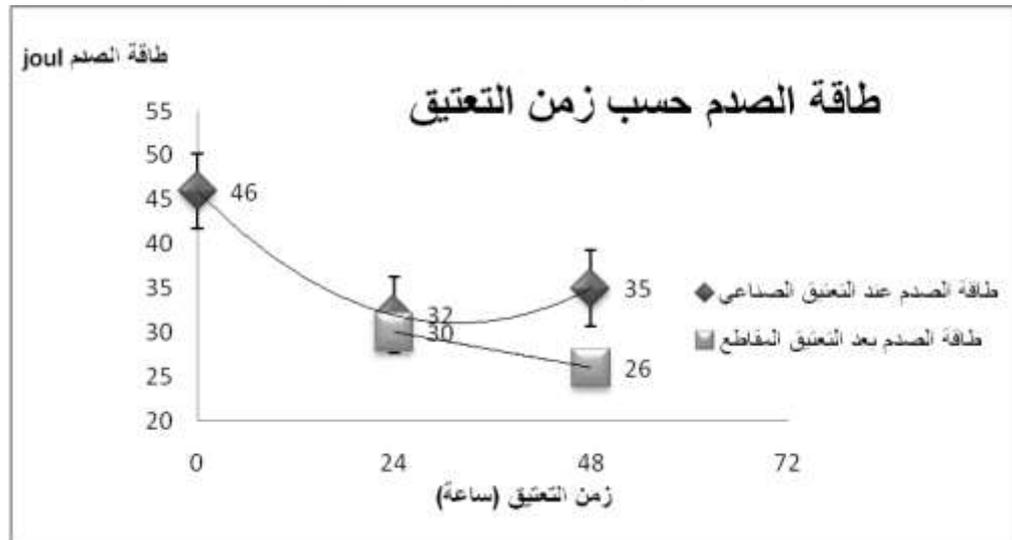
نتيجة مماثلة كانت لسبيكة 7178 معتقة. إنّ النتائج موافقة أيضاً للدراسات السابقة على سبائك Al مختلفة، إذ تبين أن الزيادة في المقاومة عند التعتيق مصحوبة بنقصان مماثل في صلابة الكسر لانفعال المستوي *plane-strain fracture toughness* [5].

وعند التعتيق الثانوي نلاحظ انخفاضاً ملموساً في طاقة الصدم بسبب تشكل أكبر للرواسب شبه المستقرة. انظر

الشكل (8).

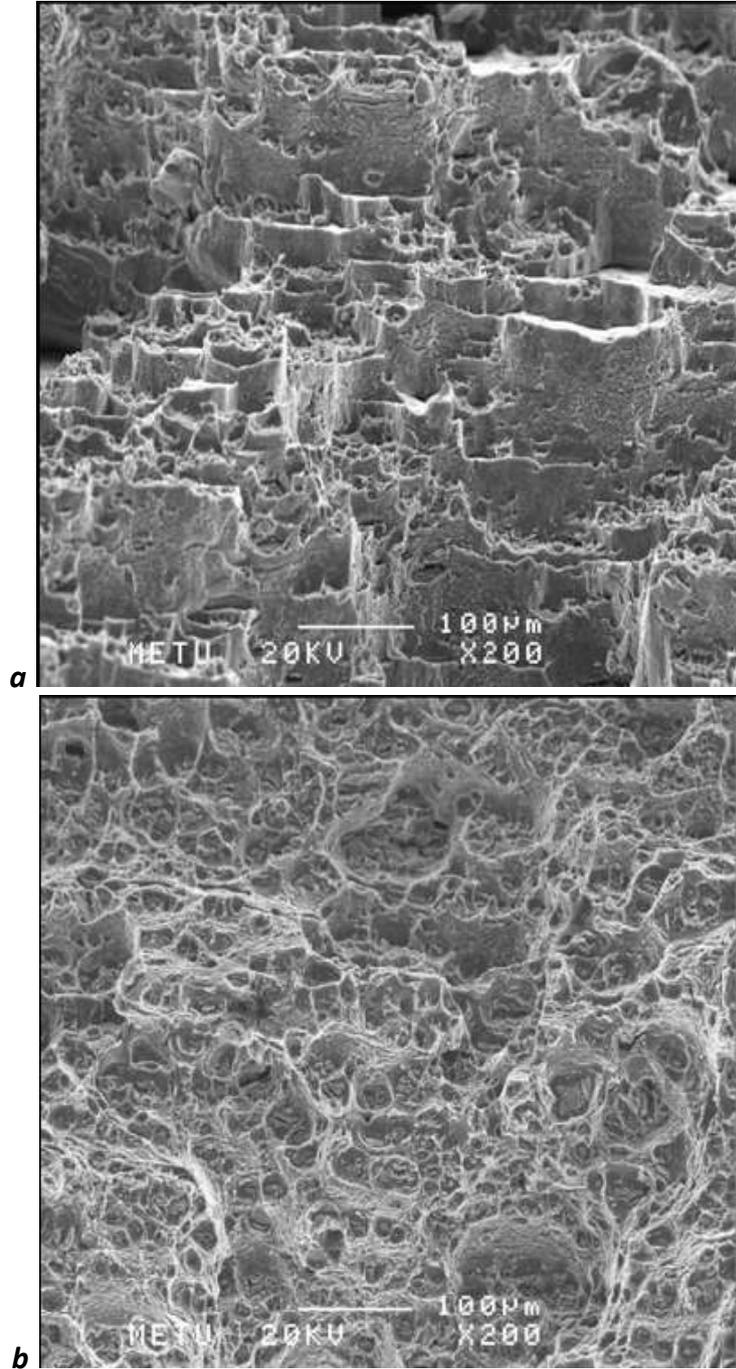


الشكل (7) طاقة الصدم بحسب زمن التعتيق



الشكل (8) طاقة الصدم بحسب زمن التعتيق الثانوي

تم تصوير منطقة الكسر للعينات التي تعرضت لاختبار الصدم والمعتقة مسبقاً لمدة 7h و 13 h وذلك باستخدام مجهر الكتروني مسحي SEM بتكبير x200 وطاقة 20KV .
تظهر صورة الكسر الموضحة في الشكل 9(a) و 9(b). بأن هناك اختلافاً واضحاً في سطوح الكسر.



الشكل(9) صورة الكسر الناتج عن الصدم

نلاحظ من الشكل 9.b أن سطح الكسر المتعلق بقيم الصلابة الأخفض له مظهر يتألف من حبيبات ؛ وتتشكل فراغات صغيرة وقليلة العمق حول المحتويات *inclusions* الأكبر وهذا ما يفسر الصلابة المنخفضة.

الاستنتاجات والتوصيات:

1. بعد الإحماء *solutionizing* عند درجة 493°C لمدة ساعة 1h والإسقاء، حدد الاختلاف في صلابة الصدم لسبيكة Al 2014 كتابع لزمن التعتيق عند درجة 150°C . و ضبطت مراحل الترسيب في أثناء التعتيق بقياسات القساوة .
2. أعلى قيمة مقيسة لطاقة كسر الصدم (46J) تكون بعد الإسقاء مباشرة ، ثم، تتناقص إلى 32J في أزمنة تعتيق أطول .
3. النقصان في طاقة الصدم، على عكس القساوة، يمكن أن يتعلّق بتشكّل الرواسب شبه المستقرة. بزيادة القساوة ومقاومة الخضوع من قبل الرواسب يجعل السبيكة أكثر هشاشة وينقص طاقة كسر الصدم، إذ يمكن إنتاج عمل لدن أقل قبل أن يكون الانفعال في المنطقة اللدنة كافياً لكسر عينة الاختبار .
4. العينة بصلابة صدم أخفض تقابل القيم الأعلى للقساوة .
5. عند التعتيق الثانوي نلاحظ انخفاضاً ملموساً في طاقة الصدم، الموافق لزيادة القساوة عن تلك في التعتيق العادي للتطبيع T6 .
6. عند التعتيق بتطبيع T6i6 عند درجة حرارة 150°C فإن أعلى قيمة للقساوة تكون بعد 48h بسبب تشكل الرواسب الثانوية وتكون أعلى من القساوة حسب التطبيع T6 بفارق 5HV .

المراجع:

1. LUMLEY, R.N., MORTON A.J and. O'DONNELL, R.G, *New Aluminum Alloy Heat Treatment Improves Properties*, CSIRO Manufacturing and Infrastructure Technology, and I.J.Polmear, Monash University, Melbourne, Australia ,November 10, 2004
2. LUMLEY1 R.N., POLMEAR2 I.J., MORTON1, A.J., *Studies of Secondary Ageing in Aluminium Alloys* . MATERIALS FORUM VOLUME 28 © Institute of Materials Engineering Australasia Ltd , - Published 2004
3. LUMLEY R.N., POLMEAR I.J., MORTON, A.J., *Temper Developments Using Secondary Ageing* . MATERIALS FORUM VOLUME 28 ,© Institute of Materials Engineering Australasia Ltd- Published 2004
4. C.H.Gür1, I. Yildiz *Determining The Impact Toughness Of Age-Hardened 2024 Al-Alloy By Nondestructive Measurements* , Middle East Technical Univ, Turkey Published 2004
5. LAMET; JOHN A. BAILEY. *Fracture Toughness and Fracture Mechanics* ,ASM *Metals Handbook, Vol 08* ,Mechanical Testing and Evaluation , USA, published in 2000
6. HAGEMAIER,12. D.J., R.KLEINT, *Metal Progress* (1964) page 115-118.
7. Y.GEFEN, M.ROSEN, *Mater. Sci. Eng.* 8 (1971) page 246-247.
8. HAGEMAIER, D.J., *Mater. Eval.* 40 (1981) page 962-969
9. ROSEN M., HOROWITZ E., FICK S., RENO R.C., MEHRABIAN R., *Sci. Eng.* 53 (1982) page 163-177 .
10. NATAN, M., CHIHOSKI, R.A., *MATER, J. Sci.* 18 (1983) page 3288-3298.