تأثير عملية الإخماد على مخطط حد التشكيل لصفائح من سبيكة الألمنيوم (2024 T3)

وليد جلال علي **ثائر فائز احمد**
قسم الهندسة الميكانيكية - جامعة الموصل / نينوى

الخلاصة

يعرف الإخماد (Quenching) من درجة الحرارة المحلولية بأنه الخطوة الأحرج في تتابع عمليات المعاملة الحرارية المحلولية والهدف من الإخماد هو لحفظ تشكيل المحلول الجامد المكوّن عند درجة حرارة المعاملة المحلولية الحرارية ، ويتم ذلك بالتبريد السريع إلى درجة حرارة الغرفة. الهدف من هذا البحث هو تعيين منحني حد التشكيل عمليا لصفيحة من سبيكة الألمنيوم (2024-T3) كما مستلمة وكذلك إنشاؤه بعد إجراء عملية الإخماد من درجة الحرارة المحلول الجامد ودراسة تأثير عملية الإخماد على منحني حد التشكيل. واختيرت هذه السبيكة لكثرة استخدامها وخاصة في هياكل الطائرات. أشارت النتائج التي تم الحصول عليها في الجانب العملي خلال هذه الدراسة إلى أن عملية الإخماد وبعد مرور 6 ساعات على إجراءها لها تأثير ملموس على منحني حد التشكيل، اذ أدت إلى زيادة في منحني حد التشكيل للسبيكة كما مستلمة (أي بدون المعاملة الحرارية) وكانت هذه الزيادة تتراوح بين (19 and 31 %).

Effect of Quenching on the forming limit diagram of Aluminum alloy sheets(2024 T3)

W. J. Ali **T. F. Sultan**
Mechanical Engineering Department, Mosul University, Mosul , Iraq

Abstract

Quenching is known as the most critical step in the sequence of heat-treating operations. The objective of quenching is to preserve the solid solution formed at the solution heat-treating temperature, by rapidly cooling to some lower temperature, usually near room temperature. The scope of this study is to construct the forming limit diagram experimentally for aluminum alloy (2024-T3) sheet, as received and after Quenching from solid solution temperature. The results which have been obtained experimentally showed that at (6 hours) after Quenching, there is a considerable effect on the FLC, Quenching increases the FLC at the as received condition in the range of (19-31 %) .

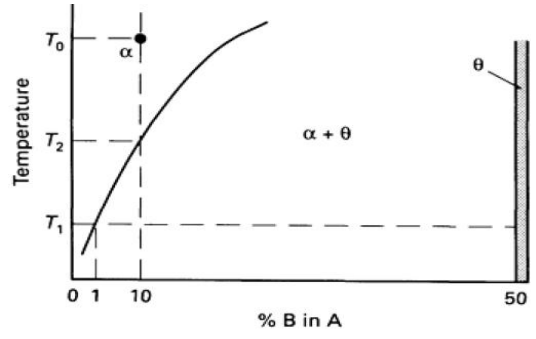
الكلمات الدالة: مخطط حد التشكيل ، الإخماد، المعاملة الحرارية المحلولية .

أستلم في 2008/1/28 **قبل في 2008/4/21**

الرموز	الرمز	تعريفه
	θ	الترسيب غير المترابط (المستقرة)
	α	محلول جامد احادي الطور
	S	اهليلج مقبول
	N	اهليلج غير مقبول

المقدمة :

تعد عمليات تشكيل المعادن بشكل عام من العمليات المهمة والأساسية في مجال الصناعة العالمية إذ أنها تمثل نسبة كبيرة من عمليات التصنيع التي تستخدم التشويه اللدن لتغيير شكل القطعة المعدنية. وأن من بين عمليات التشكيل هذه عمليات تشكيل الصفائح المعدنية التي تمثل نسبة أكثر من نصف مجموع عمليات تشكيل المعادن [1]. إن من الفوائد المهمة للتكنولوجيا في القرن العشرين القابلية على إنتاج أشكال مختلفة من الصفائح المستوية للمعادن وبمعدلات إنتاج عالية [2]. غالبا ما يكون الهدف الأساسي في تشكيل الصفائح هو ما إذا كان التشكيل المطلوب يمكن أن نحصل عليه بدون فشل معدن الصفيحة, حيث تعرف قابلية تشكيل الصفائح على أنها قابلية المعدن على تحمل التشويه اللدن (التشكيل بالمط أو السحب) أي تغيير شكل الصفيحة إلى شكل مرغوب فيه دون حدوث تخصر أو كسر,ولكي يسيطر على هذه العملية دون حدوث فشل يتم استخدام مخطط يبين فيه مناطق التشكيل المقبولة, ومناطق الفشل, والمناطق الحرجة, والذي يدعى مخطط حد التشكيل { Forming Limit Diagram(FLD) } ويعرف على أنه رسم أثر لخليط من الانفعالات التي تقود إلى الفشل. أنشأ مخطط حد التشكيل أول مرة العالم (keeler)[2] . اذ يمكن وصف كل من الانفعالات الرئيسية والثانوية القصوى مع بعض وتوضيحها وذلك عن طريق مخطط حد التشكيل. ويكثر استخدام هذا المخطط في صناعة تشكيل الصفائح لحساب قابلية التشكيل خاصة في صناعة الطائرات والسيارات. إن مخططات حد التشكيل قادرة لإثبات أي تشويه يمكن أن يقود إلى الفشل لعدة مسارات انفعال مختلفة ويعد أداة مهمة في تصميم القوالب بالإضافة إلى التوقع الصحيح للمشاكل في خط الإنتاج[3]، حيث أن معظم مخططات حد التشكيل في البحوث والمختبرات الصناعية معتمد حصولها بالمط فوق خرامة نصف كروية[4].عادةً تمثل عملية الإخماد (Quenching) من درجة حرارة المحلولية احدى أهم الخطوات المستخدمة في عملية الإصلاد بالتعتيق والترسيب إذ تعد من العوامل الضرورية في عملية تشكيل الصفائح المعدنية، وذلك لكون الإخماد له تأثير مهم على مطيلية السبيكة لأنه يؤدي إلى زيادة قابلية التشكيل للصفيحة المستخدمة فضلاً عن تحسين بعض الخواص الميكانيكية، والهدف من عملية الإخماد هو لحفظ تشكيل المحلول الجامد الناتج عند درجة حرارة المعاملة المحلولية الحرارية، وذلك عن طريق التبريد السريع إلى درجة حرارة واطئة، تكون عادةً قريبة من درجة حرارة الغرفة. ويتم استغلال هذه العملية بشكل جيد في صناعة أجزاء الطائرات وغيرها من التطبيقات ومن ثم يؤدي ذلك إلى تقليل الكلفة المستخدمة في الصناعة. يجب أن يخمد المحلول الجامد الذي يشكل خلال المعاملة الحرارية المحلولية بسرعة كافية وبدون توقف لينتج محلولاً فوق المشبع (Supersaturate)عند درجة حرارة الغرفة، وهذه أفضل حالة للإصلاد بالترسيب. تتحسن مقاومة الإجهاد وتآكل التشقق بالتبريد البطيء. يتم غمر معظم الأجزاء التي تخمد في ماء بارد أو في استمرارية المعاملة الحرارية للصفيحة أو اللوح أو البثق في مصانع التصنيع الابتدائي [5].الصفة الضرورية الوحيدة لنظام سبيكة الإصلاد بالترسيب أن لها درجة حرارة تعتمد على توازن ذوبان الجامد الذي تزداد خلاله قابلية الذوبان وذلك بزيادة درجة الحرارة وكمثال على ذلك يمكن رؤية المخططات الطورية في الشكل (1). المطلوب بشكل عام من الإصلاد بالترسيب أو التعتيق للمحلول الجامد المشبع أن يتضمن تكوين ترسبات ناعمة متشتتة (Finely Dispersed Precipitates) خلال تعتيق المعاملات الحرارية (التي قد تتضمن إما تعتيقاً طبيعياً أو تعتيقاً صناعياً) .



الشكل (1) مخطط ثنائي الطور الافتراضي لسبيكة (A-B)[5]

لذلك قام العلماء (S.Esmaeili et.al 2001) [7] بدراسة تأثير الترسيب تحت ظروف مختلفة لسبيكة الألمنيوم (AA6111) وذلك عن طريق فحصها بجهاز فحص الشد وذلك لعدة حالات وهي المحلول الجامد المشبع كما مخمد عند ($560\ C^0$) ولمدة 20 دقيقة وكذلك ترسب عند درجة حرارة ($180\ C^0$) لثلاثة فترات وهي ساعة وستة ساعات وستة أشهر. وأتضح أن مطيلية المحلول الجامد المشبع هي الأكبر ويليها النموذجان المعتقان عند (h 1-6) وبعدها النموذج المعتق لستة اشهر. كما قام الباحثان (Zhn & Starke 2001) [8] بدراسة تأثير عملية التشكيل خلال التعتيق الذي يستخدم في عمليات تصنيع الهياكل المصلدة بالكامل لتحسين تصنيع هياكل الطائرات وتقليل كلفهُ وذلك باعتماد سبائك ألمنيوم مختلفة من مجموعة (2XXX) واستنتجا انه عند وجود الإجهاد المسلط على النموذج فإن تأثيره يكون قليلا بالنسبة للصلادة بينما يرتفع التشكيل عندما يكون الإجهاد المسلط أعلى من (100 MPa). كما قام الباحثون (2002 D.Godard et.al) [9] بدراسة تأثير الترسيب بعد عملية الإخماد لسبيكة الألمنيوم (AA7010) . فعاملوا النماذج محلولياً عند درجة حرارة ($475\ C^0$) وذلك لمدة حوالي (30 min) ، ولكي لا يحدث ترسيب عند الإخماد وللحصول على محلول جامد مشبع ، قاموا بعملية تبريد النماذج بمعدل ($50\ C^0/s$) حتى بلغ درجة الحرارة الغرفة . واستنتجوا أن ما بين درجة حرارتي ($100\text{-}200\ C^0$) كان الترسيب متجانساً ($\acute{\theta}$) ويمكن تشكيله. بعدها قام الباحثون (A.Albiter et.al 2003)[10] بدراسة مواصفات الترسبات البنيوية والكيميائية في المادة المركبة (Al-2024/TiC). وذلك عن طريق إجراء معاملة حرارية للمادة المركبة عند ($530\ C^0$) ولفترة تستمر لمدة (150 min) وتخمد بماء بارد ويتبعها تعتيق طبيعي وصناعي عند درجة حرارة الغرفة ولمدة (96 h) و($190\ C^0$) لمدة (12 h) محاطة بغاز الارجون فحصلوا على عدة ترسبات (مختلفة) تمثلت ب(Ti_3Al, Ti_3AlC, Al_3Ti, $CuAl_2$) . معظم الترسبات وجدت منتظمة التوزيع في المزيج وفي بعض المناطق وجدت ترسبات تمتلك شكلاً تكعيبياً بلورياً (Ti_3Cu).

كما قام العالمان (Dymek & Dollar 2003) [11] بدراسة تأثير التشكيل اللدن الذي يسبق التعتيق لسبيكتي ألمنيوم (Al2519) ومدى تأثيره على تشقق تآكل الإجهاد . وذلك عن طريق استخدام سبيكتين متشابهتين في تسميتهما (Al2519) لكنهما مختلفتين في تركيبهما الكيميائي وتمتلك السبيكتان تطبيعاً من نوع T8 و تتعرض السبيكتان إلى معاملة محلولية عند ($532\ C^0$) يتبعها درفلة على البارد وبعد ذلك يتبعها تعتيق (ترسيب) عند $160\ C^0$ ولمدة 14 h . التشكيل المتبع في هذا البحث على نوعين : درفلة مع تناقص (10%) في السمك يتبعها مط حوالي (% 1.5-3) ، ومط وحيد يصل الانفعال فيه إلى حوالي (% 10). تتعرض النماذج إلى فحوصات الشد و البالستي (Ballistic) وتشقق تآكل الإجهاد (Stress Corrosion Cracking). استنتج أن التشكيل اللدن المعقد الذي يسبق التعتيق والذي احتوى كلا الدرفلة على البارد والمط بدلا من المط الوحيد كان مفيداً لمقاومة تشقق تآكل الإجهاد ، لأنه يسمح بتوزيع متجانس أكبر للترسبات ويقلل عددها على محيط الحبيبات. وكذلك تقليل تركيز النحاس في سبيكة (Al2519) مما يحسن مقاومة تشقق تآكل الإجهاد وكذلك فإن كل النماذج المفحوصة في كلا نوعي السبيكة المختلفين قد تكون عرضة لتشقق تآكل الإجهاد ضمن ترسبات غنية بالنحاس على حدود الحبيبات وتكوين مناطق نحاس منخفضة (مستنفذة) مجاورة لهذه الحدود .

قام العلماء (Sadler et.al 2004) [12] بدراسة تأثير المعاملة الحرارية المحلولية على تصرف الكلل والإصلاد بالترسيب لسبيكة الألمنيوم (2014) وذلك على خمسة نماذج، واحدة كما مستلمة والبقية تعامل حرارياً عند ($415,450,480\&510\ C^0$) لمدة ساعتين ثم تخمد في ماء بارد درجة حرارته ($15C^0$) يتبعها تعتيق عند ($190\ C^0$) لمدة 7 ساعات . فوجدوا أن أفضل النتائج كانت عند درجة حرارة المعاملة المحلولية ($512\ C^0$) والتي عندها مقاومة الكلل تحسنت بنسبة (% 43) مقارنة مع النموذج الأصلي (كما مستلم) .

من إحدى أهم خواص معظم سبائك الألمنيوم هي قابليتها على الإصلاد بالترسيب التي تعني قابلية هذه السبائك على زيادة مقاومة الشد وذلك نتيجة لمعاملة حرارية ملائمة. وقد تبلغ مقاومة الشد الناتجة من هذه المعاملة مقاومة فولاذ الإنشاءات في بعض الحالات، ويكثر استخدام السبيكة(2024-T3)في الآونة الأخيرة وذلك لاستعمالها في تطبيقات عديدة(كاستخدامها في تصنيع أجنحة جذع الطائرة وجسمها بالكامل)وخلال عملية الإصلاد بالترسيب يمكن استغلال الزيادة في المطيلية، بعد عملية الإخماد من درجة حرارة المحلولية مباشرة، للاستفادة منها في عملية التشكيل .

الصفيحة المعدنية المستخدمة وتحليلها الكيميائي:

أن السبيكة المستخدمة هي من نوع (AL2024 T3) ذات سمك (1.2mm) حيث تم تحليل هذه السبيكة كيميائيا بواسطة جهاز التحليل الكيميائي (Spectroscopy) والجدول (1) يبين التحليل الكيميائي لهذه السبيكة.

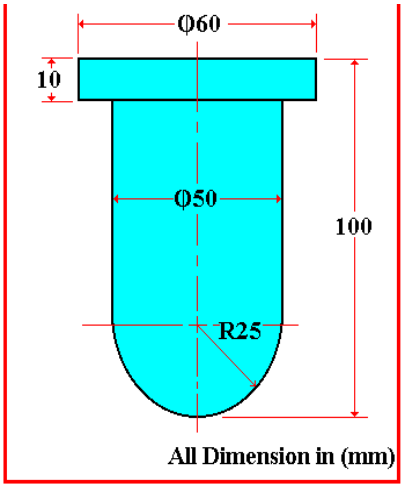
الجدول(1) التحليل الكيميائي لسبيكة الألمنيوم (AL2024 T3)

العناصر	Cr	V	Ni	Ti	Zn
النسبة المئوية	0.0099	0.0104	0.0117	0.0242	0.205
العناصر	Fe	Mn	Mg	Cu	Al
النسبة المئوية	0.279	0.565	1.62	4.79	92.3

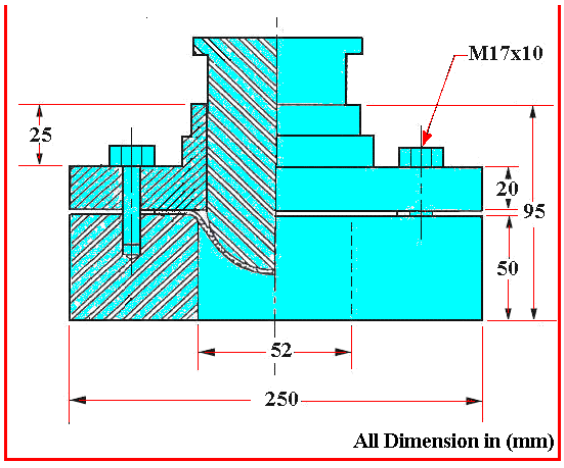
الجانب العملي:

تم إجراء عملية الإخماد (Quenching) وذلك للوصول إلى المادة المحلولية فوق المشبعة وذلك عن طريق وضعها في الفرن الكهربائي ، ورفع درجة حرارتها إلى ($494C^{o}$) حيث يتم نقعها لمدة (35 min) [6]وتبريدها بسرعة إلى درجة حرارة الغرفة. بعدها يتم تشكيل نماذج من الصفيحة باستخدام خرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) وقالب (Die) ومثبت الخامة (Blank Holder) ، حيث توضع الصفيحة المعدنية على القالب ثم تكبس بالخرامة أي عملية تشكيل الصفيحة فوق الخرامة بحيث تأخذ شكل الخرامة [13] .

في الجانب العملي تم استخدام خرامة قطرها (50mm) كما في الشكل (2) من الصلب ذي صلادة(50 HRC) مع قالب من الصلب صلادته (40 HRC) .وكذلك مثبت الخامة لتثبيت الصفيحة من نفس معدن القالب كما في الأشكال (3) و(4) ، وهذه الأجزاء تم وضعها على جهاز فحص الشد بعد استخدامه كجهاز كبس كما في الشكل (5). لغرض الحصول على طرق انفعال تمتد بين مسار الشد آحادي المحور (Uniaxial Tension Path)ومسار المط ثنائي المحور المتساوي (Equibiaxial Stretching Path)،فقد تم اختيار أشكال النماذج للمعادن لتعطي رسماً كاملاً للمنحني متبعين الطريقة المستخدمة من قبل[14,15]التي أعطت نتائج جيدة والتي استخدمت في عدد كبير من البحوث [17& 16 ,15] وهي ثمانية نماذج لها نفس الطول ومختلفة العرض مع وجود أقواس كما في الشكل (6), وفي هذه الدراسة تم طبع شبكة من الدوائر بقطر(2mm) على سطح الصفيحة المعدنية لقياس الانفعال الحقيقي بعد التشكيل. يوضع النموذج من(الصفيحة المعدنية)على القالب،ويثبت بأحكام بوساطة مثبت الخامة لمنع حركة النموذج, ثم يتم الكبس بقوة تتراوح (5-38 KN). تم قياس الانفعال من خلال التشكيل الذي حدث بالدوائر المرسومة على المعدن باستخدام مجهر متنقل (Traveling Microscope) مخصص لقياس الأبعاد الدقيقة بدقة (0.01mm).

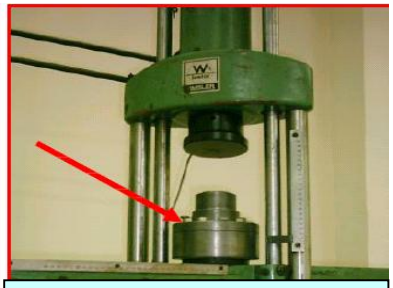


الشكل(2)الخرامة المستخدمة في التشكيل



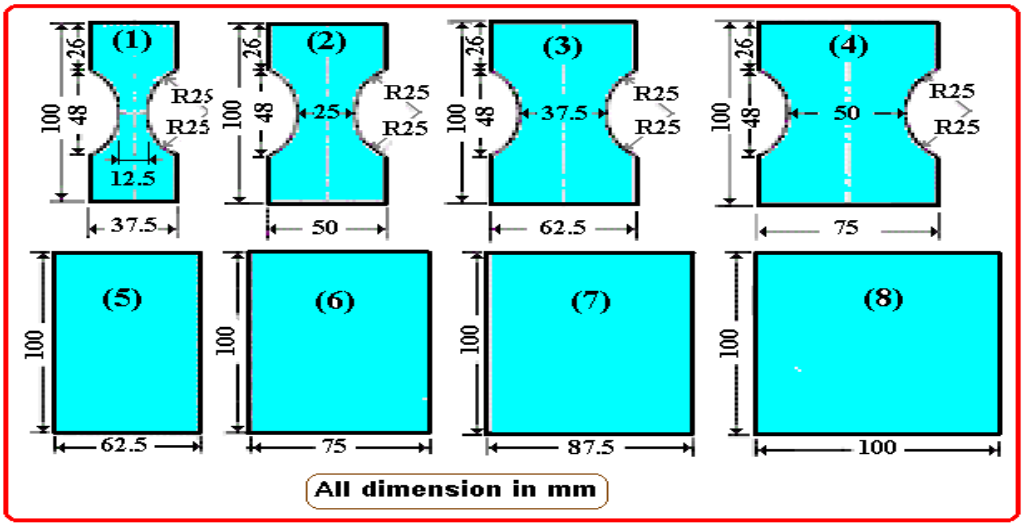
الشكل(3)يمثل رسما تجميعيا للخرامة والقالب ومثبت النموذج

الشكل (4) صورة للخرامة والقالب مثبت



الشكل (5) يبين جهاز فحص الشد

أ- **إنجاز عملية الإخماد**: عمليا لإنجاز عملية الإخماد من درجة حرارة المحلولية التي تمت بوضع قطعة من صفيحة لسبيكة الألمنيوم قياسها (250*250 mm) في فرن كهربائي (Electrical Mufle / Model: RKB-101) ورفع درجة الحرارة إلى (C^0 494) [6] للوصول إلى حالة المعاملة الحرارية المحلولية . حيث تم بعد ذلك نقع القطعة المعدنية عند نفس هذه الدرجة الحرارية المحلولية لمدة 35 دقيقة [6] . بعد ذلك تم إخراج القطعة المعدنية من الفرن بأقل مدة زمنية وتبريدها بالماء الذي درجة حرارته مساوية لدرجة حرارة الغرفة. بعد الانتهاء من عملية التبريد تم طبع شبكة من الدوائر على الصفيحة المعدنية المخمدة قطر كل دائرة منها كان (2 mm) وعن طريقها تم معرفة مقدار الانفعال بعد تقطيعها إلى عدة نماذج كما في الشكل (6) وتشكيلها بواسطة خرامة نصف كروية (المرحلة الثانية) .



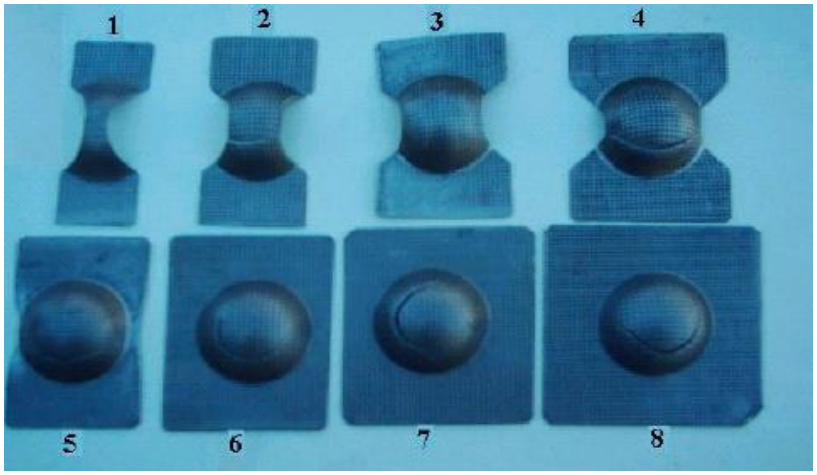
شكل (6) أشكال وأبعاد النماذج المستخدمة بالتشكيل لتعيين منحني حد التشكيل

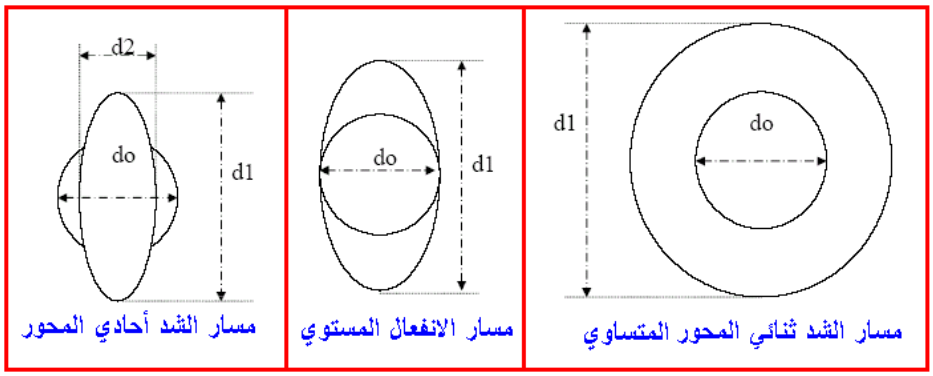
ب- **تحضير النماذج المستخدمة في بناء منحني حد التشكيل**: بعد أن تم إنجاز عملية الإخماد على الصفائح المعدنية لسبيكة الألمنيوم تم تقطيع هذه الصفائح المعدنية إلى ثمانية نماذج ، لها نفس الطول (100mm) ، ومختلفة العرض (بعضها يحتوي على أقواس) لغرض الحصول على مسارات انفعال (Strain Paths) (أي من مسار الشد أحادي المحور) (uniaxial tension Path) إلى مسار المط ثنائي المحور المتساويين (equibiaxial stretching Path) مرورا بمسار الانفعال المستوي (plain strain Path) لكي تمثل منحني حد التشكيل كاملا أي من (مسار الشد أحادي المحور) إلى (مسار المط ثنائي المحور المتساوي) [18]. بعد تقطيع النماذج بواسطة مكائن التشغيل، تم تنعيم وصقل أطراف النماذج لكي تكون صقيلة ولا تحتوي على نتوءات وذلك لتجنب ظهور إجهادا ت مركزة تسبب الكسر المبكر في تلك المنطقة [2].

ج - **تشكيل النماذج ورسم منحني حد التشكيل**: تم أجراء عملية كبس النماذج (1 إلى 8 كما في الشكل (7)) بوساطة الخرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) باستخدام جهاز فحص الشد بعد تحويله إلى جهاز كبس

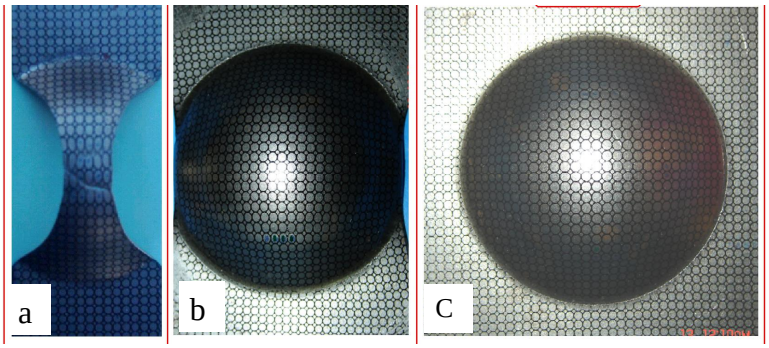
كما في الشكل (5) , وتم وضع النموذج على القالب ،حيث ربط بأحكام داخل القالب ,ووضعت الأجزاء (الخرامة والقالب وماسك الخامة) على جهاز فحص الشد , ثم يبدأ بتشكيل النماذج بوساطة حركة الخرامة إلى داخل القالب

بمعدل (20mm/min) ونلاحظ ارتفاع الحمل المسلط تدريجيا مع الاستطالة ،ويستمر إلى أن يصل الحمل إلى الحد الأقصى ثم ينخفض , وفي لحظة الحمل يبدأ بالانخفاض يتم إيقاف الخرامة حين يكون تعرض النموذج إلى التخصر أو الكسر, نلاحظ تغير أشكال النماذج بعد التشكيل كما في الشكل (7) . تعاد عملية الكبس بحيث يتم تشكيل ثلاثة نماذج لكل مسار من المسارات المذكورة .وبعد الانتهاء من عملية التشكيل , تتغير الدوائر المطبوعة على النموذج إلى أشكال اهليلجية (Elliptic) أو دوائر ذات أقطار اكبر وحسب النموذج كما في الشكل (8). يلاحظ في مسار الشد أحادي المحور (uniaxial tension) أن شكل الاهليلج يزداد بالطول ويقل بالعرض وكما في الشكل (9.a). والشكل (9.b) أستخدم لرسم مسار الانفعال قرب مسار الانفعال المستوي (Plane Strain) , أما في الشكل(9.c) لتعيين مسار الانفعال قرب مسار المط ثنائي المحور المتساويين (Equibiaxial Stretching) فان الشكل يكون دائرياً أي الزيادة في الطول والعرض .





شكل(8)أشكال الدوائر و الأهليلج المرسومة على الصفيحة قبل وبعد التشكيل ولكل المسارات



شكل(9) صور للنماذج (1,5,8) بعد تشكيلها ولكل المسارات التشكيل

تم الاعتماد على تحديد حد الانفعال في المناطق القريبة من عدم الاستقرار (التخصر) باستخدام طريقة (Hecker 1972)[19] حيث ميز الباحث ثلاثة أنواع من الدوائر المشكلة ،النوع الأول اهليلج (Ellipse) متعرض إلى كسر(Fracture) ،والنوع الثاني تعرض إلى تخصر (Necking) أو قريب من الكسر والنوع الثالث اهليلج مقبول (Accepted Ellipse) بعيد عن منطقة الكسر أو التخصر, عند رسم خط يفصل بين النوع (الأول والثاني) من النوع (الثالث) فان هذا الخط يمثل منحني حد التشكيل عمليا أي أن النقاط أسفل الخط مقبولة (النوع الثالث)، أما النقاط أعلى الخط تمثل الفشل (النوع الأول والثاني) حيث أن هذا المنحني يفصل بين منطقة الفشل ومنطقة القبول, والشكل (10) يبين تحليل الأشكال الاهليلجية (Elliptical) للنموذج الحقيقي مع رسم جزء من منحني حد التشكيل وحسب طريقة (Hecker) . كذلك تم قياس الانفعال الرئيس (الشعاعي) والانفعال الثانوي (المحيطي) الذي حدث بالدوائر نتيجة التشكيل بجهاز قياس الإحداثيات بعد تكبيرها باستخدام مجهر متنقل (Traveling microscope) ذي دقة (0.01mm) , واختيار الدوائر التي حدث بها كسر و تخصر والمقبولة في النموذج. وبعد استخراج النتائج نستخدم العلاقات (1)&(2) [20] لحساب الانفعالين الحقيقي الرئيس والثانوي ولكل المسارات, وباستخدام تحليل (Hecker) وذلك لرسم منحني حد التشكل عمليا.

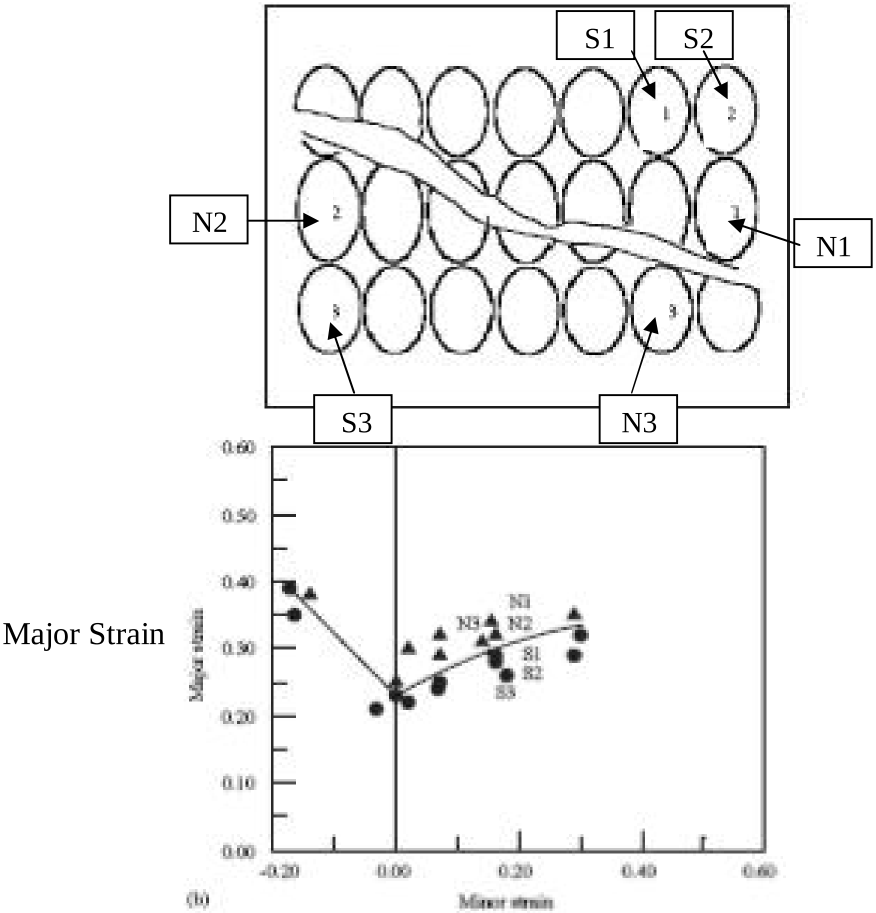
$$\varepsilon_1 = \ln\frac{d_1}{d_o} \qquad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \ln\frac{d_2}{d_o} \qquad (2)$$

حيث أن: القطر الرئيس للإهليلج : d_1

القطر الثانوي للإهليلج : d_2

قطر الدائرة قبل التشكيل : d_o



شكل(10) تحليل أشكال الاهليلج بعد التشكيل مع رسم جزء من منحني حد التشكيل بطريقة (Hecker) [17]

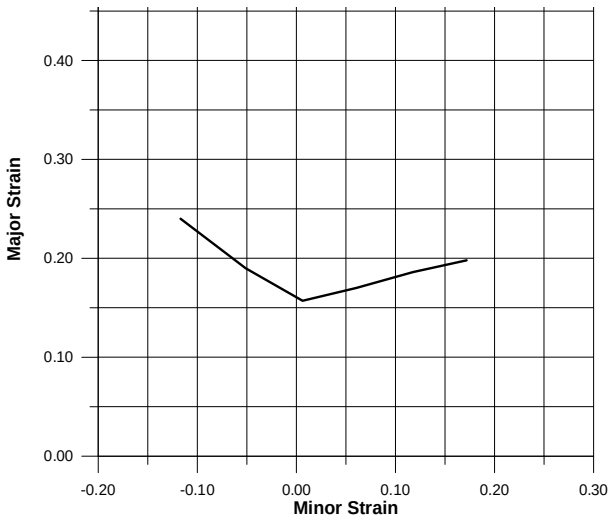
د- قياس الانفعال: الانفعالات يمكن قياسها من تشوه الدوائر المطبوعة على شكل شبكة بقطر (2mm) على سطح النماذج المعدنية من جهة واحدة وذلك لحساب الانفعال الحاصل بسطح النموذج بعد التشكيل. و التقنية المستخدمة على نحو واسع لقياس التغير في البعد الذي حصل بالدوائر المشكلة التي استخدمت في الكثير من البحوث وفي هذه الدراسة تم استخدام المجهر المتنقل [23]&[22],[21]لقياس أقطار الدوائر أو الاهليلج, وهذه الطريقة أدق من الطرائق السابقة, حيث تبلغ دقتها (0.01mm). وكذلك تم فحص الصفيحة المستخدمة في عدة حالات وذلك لقياس صلاتها عن طريق اختبار روكويل (Rockwell Test) [24]، وباستخدام جهاز الصلادة (Hardness Tester/Brooks Inspection Eq.Ltd /Model: MAT24-CRBV). وكانت النتائج كما في الجدول(2)، والتي عندها اخذ معدل خمسة قيم لكل حالة.

الجدول (2) يبين قيم الصلادة للصفيحة المستخدمة عند حالات مختلفة

حالة الصفيحة	قيمة الصلادة (HRF)
الاخماد عند ($494C^o$)	78
التعتيق الطبيعي لمدة (3 h)	85
التعتيق الطبيعي لمدة (6 h)	90
كما مستلمة	99

النتائج ومناقشتها :

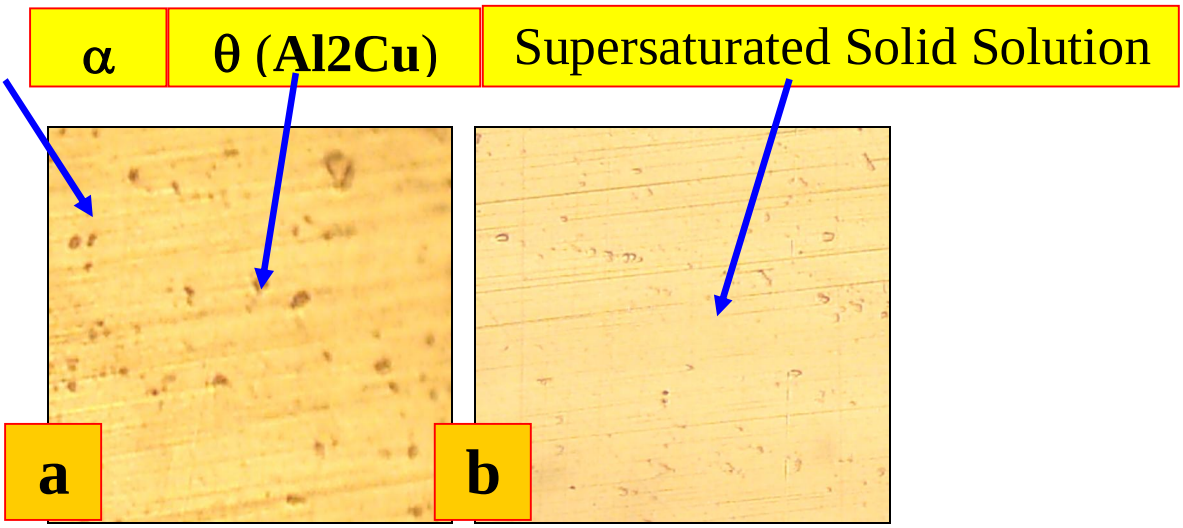
بعد إجراء عملية التشكيل تم تعيين حد التشكيل في كل نموذج من نماذج الصفائح المستخدمة كما في الشكل (7) باستخدام طريقة (Hecker) [19]، حيث تم تحديد الإهليلجات (Elipeses) في مناطق المقبولة والتخصر والكسر، ومن خلال جميع النماذج تم رسم منحني حد التشكيل للصفيحة المعدنية كما مستلمة وكما في الشكل (11), يتبين من هذا الشكل وجود قيم مختلفة للانفعالات ناتجة من عملية التشكيل حيث نلاحظ أن أعلى قيمة للانفعال الرئيس ظهرت باتجاه مسار الشد أحادي المحور (Uniaxial Tension path)، وأقل قيمة له تقع باتجاه مسار الانفعال المستوي (Plain Strain path) الذي يمثل المسار الحرج في منحني حد التشكيل, بينما ظهرت له قيمة متوسطة باتجاه مسار الشد ثنائي المحور(biaxial Stretching path), مما يدل على أن حدود الانفعال الرئيس باتجاه مسار الشد أحادي المحور ذات مدى أعلى من كل المسارات, أما بالنسبة للانفعال الثانوي (Minor Strain) فظهرت أعلى قيمة له باتجاه مسار الشد ثنائي المحور وأقل قيمة باتجاه مسار الشد أحادي المحور, وهذه النتائج تتفق مع نتائج أغلب البحوث السابقة منها[27] [26], [25],[13].



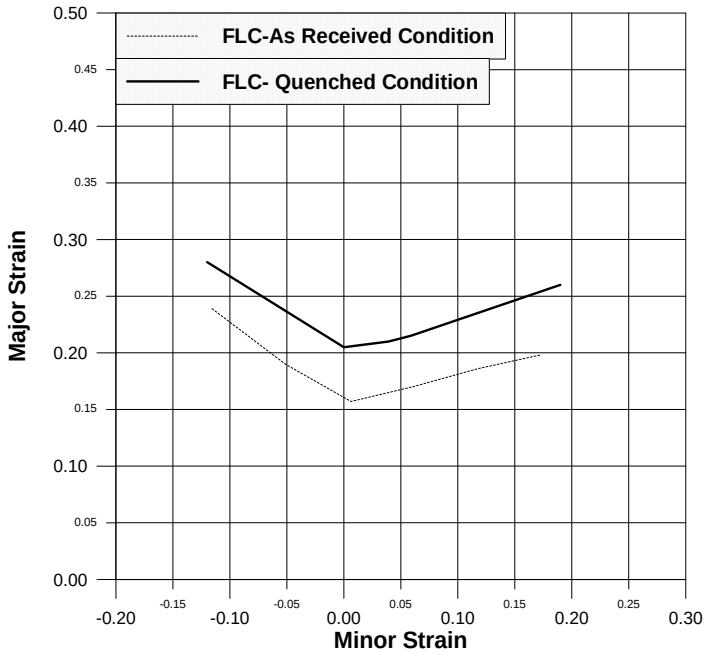
الشكل (11) منحني حد التشكيل لصفيحة من سبيكة الألمنيوم (2024-T3) كما مستلمة (As Recieved)

تأثير عملية الإخماد على منحني حد التشكيل: لدراسة تأثير الإخماد من درجة حرارة المحلولية على منحني حد التشكيل, تم استخدام فرن كهربائي(Electrical furnace)وذلك للوصول بهذه الصفيحة المعدنية(2024-T3) المستخدمة في هذه الدراسة إلى المحلول الجامد عند درجة حرارة ($494\ C^o$) بعدها وبسرعة تم تبريدها بالماء إلى درجة حرارة الغرفة والشكل(12) يبين الفرق في البنية المجهرية لسبيكة الألمنيوم (2024)عند معدل تبريد بطي وسريع من حالة المحلول

الجامد، ثم قطعت هذه الصفيحة إلى نماذج بالشكل المطلوب كما في الشكل (6)،عندئذ تم طبع شبكة من الدوائر وذلك لقياس الانفعالات الناتجة بعد تشكيلها، والوقت المطلوب لإنجاز عملية التشكيل هذه يتراوح ما بين(6-7) ساعات . إن الهدف من الإخماد هو لحفظ المحلول الجامد المتكون عند حرارة المعاملة المحلولية الحرارية، وذلك بالتبريد السريع إلى درجة حرارة واطئة ، وعادة تكون قريبة من درجة حرارة الغرفة. هذا الاكتشاف يطبق ليس فقط لحفظ الذرات المذابة في المحلول ، ولكن ليحافظ أيضا على اقل عدد من مواقع الشبكة الفارغة لتساعد في تأسيس درجة الحرارة الواطئة المطلوبة لتكوين المنطقة. وبعد لحظات قليلة من الوصول إلى الحالة المحلولية فوق المشبعة سيبدأ تكون ترسبات صغيرة مما يؤدي إلى تغيير تدريجي في الخواص الميكانيكية وذلك بزيادة المقاومة والصلادة مع نقصان في المطيلية .

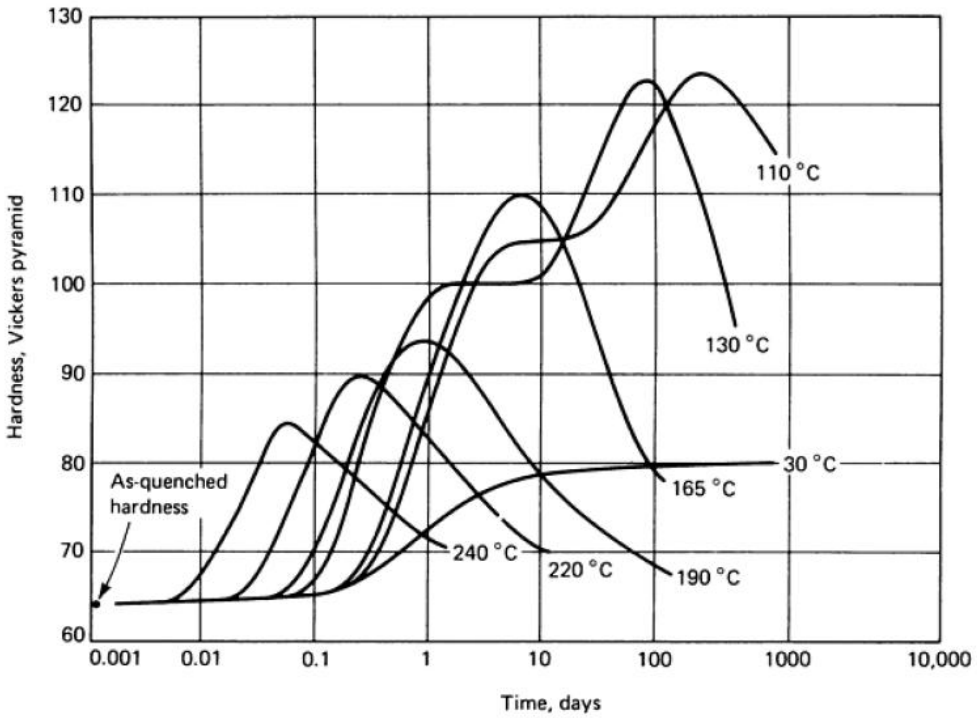


الشكل (12) البنية المجهرية لسبيكة الألمنيوم (2024)عند معدل تبريد بطي(a) وسريع(b) من حالة المحلول الجامد وبتكبير (X190)

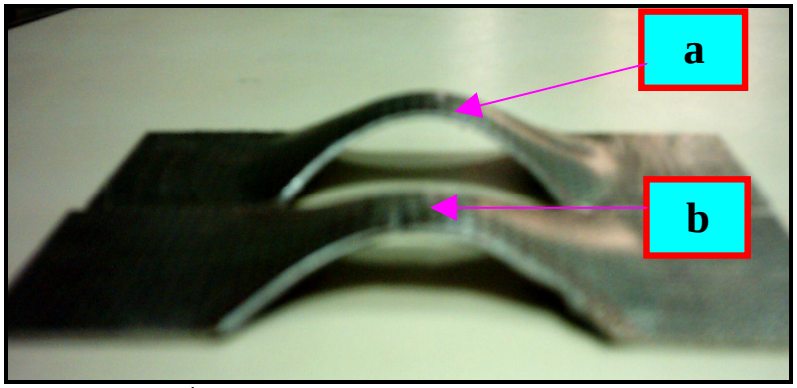


الشكل(13) يبين تأثير عملية الإخماد لصفيحة من سبيكة الألمنيوم (2024-T3) على منحني حد التشكيل البسيط (كما مستلم)

لقد تم تحديد منحنيات حد التشكيل بعد الإخماد كما في الشكل (13) الذي يبين منحني حد التشكيل للصفيحة باستخدام الإخماد ومقارنته مع المنحني للصفيحة كما مستلمة(As Received)، إذ يلاحظ بصورة عامة أن قابلية التشكيل قد زادت حيث ارتفع منحني حد التشكيل وأن الجهة اليمنى من منحني حد التشكيل للصفيحة ارتفعت باتجاه مسار الشد ثنائي المحور أعلى من الجهة اليسرى من المنحني باتجاه مسار الشد أحادي المحور, وهذا يعزى إلى أن الترسيب يحدث للنماذج في الجهة اليسرى أعلى من النماذج في الجهة اليمنى وذلك بسبب اختلاف الزمن الذي يسبق التشكيل بعد عملية الإخماد حيث أن الوقت المطلوب لتحضير النماذج في الجهة اليسرى سوف يكون اطول، أي انه بسبب الإصلاد بالتعتيق الذي يحدث عند درجة حرارة الغرفة ومن خلال منحني الصلادة مع الزمن لسبيكة الديورالومين عند درجة حرارة 30^oC في الشكل (14) حيث كلما ازدادت المدة الزمنية بعد الإخماد ازدادت الصلادة أي حصول الإصلاد من خلال التعتيق الطبيعي وذلك بعد مرور (6-5) ساعات لعملية الإخماد من درجة حرارة المحلولية. التشكيل والتعديل عادة يتبع قريبا بعد الإخماد، فضلاً عن ذلك فإن الصفيحة المخمدة تتعرض الى إجهادات الإخماد العالية لذلك فإن اكبر تأثير في الإجهاد المزال ينتج بتشكيل المعدن بعد الإخماد . أن عامل الترسيب مهم جدا في عمليات تشكيل الصفائح , إذ يؤثر الترسيب على التغيير في الخواص الميكانيكية وذلك بزيادة مقاومة الشد والصلادة مع تناقص المطيلية. وهذا يتفق مع ما توصل إليه (S.Esmaeili et.al 2001) [7] في دراسة تأثير الترسيب تحت ظروف مختلفة لسبيكة الألمنيوم (AA6111) وذلك عن طريق فحصها بجهاز فحص الشد وذلك لعدة حالات وهي المحلول الجامد المشبع كما مخمد عند ($560C^0$) ولمدة 20 دقيقة وكذلك الترسب عند درجة حرارة ($180\ C^0$) لثلاث فترات وهي ساعة وستة ساعات وستة أشهر. لذلك أتضح أن مطيلية المحلول الجامد المشبع هي الأكبر ويليها النموذجان المعتقان عند (1-6 h) وبعدها النموذج المعتق لستة اشهر. والشكل (15) يبين الفرق بين النموذجين للصفيحة المعدنية بعد التشكيل باستخدام الإخماد وبدون الإخماد إذ لوحظ الفرق بين النموذجين من خلال ارتفاع النموذج المخمد وزيادة تشوه الدوائر المطبوعة بعد التشكيل عن النموذج الثاني (كما مستلم) . وبشكل عام يمكن القول بأن التشكيل باستخدام عملية الإخماد قد أعطى نتائج أفضل من عملية تشكيل الصفائح كما مستلمة, إذ أعطت نسبة (30%) باتجاه مسار المط ثنائي المحور في صفيحة الألمنيوم و نسبة (31%) باتجاه مسار الانفعال المستوي وعلى نسبة (19%) باتجاه مسار الشد أحادي المحور، وهذه النتائج تم التوصل إليها عند تشكيل النماذج بعد فترة زمنية تتجاوز (6) ساعات من عملية الإخماد.



الشكل (14) علاقة الصلادة مع زمن التعتيق لسبيكة (Al-4Cu) [28]



الشكل (15) صورة فوتوغرافية للمظهر الجانبي لنموذجين احدهما مشكل (a) بعد أجراء عملية الإخماد وأخر (b) بدون أجراء عملية الإخماد عليه (كما مستلم)

إذ الإصلاد بالتعتيق قد يحدث عند درجة حرارة الغرفة بعد عملية الإخماد مباشرة، فضلاً عن ذلك فإن الصفيحة المخمدة تتعرض إلى إجهادات الإخماد التي تكون عالية، كما أن اكبر تأثير في الإجهاد المزال ينتج بتشكيل المعدن بعد الإخماد لذلك التشكيل والتعديل عادة يتبع بسرعة بعد الإخماد. وما يؤكد حصول تصلد بالتعتيق ومن ثم زيادة في الصلادة بعد مرور (5-6) ساعات، أن صلادة الصفيحة المعدنية بعد عملية التلدين كانت (65 HRF) وبعد الإخماد بحوالي ستة ساعات كانت الصلادة (90 HRF) بينما كانت صلادة الصفيحة كما مستلمة (99 HRF) كما في الجدول (2) وكذلك وجد أن قيم معاملات الإصلاد الانفعالي (n) للصفيحة كما مستلمة وكذلك بعد إجراء عملية الإخماد كانت (0.1704 and 0.214) على التوالي وذلك عند قياسها بجهاز فحص الشد، ويؤكد ذلك أنها كانت مقاربة لقيم انفعالها الرئيس باتجاه مسار الانفعال المستوي، حيث كلما ازداد معامل الاصلاد الانفعالي ازدادت قابلية التشكيل [29] .

الاستنتاجات :

لقد أجريت عملية التشكيل باستخدام خرامة نصف كروية في هذه الدراسة على صفيحة معدنية من سبيكة الألمنيوم (2024-T3)وذلك باستخدام ثمانية أشكال من النماذج للصفيحة المستخدمة حتى تعطي رسماً كاملاً لمنحني حد التشكيل وتم إجراء عملية الإخماد من درجة حرارة المحلولية وذلك للوصول إلى المادة المحلولية فوق المشبعة عند درجة حرارة الغرفة, يمكن الخروج بالاستنتاجات الآتية:

1- الحصول على انفعال رئيس باتجاه مسار الانفعال المستوي في مخطط حد التشكيل البسيط مقارب لقيمة معامل الإصلاد الانفعالي للصفيحة لكلا الحالتين كما مستلمة وبعد المعاملة الحرارية .
2- يمكن الاستفادة من عملية الإصلاد بالتعتيق والترسيب (التي تهدف إلى زيادة مقاومة الشد والصلادة) عن طريق إجراء عملية التشكيل مباشرةً بعد عملية الإخماد من درجة حرارة المحلولية والاستفادة من تحسن المطيلية المرافقة لذلك .
3- إجراء عملية الإخماد للسبيكة كما مستلمة أدت الى زيادة في منحني حد التشكيل بنسبة تتراوح بين (19 and 31%).

المصادر

1.Groover.M.P.," Fundamentals of Modern Manufacturing", John Wily & Sons, 2002.
2.Dieter,G.E., Mechanical Metallurgy, Second Edition ,McGraw-Hill Kogakusha,1981.
3.Campos. H. B., Butuc M. C., Gr´acio J.J., Rocha J.E. , Duarte J.M. F. ," Theorical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel". Journal of Materials Processing Technology 179 ,56–60(2006).
4.Graf.A&Hosford.W.F, Effect of changing paths on forming limit diagrams of Al 2008-T4,Met. Trans.24A,2503 (1993).
5.Brooks C. R., "Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys", American Society for Metals,1982.
6.ASM Handbook Committee, "Heat Treating". Volume 4, pp. 1848-1960 1991.

7.Esmaeili S., Cheng L.M., Deschamps A., Lloyd D.J., Poole W.J., "The deformation behaviour of AA6111 as a function of temperature and precipitation state". Materials Science and Engineering A319–321, 461–465 (2001).
8.Zhu A.W., Starke E.A., "Materials aspects of age-forming of Al-xCu alloys". Journal of Materials Processing Technology 117, 354-358 (2001).
9.Godard D., Archambault P., Aeby-Gautier E., Lapasset G., "Precipitation sequences during quenching of the AA 7010 Alloy" . Acta Materialia 50, 2319–2329 (2002).
10.Albitera A., Contrerasa A., Bedollab E., Pereza R., "Structural and chemical characterization of precipitates in Al-2024/TiC composites". Composites: Part A 34 (2003) 17–24.
11.Dymeka S., Dollar M., "TEM investigation of age-hardenable Al 2519 alloy subjected to stress corrosion cracking tests". Materials Chemistry and Physics 81, 286–288 (2003).
12.Sadeler R., Totik Y., Gavgalı M., Kaymaz I., "Improvements of fatigue behaviour in 2014 Al alloy by solution heat treating and age-hardening". Materials and Design 25, 439–445 (2004).
13.Hecker.S.S., Experimental studies of sheet stretchability. Proc. of Symp. on Formability Analysis—Modeling and Experimentation,Chicago, IL, p. 150,1977.
14.Hitchcock-Manthey,LLC.http://www.surfacestrain.com , USA.
15.Junior.E.H , http://www.pdffactory.com .
16.Aghaie-Khafri.M , Mahmudib.R," The effect of preheating on the formability of an Al–Fe–Si alloy sheet". Journal of Materials Processing Technology 169, 38–43 (2005).
17.Kim.K.J.,et al," Formability of AA5182j/polypropylene/AA5182 sandwich sheets",J.Mat.Proc.Tech.139, 1-7(2003).
18.Wagoner.R.H., Chan.K.S, Keeler.S.P, "Forming limit Diagrams: Concepts , Methods ,and Applications", Minerals, Metals and Materials Society 420 Commonwealth Drive , Warrendale , Pennsylvania 15086 , (412)776-9024,1989.
19.Hecker, S.S., "Simple Technique for Determining Forming Limit Curves",Sheet Metal Industries, pp. 671-676, 1972.
20.Keeler S.P. and Backofen W.A.," Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches", Transactions of The ASM ,Vol. 56, 25-48, 1963.
21.Narayanasamy.R , C. S.Narayanan ," Evaluation of limiting strains and strain distribution for interstitial free steel sheets while forming under different strain conditions", Materials and Design 28,1555–1576 (2007).
22.Date.P.P,Padmanabhan.K.A,"Deformation behavior of sheets of three aerospace Ai-alloys", J.Mat.Proc.Tech.139, 68-77(2001).
23.Gupta.A.K, Kumar.D.R, "Formability of galvanized interstitial-free steel sheets"Journal of Materials Processing Technology 172, 225–237(2006).
24.ASM Handbook Committee, "Mechanical Testing and Evaluation". Volume 8, pp. 416-495 and 237-262, 2000.
25.Veerman,C.C.,Hartman,L.Peels,J.J. ,"Determination of Appearing Strains and Admissible Strain in cold reduced sheets", Sheet metal Industrial, Vol.98,pp678-680,1971.
26.Gronostajski, J. and Dolny, A., "Determination of Forming Limit Curves by Means of Marciniak Punch", Memories Scientifiques revue metallurgic, pp. 570-578,1980 .
27.Shakeri.M,A.Sadough and B.M.Dariani ,"Effect of pre-straining and grain size on the limit strains in sheet metal forming ",Proc. Instn. Mech. Engrs,Vol.214part B ,PP.821-827,2000.
28.Hardy H. K., J. Inst. Met., Vol 79, p 321, 1951.
29.Marciniak, Z. ; Duncan, J.L.," Mechanics of Sheet Metal Forming", Butter worth-Heinemann ,2002.

تم اجراء البحث في كلية الهندسة – جامعة الموصل