

## مقارنة بين قابلية التشكيل لصفحة الالمنيوم التجاري النقي بطريقتي الخرامة والنفخ الهيدروليكي

لقمان خليل حيدر  
مهندس  
المعهد التقني / الموصل

وليد جلال علي  
أستاذ مساعد  
جامعة الموصل/ كلية الهندسة

### الخلاصة

أن عمليات تشكيل الصفائح المعدنية من اوسع عمليات التشكيل استخداماً في الصناعات المعدنية، ويعتبر منحنى حد التشكيل وسيلة مهمة لقياس قابلية تشكيل الصفائح المعدنية هذه. في هذا البحث تم مقارنة منحنى حد التشكيل لصفحة الالمنيوم النقي التجاري معينة بطريقتين ، الاولى استخدام خرامة نصف كروية وقالب، والثانية باستخدام النفخ الهيدروليكي ، وكذلك تم دراسة تأثير بعض العوامل على المنحنى المعين بالطريقتين مثل السمك ، التلدين ، وتم اجراء المقارنة بين المنحنيات المعينة بكلا الطريقتين .  
ولقد تم التوصل بأن قابلية التشكيل بطريقة النفخ الهيدروليكي كانت أعلى من قابلية التشكيل بطريقة الخرامة ويعزى ذلك بأن الاولى يكاد الاحتكاك فيها معدوما مما أدى الى توزيع للانفعالات بشكل أكثر تجانساً .  
تم استخدام ثلاثة صفائح ذات سمك مختلف (0.6, 0.8, 1) ملم ، وتبين بأن كلما زاد السمك زادت قابلية الصفائح على التشكيل ، وأن افضل قابلية للتشكيل كانت للصفائح ذات السمك 1 ملم وبطريقة النفخ الهيدروليكي، وكان تأثير التلدين على تحسين قابلية التشكيل أفضل عند استخدام النفخ الهيدروليكي.

## A Comparison of Formability of Commercial Pure Aluminum Sheet by Using Punch and Hydraulic Bulging

W. J. Ali  
University of Mosul/Mech. Dep.

L. Kh. Haider, Eng.  
Technical Inst./ Mosul

### Abstract

The sheet metal forming are the most widely used in the metal industries. The forming limit curve(FLC) is considered as the important mean of measuring the formability of sheet metal. In this work the FLCs of pure Aluminum sheets, determined firstly by using hemispherical punch and die, and secondly by bulging, were compared. Also the effect of some factors on the FLC, such as thickness and annealing were studied, and a comparison was made between the FLCs determined by the two methods. It was shown that the formability determined by bulging is higher and this is due to the absence of friction during forming which lead to a more uniform strain distribution. Three sheets thickness were used(1,0.8 and 0.6) mm. It was found that the formability is increased with thickness in both methods. The best formability was of the sheet of 1mm thickness, deformed by bulging. Annealing improved formability and the better improvement was by bulging

**Keyword :** Aluminum sheet - Forming limit diagram – Hydraulic Bulging

أن عمليات تشكيل المعادن من العمليات المهمة والاساسية في مجال الصناعة حيث تمثل الجزء الاكبر من عمليات التصنيع والتي تعتمد على التشوية اللدن لتغيير شكل القطعة المعدنية بدون حدوث كسر أو فشل، ومن بين عمليات تشكيل المعادن ، عمليات تشكيل الصفائح المعدنية والتي تمثل تقريبا نسبة 70% من عمليات التشكيل ، تستعمل الصفائح المعدنية بشكل كبير في تصنيع اجسام الطائرات واجنحتها وجذوعها وتستخدم في تصنيع اجسام السيارات وابوابها وأغطية المحركات.

أن التشكيل السائد بالنسبة للصفائح المعدنية هو التشكيل بالمط (Stretching) ، أي تمتد الصفيحة على وجه القالب باستخدام الخرامة (Punch) ، وعند تسليط قوة التشكيل فإن الصفيحة سوف تتعرض الى تخرس موضعي يعقبه الكسر، مع تطوير تقنيات تشكيل الصفائح المعدنية والحاجة المتزايدة في انتاج قطع معدنية كالتى تستخدم في المركبات الفضائية، كان استخدام طريقة تشكيل الصفائح المعدنية بالنفخ الهيدروليكي (Hydraulic Bulging) هي الطريقة الملائمة والمليية لحاجة المهندس في انتاج الكثير من القطع المعدنية والتي يصعب انتاجها بطريقة الخرامة، وتعتمد طريقة التشكيل هذه على تسليط قوة التشكيل بواسطة سائل تحت ضغط هيدروليكي على صفيحة معدنية مثبتة بواسطة مثبت النموذج في قالب معين لتأخذ شكل القالب المطلوب بدون حدوث كسر أو فشل. ومن مزايا طريقة التشكيل بالنفخ الهيدروليكي هي امكانية الحصول على منتوجات اكثر تعقيدا وذات اسطح ناعمة لأن لا يوجد احتكاك في طريقة التشكيل هذه كما في عملية التشكيل بالخرامة. أن افضل وصف أو مقياس لمدى قابلية المعدن على التشكيل في عمليات تشكيل الصفائح المعدنية ، هو منحنى حد التشكيل (Forming Limit Curve) ، إذ يعرف منحنى حد التشكيل (Forming Limit Curve) على أنه مقياس لقابلية تشكيل الصفائح المعدنية دون حدوث تخرس أو فشل [1]. يتكون منحنى حد التشكيل من محورين اساسيين ، المحور العمودي والذي يمثل الانفعال الرئيسي (Major Strain) والمحور الافقي الذي يمثل الانفعال الثانوي (Minor Strain) [2]. حيث لكل معدن أو سبيكة منحنى خاص به. ومن خلال هذا المنحنى ممكن معرفة المناطق السليمة للتشكيل ومناطق الفشل وكذلك المناطق الحرجة، وقد تم في هذا البحث انشاء منحنى حد التشكيل وبالطريقتين (الخرامة والنفخ الهيدروليكي) وتم دراسة تأثير السمك وعملية التلدين على المنحنيات المعينة بالطريقتين أعلاه.

#### الدراسات السابقة:

أن أول من ساهم في بناء منحنى حد التشكيل هما الباحثان (Keeler & Backfon 1963) [3] ، حيث قام الباحثان بتعيين حدود الانفعال في الجهة اليمنى من منحنى حد التشكيل عمليا ، . ويعتبر (Keeler 1968) [4] هو أول من استخدم تقنية رسم شبكة الدوائر على الصفائح المعدنية وبطريقة الكهروكيميائية (Electrochemical) لحساب الانفعالات الحاصلة على سطح الصفيحة، حيث قام برسم دوائر بقطر (2.5mm). بعدها قام الباحث (Goodwin 1968) [5] بحساب حدود الانفعال في الجهة اليسرى من منحنى حد التشكيل عمليا، واصبح المنحنى يسمى ب (بمنحنى Keeler - Goodwin) أو منحنى حد التشكيل.

ان عملية تعيين منحنى حد التشكيل لا تخلو من مصاعب ومشاكل تواجه عملية تشكيل الصفائح المعدنية الواسعة التطبيق فقد قام الباحث (Hecker 1977) [6] بحل تلك المشاكل وذلك من خلال الاهتمام الجيد برسم منحنى حد التشكيل للمعادن وكفاءة تطبيقه في مجال تصميم عمليات تشكيل الصفائح المعدنية ، حيث قام باستخدام تقنية التشكيل بالمط (Stretch Forming) أي التشكيل باستخدام خرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) ولعدة نماذج مختلفة في العرض ومتساوية في الطول لغرض تعيين منحنى حد التشكيل بكل مساراته عمليا ولصفائح معدنية كثيرة وهذه المنحنيات معتمدة في الكثير من البحوث الحديثة لغرض مقارنتها بالنتائج النظرية [7].

كما قام الباحثان (Gupta & Kumar 2006) [9] بتشكيل صفيحة من الفولاذ المطلي بالزنك وذلك بواسطة خرامة نصف كروية ذات قطر (48.6mm) ونماذج ذات طول واحد (100mm) وبعرض مختلف (20-100mm) ووجد ان الصفائح المطلية كان لها قابلية تشكيل اقل من الصفائح غير المطلية بسبب ظهور اطوار شبه معدنية (Inter-Metallic) هشة بين الحديد والزنك والتي تعمل على تقليل من قابلية التشكيل. كذلك قام الباحثان (Ali and Edress 2007) [10] ببناء منحنى حد التشكيل لصفائح الالمنيوم والصلب والبراص وذلك عن طريق استخدام خرامة قطرها (100mm) وثمانية نماذج لها نفس الطول وعرضها مختلف ، ووجد الباحثان ان منحنى حد التشكيل الاعلى كان للبراص والأوطأ كان للالمنيوم . أما في عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي فقد فقد قام الباحثان (S.Koboyashi & J.H.Kim 1980) [11] بدراسة قابلية التشكيل لصفيحة الصلب المنخفض الكاربون عمليا بطريقة الخرامة والنفخ الهيدروليكي ونظريا باستخدام العناصر المحددة (Finite Elements Method) وبعد مقارنة النتائج النظرية والعملية وجد ان قابلية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي

## علي : مقارنة بين قابلية التشكيل لصفحة الالمنيوم التجاري النقي بطريقتي الخرامة والنفخ الهيدروليكي

أعلى من قابلية التشكيل بالخرامة وعزياً ذلك بأن في عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي لا يوجد احتكاك بين أداة التشكيل والصفحة المراد تشكيلها والذي يسبب في زيادة ارتفاع الحرارة في منطقة التلامس بين الأداة والصفحة مما يؤثر على الأجهادات المتخلفة Residual Stresses والتي تعيق عملية التشكيل. وكذلك وجدنا تقارباً بين النتائج التي حصلنا عليها عملياً مع النتائج التي حصلنا عليها بالطريقة النظرية.

قام الباحث (D. Banabic 2001) [12] بدراسة علاقة الضغط المستخدم في عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي مع الارتفاع الحاصل في قبة الصفحة (Height of Dome) عملياً باستخدام قوالب دائرية وبيضوية ونظرياً باستخدام نظرية خضوع Hill فوجد تقارباً بين المنحنيين (الضغط-الارتفاع) المعينين نظرياً وعملياً.

كما قام الباحث (H.Iseki 2001) [13] بدراسة قابلية التشكيل لصفحة الالمنيوم النقي وبسمك 0.3mm عملياً باستخدام النفخ الهيدروليكي ونظرياً باستخدام طريقة العناصر المحددة F.E.M فوجد تقارباً في المنحنيين المعينين عملياً ونظرياً. الباحث (J.Siotae 2008) [14] قام برسم منحنى الأجهاد - الانفعال لصفحة الصلب StE 220 وبسمك 0.8mm عملياً باستخدام النفخ الهيدروليكي ولمعرفة خواص السبيكة ، وكذلك استخدم الباحث الطريقة النظرية باستخدام F.E.M للمقارنة بين الطريقتين فوجد تقارباً بين المنحنيين المعينين عملياً ونظرياً

### الجانب العملي:

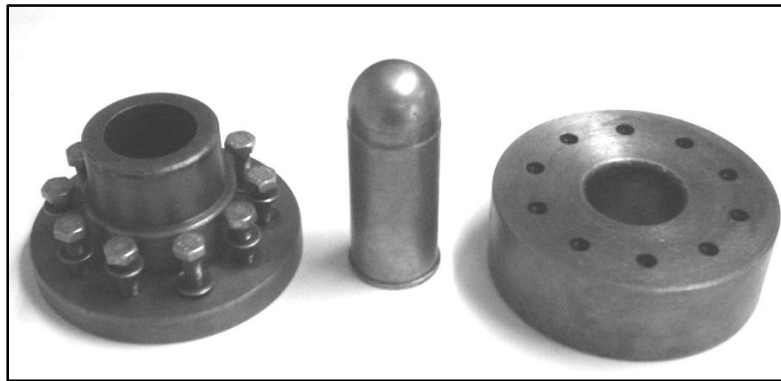
#### المواد المستخدمة

لقد تم استخدام صفحة الالمنيوم التجاري النقي Commercial pure Aluminum لتوفرها في الاسواق المحلية وكذلك لكثرة استخدامها في بلدنا ولرخص ثمنها وتم تحليلها كيميائياً وكما موضحة في الجدول التالي:

الجدول ( 1 ) : التحليل الكيميائي لصفحة الالمنيوم التجاري النقي

Chemical Composition								
Elements	Fe%	Mn%	Cr%	Si%	Ni%	Ti%	Cu%	Al%
Percentages	0.6	0.015	0.006	0.2	0.001	0.01	0.11	Rem.

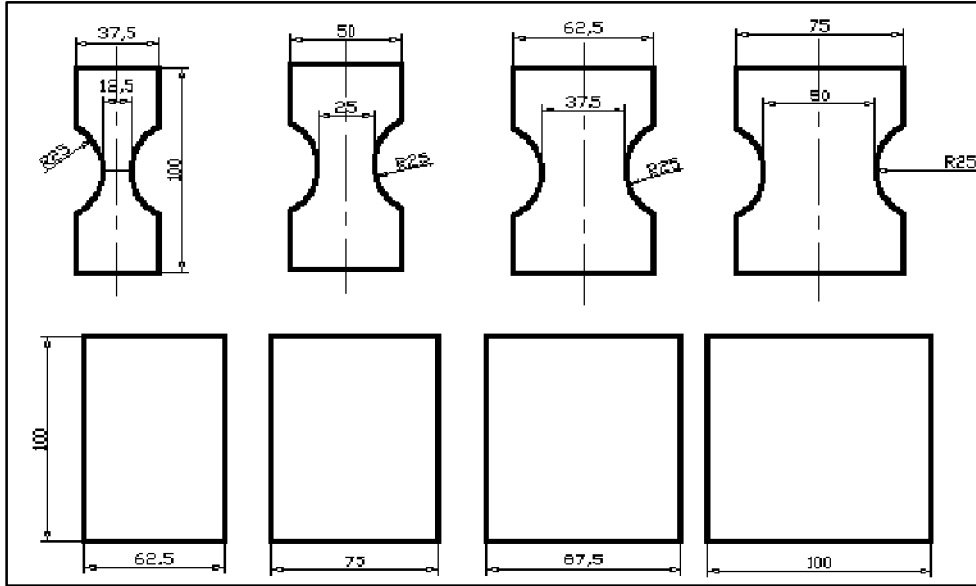
في عملية التشكيل بالمط تم استخدام خرامة نصف كروية ذات قطر ( 50 ملم ) مع قالب دائري ومثبت للنموذج كما في الشكل (1) [15]



الشكل (1): رسماً تجميعياً وصورة توضيحية للخرامة والقالب ومثبت النموذج

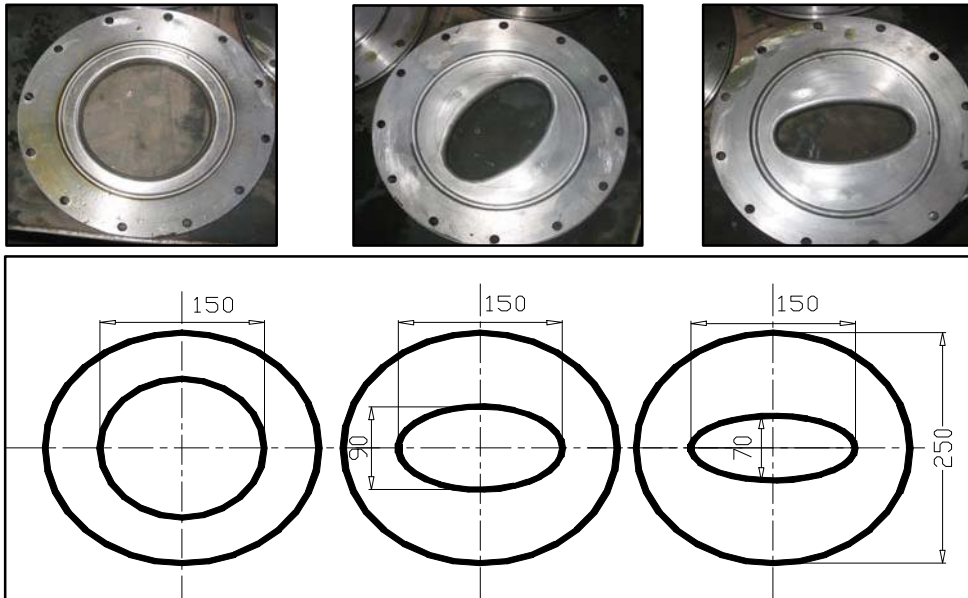
ولقد تم اختيار ثمانية أشكال للنماذج المستخدمة في عملية المط لتعطي رسماً كاملاً لمنحني حد التشكيل Forming Limit Curve وهذه النماذج الثمانية لها نفس الطول لكنها مختلفة في العرض مع وجود أقواس وذلك للحصول على مسارات

انفعال مختلفة (strain paths)، من مسار الشد أحادي المحور الى مسار المط ثنائي المحورين المتساويين مروراً بمسار الانفعال المستوي وكما في الشكل (2):



الشكل (2): اشكال وابعاد النماذج الثمانية والمستخدم في عملية التشكيل بالخرامة

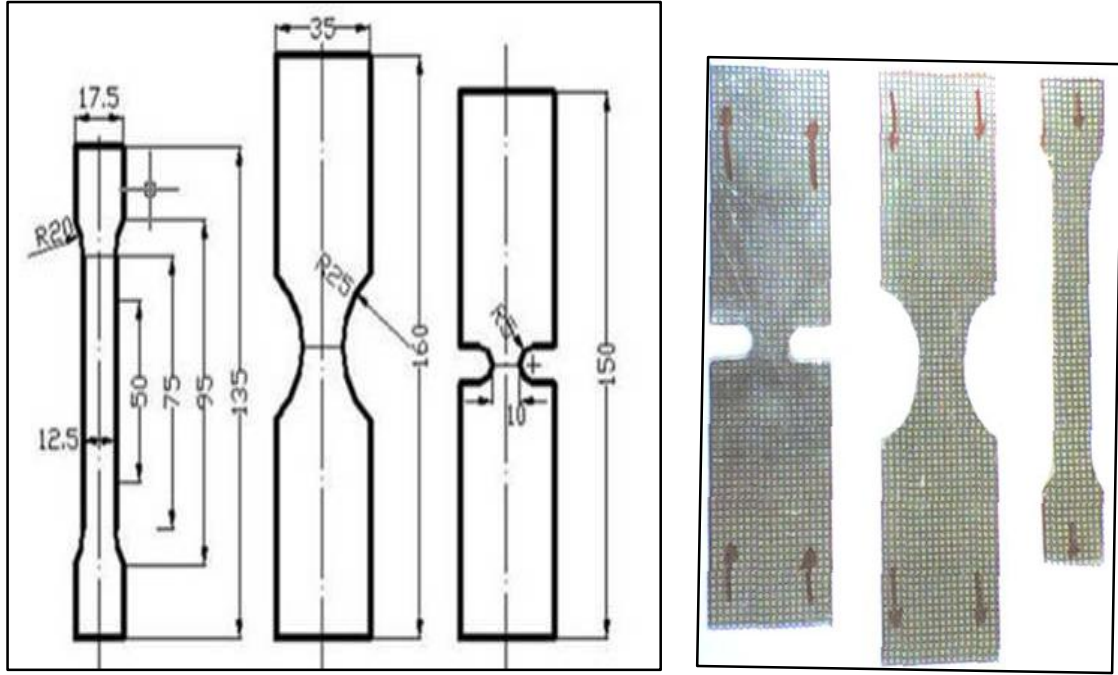
أما في عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي فقد تم استخدام نموذج من الصفيحة دائري بقطر 250mm مع ثلاث قوالب ، احدهما دائري بقطر 150mm والاخران بيضاويان بنسبة اقطار مختلفة 15:9 و 15:7 وكما في الشكل (3) [16]



الشكل (3): القوالب الثلاثة المستخدمة في البحث [16]

وهذا يضمن رسم الجهة اليمنى من المنحني ، اما رسم الجهة اليسرى فقد تم استخدام ثلاثة نماذج من عينات الشد وكما موضحة في الشكل (4) [16] ، وبهذا تم رسم المنحني وبمختلف مسارات الانفعال واتباع طريقة (Hecker 1972). [17]

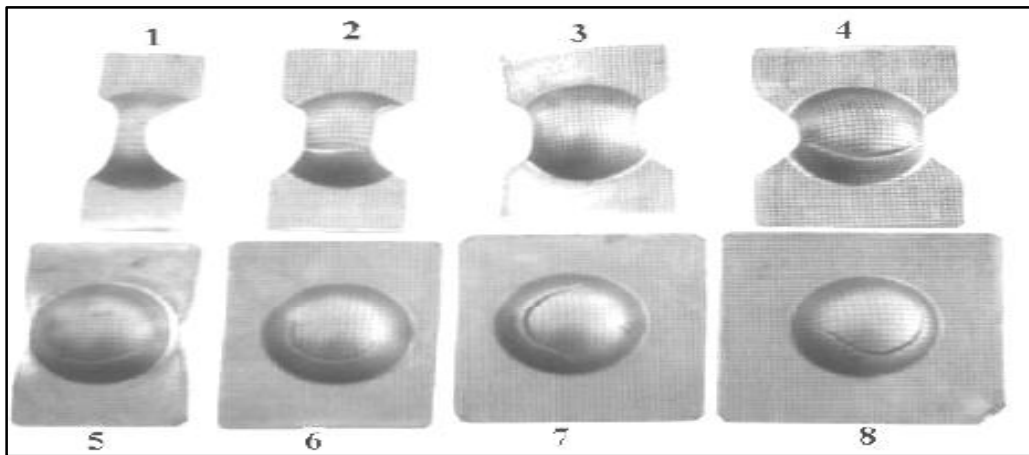
علي : مقارنة بين قابلية التشكيل لصفحة الالمنيوم التجاري النقي بطريقتي الخرامة والنفخ الهيدروليكي



الشكل (4): النماذج الثلاثة لعينات الشد لرسم الجهة اليسرى من منحنى حد التشكيل [16]

#### عملية التشكيل بالخرامة:

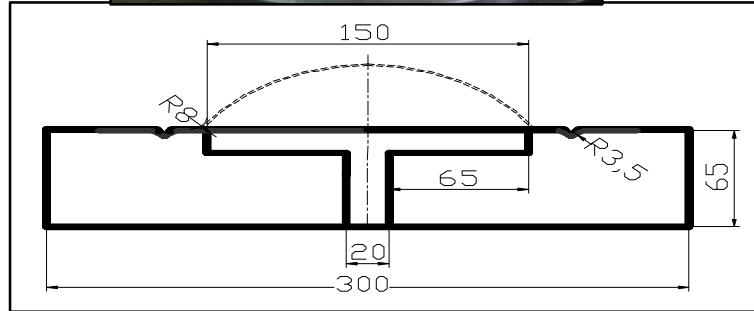
إن عملية التشكيل بالخرامة تتم عن طريقة كبس النماذج من 1 إلى 8 وكما موضحة في الشكل (2) بواسطة الخرامة، إذ يوضع النموذج على القالب ويثبت بأحكام داخله بواسطة مثبت النموذج ويكون اتجاه الانفعال الرئيس باتجاه الدرفلة ثم تبدأ عملية التشكيل بواسطة تسليط قوة الكبس على الخرامة ، ويلاحظ خلال عملية التشكيل زيادة الحمل المسلط تدريجياً مع زيادة التشوه الحاصل في النموذج ويستمر الحمل المسلط الى ان يصل اقصى حد له ثم ينخفض ، وفي لحظة انخفاض الحمل هذه يوقف الكبس لحصول التخصر الموضعي الذي يعقبه الكسر في بعض الاحيان. أن شكل النماذج بعد التشكيل موضح في الشكل (5)



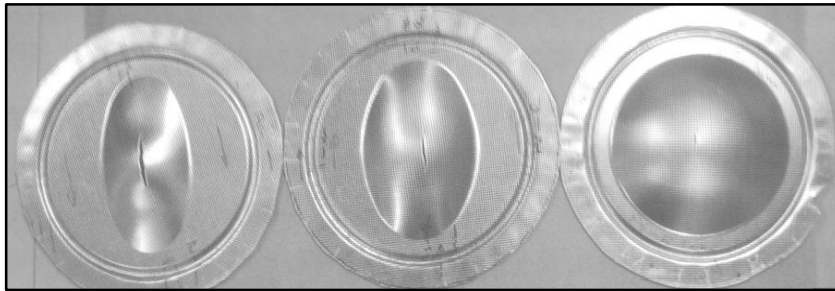
الشكل (5): صورة فوتوغرافية للنماذج الثمانية والمشكلة بعملية التشكيل بالخرامة

## عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي:

في عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي تم استخدام الجهاز المصمم لهذا الغرض كما في الشكل (6) وتمت عملية التشكيل بتسليط قوة ضغط السائل هيدروليكيًا على الصفيحة المعدنية ومن جهة واحدة، أذ توضع الصفيحة على جسم جهاز النفخ الهيدروليكي بحيث يكون اتجاه الانفعال الرئيس باتجاه الدرفلة ويتم تثبيت القالب المعدني فوقها بأحكام متقن تفاديا لأي تسريب للسائل، ثم توضع الاجزاء كلها ( القالب مع الجسم مع الصفيحة ) على جهاز الكبس بالضغط الهيدروليكي بعدها يسايط الضغط الهيدروليكي بالمكبس فتبدأ عملية التشكيل وتأخذ الصفيحة شكل نصف الكرة المنتفخ (بالنسبة للقالب الدائري) وشكل النصف البيضوي المنتفخ ( بالنسبة للقالب البيضوي) فتبدأ الزيادة في ارتفاع قمة الانتفاخ ( dome ) مع الزيادة في ارتفاع الضغط الى ان يتوقف او يتأرجح مؤشر الضغط قليلا وتستمر الزيادة في الارتفاع حتى يبدأ التخصر الموضعي ويعقبه الكسر مباشرة، ومن الصعب جدا السيطرة او الحصول على التخصر الموضعي وحده الذي يحصل في الصفيحة من دون الكسر كما موضح في الشكل (7)، حيث ان هذه المرحلة حرجة بين التخصر الموضعي الحاصل في الصفيحة ولحظة الكسر ولاسيما ان الصفيحة تحت ضغط يصل بين (9-20bar). تعاد هذه العملية لثلاثة قوالب ( دائري وبيضويين ) فيتم الحصول من خلالها على عدة مسارات الشد المختلفة، أي من مسار الشد ثنائي المحوريين المتساويين مقتريا من مسار الانفعال المستوي، فنتمكن من رسم الجهة اليمنى من منحنى حد التشكيل.



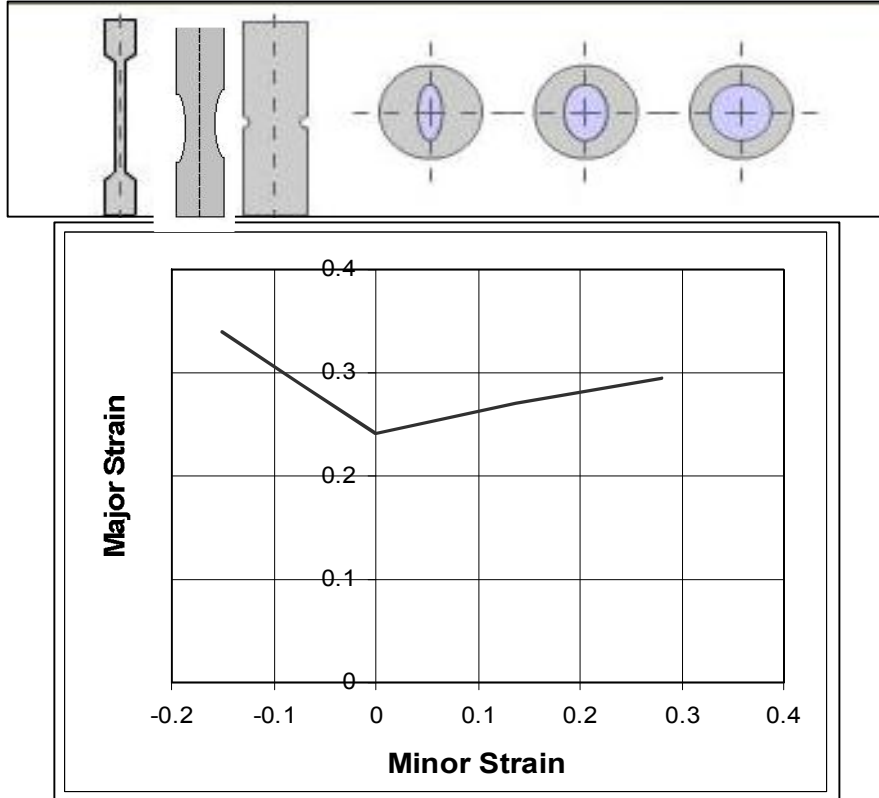
الشكل (6) صورة ورسم توضيحي للجهاز المستخدم في عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي



الشكل (7): صورة فوتوغرافية للنماذج الثلاثة المشكلة في عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي لرسم الجهة اليمنى من منحنى حد التشكيل وبيان منطقة الكسر فيها

علي : مقارنة بين قابلية التشكيل لصفحة الالمنيوم التجاري النقي بطريقتي الخرامة والنفخ الهيدروليكي

ولإكمال رسم منحنى حد التشكيل ورسم الجهة اليسرى من المنحنى ، يتم استخدام عينات الشد كما في الشكل (4) ، أذ توضع العينات في جهاز فحص الشد فتتعرض الصفحة للاستطالة مع زيادة الحمل المسلط ، إلى أن يبدأ مؤشر الحمل بالتوقف والتأرجح البسيط مع زيادة في الاستطالة وهذه الحالة تمثل نقطة الخضوع (Yield point) للصفحة، بعدها يستمر الحمل بالزيادة وتستمر الصفحة في الاستطالة إلى أن تبدأ الصفحة بالتخسر الموضعي الذي يعقبه الكسر. من خلال تشكيل هذه العينات يتم الحصول على مسار الشد احادي المحور مقتربا من مسار الانفعال المستوي، وبهذه المجموعة من العينات ( ثلاثة منها بالنفخ الهيدروليكي وثلاثة بفحص الشد) يتم رسم منحنى حد التشكيل وبمساراته المختلفة ( من ضمنها المسارات الرئيسية الثلاثة) كما موضح في الشكل(8).



الشكل(8): منحنى حد التشكيل المرسوم بعملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي(الجزء الأيمن) وب نماذج الشد الخاصة (الجزء الأيسر)

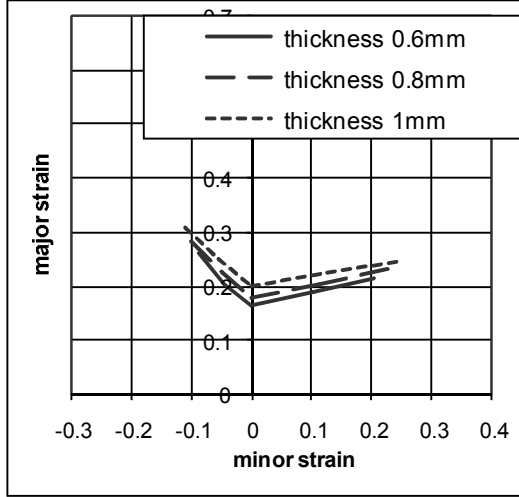
**التلدين:** أن عامل التلدين من العوامل المهمة والاساسية والتي تؤثر تأثير واضحاً على منحنى حد التشكيل، وان عملية التلدين لها مساهمة فعالة في عمـ تشكيل الصفائح المعدنية وقابليتها على التشكيل . ويبين الجدول (2) درجة حرارة التلدين لصفحة الالمنيوم المستخدمة في هذه الدراسة مع الزمن .أذ تم تشكيل كل النماذج وبالطريقتين ( الخرامة والنفخ الهيدروليكي) وتم تعيين منحنى حد التشكيل ولكل سمك(1,0.8,0.6 mm).

الجدول (2): يبين درجة حرارة التلدين مع الزمن لصفحة الالمنيوم المستخدمة.

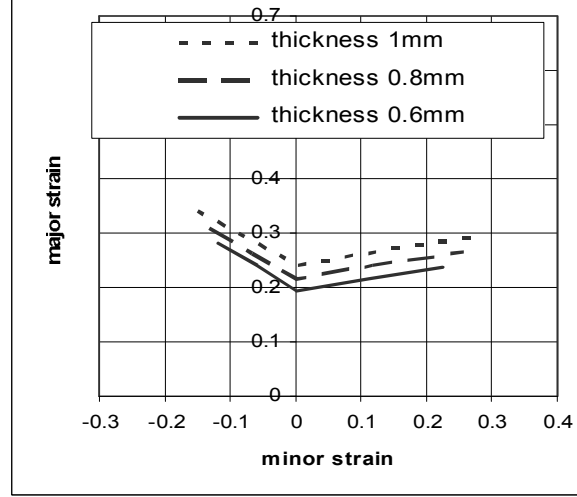
Material	Annealing Material Temperature (c°)	Time of Heating (min)	Soaking Time (min)
Pure Aluminum	275	15	10

## المناقشة والتحليل:

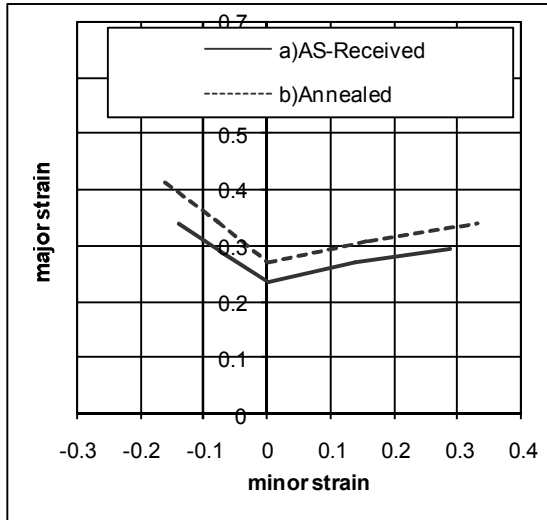
تأثير السمك : أن لأختلاف سمك الصفيحة في عمليات تشكيل الصفائح المعدنية تأثيرا مباشرا على منحنى حد التشكيل ، حيث في عملية التشكيل بالخرامة والنفخ الهيدروليكي، ظهر في منحنى حد التشكيل وسمك 1mm ارتفاعا ملحوظا عن بقية المنحنيات المعينة للصفائح ذات السمك (0.8, 0.6mm) وكانت قابلية التشكيل الافضل باستخدام النفخ الهيدروليكي وكما موضحة في الأشكال (9)،(10).



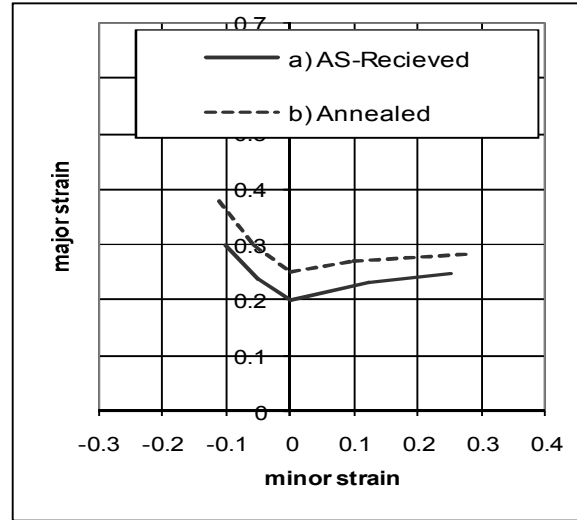
الشكل (10): تأثير السمك على منحنى حد التشكيل لصفحة الالمنيوم بطريقة التشكيل بالخرامة (As-Received) 1, 0.8, 0.6) ملم، وكما مستلمة (As-Received)



الشكل (9): تأثير السمك على منحنى حد التشكيل لصفحة الالمنيوم بطريقة التشكيل بالنفخ الهيدروليكي (As-Received) 1, 0.8, 0.6) ملم، وكما مستلمة (As-Received)



الشكل (11): مقارنة بين منحنيات حد التشكيل لصفحة الالمنيوم بسمك 1ملم وباستخدام الخرامة: (a) كما مستلمة ، (b) بعد عملية التلدين



الشكل (12): مقارنة بين منحنيات حد التشكيل لصفحة الالمنيوم بسمك 1ملم وباستخدام النفخ الهيدروليكي: (a) كما مستلمة ، (b) بعد عملية التلدين



## علي : مقارنة بين قابلية التشكيل لصفحة الالمنيوم التجاري النقي بطريقتي الخرامة والنفخ الهيدروليكي

وعلى العموم يمكن القول بأنه كلما زاد سمك الصفحة زادت قابلية التشكيل لتلك الصفحة وهذا بسبب أن الانفعال باتجاه السمك ( $\epsilon_t$ ) يعتمد على سمك الصفحة حيث أن :

$$\epsilon_t = \ln \frac{t}{t_0}$$

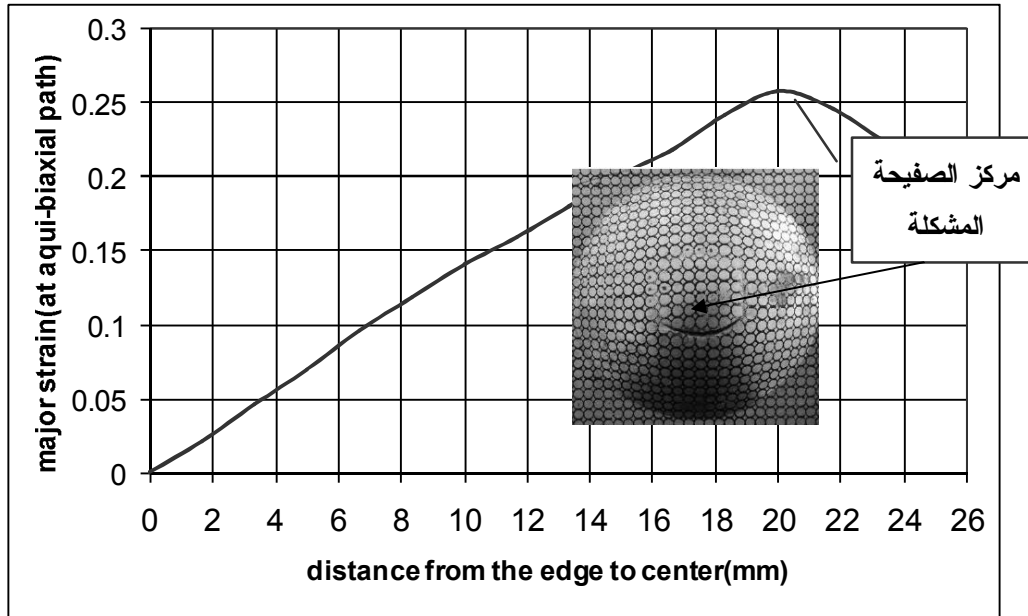
حيث كلما زاد السمك  $t_0$  للصفحة المستخدمة زادت قيمة الانفعال باتجاه السمك وأعطت مجال أكبر لعملية الترقيق وتأخير الوصول الى منطقة التخصر مما يؤدي الى زيادة في قابلية التشكيل لتلك الصفحة ،حيث اذا زاد السمك %100 ، زاد ارتفاع مستوى منحنى حد التشكيل بنسبة %20 ، وهذا ما أكدته الباحث [18].

**تأثير التلدين :** من خلال منحنى حد التشكيل في الشكل (11)، والمعينة بطريقة الخرامة وبعد اجراء عملية التلدين ، فقد ظهر ارتفاعا ملحوظا عن المنحنيات المعينة للصفائح كما مستلثة وبمختلف السمك .

أما في عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي ومن خلال المنحنى في الشكل (12) ،فقد تبين أن كل المنحنيات المعينة شهدت ارتفاعا واضحا في منحنى حد التشكيل وبنسبة اكبر من تلك المعينة بالخرامة ، والسبب يعود لعدم وجود احتكاك في هذه الطريقة بالإضافة الى عملية التلدين التي ساهمت في زيادة قابلية الصفائح على التشكيل ، وباختلاف السمك.

**تأثير الاحتكاك :** إن عامل الاحتكاك من اهم العوامل التي أهتم بها مهندسو التشكيل ، لأنه يؤدي دوراً مباشراً ومهما في قابلية الصفائح المعدنية على التشكيل ، ويظهر تأثيره ملحوظاً في منحنى حد التشكيل. إن تأثير الاحتكاك يعمل على تغيير موقع الفشل (التخصر) ويجعله يقترب أو يبتعد عن مركز أو (قمة) الصفحة المشكولة. وهذا ما أكدته الباحثان (Hosford and Caddell) [19]، إذ برهننا أن الاحتكاك يؤثر في منحنى حد التشكيل ويعمل على تغيير في حدود الانفعال فيه . وأن الاحتكاك يعمل على تقليل من قوة المط في أثناء التشكيل ، ويسبب التخصر الموضعي مبكراً.

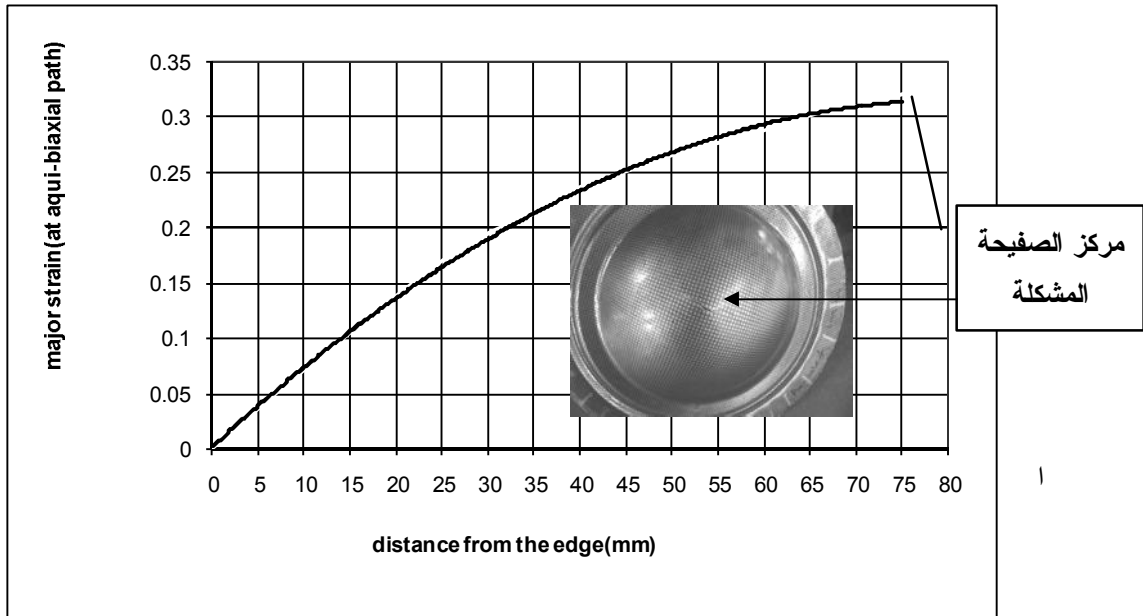
وفي هذه الدراسة ولغرض معرفة تأثير الاحتكاك في منحنى حد التشكيل ، فقد تم استخدام طريقة التشكيل بالخرامة النصف الكروية (وجود احتكاك) وبسمك مختلف (0.6 mm , 0.8 , 1 mm) من جهة، ومن جهة أخرى ، تم استخدام طريقة التشكيل بالنفخ الهيدروليكي (لا يوجد احتكاك بين الصفحة والمكبس ، بل يوجد سائل تحت ضغط معين يقوم مقام الخرامة ويمثل قوة التشكيل).



الشكل (13): توزيع الانفعال الرئيس باتجاه مسار ثنائي المحورين المتساويين من الحافة الى المركز بطريقة التشكيل بالخرامة

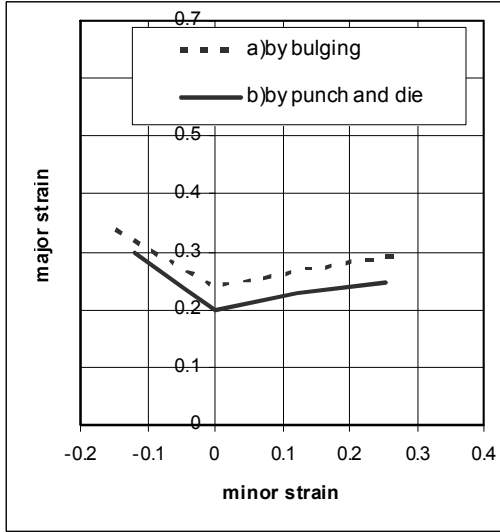
أن الاحتكاك يؤدي دوراً أساسياً في توزيع الانفعالات الحاصلة على سطح العينة أثناء التشكيل ، ففي عملية التشكيل بالخرامة ، حيث يلاحظ مثلاً عند مسار الشد ثنائي المحورين المتساويين ، وفي العينة المستخدمة في عملية التشكيل بالخرامة التي من خلالها تم الحصول على هذا المسار، (الذي تمثلت بياناته من خلال النموذج الذي يضمن الحصول على مسار الشد ثنائي المحورين المتساويين). يلاحظ بأن التخصر قد حصل في منطقة قريبة من المركز، بسبب الاحتكاك بين الخرامة والصفحة وقد ازداد الاحتكاك عند تلك المنطقة (منطقة التلامس الحلقية بين الخرامة والصفحة)، وقل عندها ترقيق الصفحة بسبب فشله. ، ومن خلال الشكل(13) ، يتبين بأن الانفعال الرئيس يزداد من حافة الصفحة باتجاه المركز ، الى ان يصل أعلى قيمة له عند منطقة قريبة من المركز التي عندها تزداد قوة الاحتكاك ، فيحدث عندها التخصر .

اما في حالة التشكيل بالنفخ الهيدروليكي ، فإن الاحتكاك يكاد يكون معدوماً ، وقد تم تعيين منحنيات حد التشكيل بهذه الطريقة من اجل معرفة تأثير الاحتكاك فيها ، وقد لوحظ بأن منطقة التخصر كانت عند قمة الصفحة المشكولة (مركز الانتفاخ فكما قل الاحتكاك اقتربت منطقة التخصر باتجاه المركز .) كما موضح في الشكل(14). (الذي تمثلت بياناته من خلال النموذج الذي يضمن الحصول على مسار الشد ثنائي المحورين المتساويين).

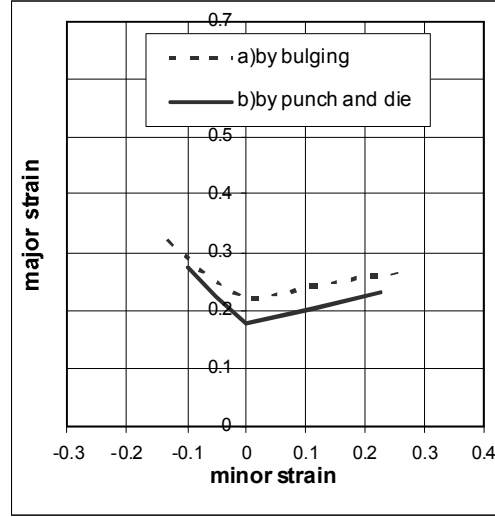


الشكل(14): توزيع الانفعال الرئيس باتجاه مسار ثنائي المحورين المتساويين من الحافة الى المركز بطريقة التشكيل بالنفخ الهيدروليكي

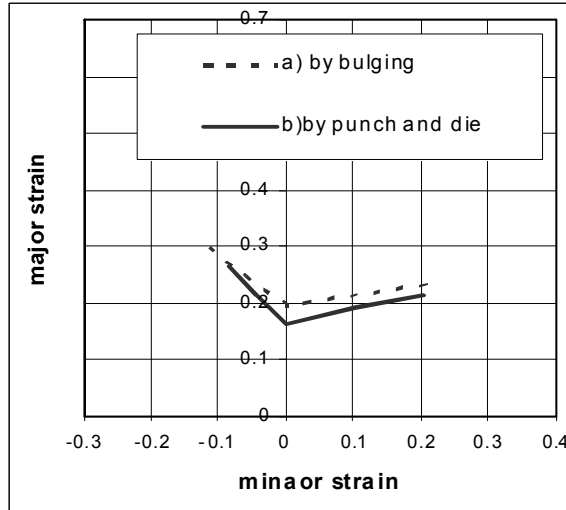
يتبين بأن الانفعال الرئيس يزداد من حافة الصفحة باتجاه المركز ، وان أعلى قيمة له كانت في قمة الصفحة، حيث حصل عندها الفشل، وان توزيع الانفعالات كان أكثر انتظاماً ، وصاحبها زيادة في ترقيق الصفحة. ومن خلال المنحنيات في الأشكال (15)،(16)،(17) تبين بأن قابلية التشكيل باستخدام النفخ الهيدروليكي أعطت نتائج أفضل مقارنة بطريقة التشكيل بالخرامة .وبصورة عامة ممكن القول بأن عملية التشكيل بالنفخ الهيدروليكي ، اعطت نتائج أفضل في زيادة قابلية التشكيل مقارنة بطريقة التشكيل بالخرامة ، ويعزى ذلك لعدم وجود احتكاك في طريقة النفخ الهيدروليكي ووجوده في طريقة الخرامة.



الشكل (15): مقارنة بين منحنى حد التشكيل لصفحة الالمنيوم النقي وبسمك 1mm في كل من (a) كما مستلثة التشكيل بالنفخ الهيدروليكي (b) كما مستلثة ، التشكيل بالخرامة



الشكل (16): مقارنة بين منحنى حد التشكيل لصفحة الالمنيوم النقي وبسمك 0.8mm في كل من (a) كما مستلثة ، التشكيل بالنفخ الهيدروليكي (b) كما مستلثة ، التشكيل بالخرامة



الشكل (17): مقارنة بين منحنى حد التشكيل لصفحة الالمنيوم النقي وبسمك 0.6mm في كل من (a) كما مستلثة ، التشكيل بالنفخ الهيدروليكي (b) كما مستلثة ، التشكيل بالخرامة

1. Petar A., et.al., " Materials Selection and Design ", Metal Handbook, The volume was prepared under the direction of the ASM Handbook Committee, Vol.20, pp709-713, 1997.
2. Marciniak,A.,Durcan,J.L," Mechanics of Sheet Metal Forming " ,Butter Worth-Heineman,2002
3. 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
4. Keeler.S.P, " Circular Grid System, A Valuable Aid For Evaluating Sheet Metal Formability " , Society of Automotive Engineers Technical Paper, No.680093, 1968.
5. Goodwin, G.M., " Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop " , Society of Automotive Engineers, technical paper No. 680093, 1968
6. Hecker.S.S., " Experimental Studies of Sheet Stretchability " Proc. of Symp. on Formability Analysis-Modeling and E., cperimentation, Chicago, IL, p. 150 1977
7. Padwal, S.B. and Chaturvedi, R.C., " Prediction of Forming Limits Using Hosford's Modified Yield Criterion " , Int. J. Mech. Sci. vol. 34, No. 7, pp. 541-547, 1992.
8. Aghaie,K., M.Mahmudib.R., " The Effect of Preheating on The Formability of Al-Fe-Si alloy Sheet " , Journal of Materials Processing Technology 169,38-43, 2005.
9. Gupta-A-K, Kumar, D.R, " Formability of Galvanized Interstitial-Free Steel Sheet ' ,Journal of Material Processing Technology, 172,225-237, 2006.
10. Ali.W.J., Edress, A-O., " Theoretical Determination of Forming Limit Diagram for Steel, Brass and Aluminum Alloy Sheet",Al-Rafidian Engineering Vol.15,No.1, 2007.
11. Kobayshi, S., and H.Kim, J. " Determination Analysis of Ax symmetric Sheet Metal Forming Processes by The Rigid-Plastic Finite Element Method " , General Motors Research Laboratories,1980.
12. Dr. Banabic, T. and Comsa, D-S., " Closed-Forme Solution For Bulging Through Elliptical Dies " , Journal of Materials Processing Technology 115,38-86,2001.
13. Isek, H., " An approximate Deformation Analysis and FEM Analysis for The Increment Bulging of Sheet Metal Using a Spherical Roller " , Journal of Materials Processing Technology 111, 150-154, 2001
14. J. Slota, E-Spisak, " Determiation of Flow Stress by The Hydraulic Bulge Test " , Metabk47, 13-17, 2008.
15. Anas O.A. AL-Shammery, " Study of Factors Affecting The Determination of Forming Limit Diagram For Sheet Metals " , University of Mosul, Mechanical Engineering Department, 2005.
16. Haroldo B., Campos, Marilen Carmen, Butuc, Jose Joaquim Gracio and Joao Rocha, " Theatrical and Experimental Determination of The Forming Limit Diagram For The AISI304 Stainless Steel"Journal of Materials Processing Technology179,56-60, 2006.
17. Hecker, S.S., " A Simple Forming Limit Curve Technique and Result on Aluminum Alloys " , Sheet Metal Forming and Formability Proceedings of the 7<sup>th</sup>. Biennial Congress of IDDRG, pp5.1 to 5.8, Amsterdam, October, 1972.
18. Fawzi M.A. " Formability in Sheet Metals by Finite Element Method " , Ph.D. Thesis , Mechanical Department, University of Mosul, 2006
19. William F.Hosford and Robert M. Caddell, "Metal Forming", Prentic-Hall, Inc, Englewood clitts, NJ07632, 1983.