

دراسة تأثير الانفعالات المسبقة في المط ثنائي المحور المتساوي على مخطط حد التشكيل لصفائح  
من سبيكة الألمنيوم (2024 T3) <sup>+</sup>

## STUDY THE EFFECTS OF PRESTRAINS IN EQUIBIAXIAL STRETCHING ON THE FORMING LIMIT DIAGRAM OF ALUMINUM ALLOY SHEETS (2024 T3)

حسين محمد علي ابراهيم\*

ثائر فائز احمد سلطان\*

المستخلص:

قد يتغير مسار الانفعال للصفائح المعدنية عند التشكيل مما قد يؤثر على منحنى حد التشكيل (FLC) . في هذا البحث تم تعيين منحنى حد التشكيل قبل وبعد استخدام الانفعالات المسبقة في المط ثنائي المحور المتساوي لصفائح من سبيكة الألمنيوم (2024 T3) لدراسة تأثير هذا النوع من الانفعالات و بمقادير مختلفة على منحنى حد التشكيل . اختيرت هذه السبيكة لكثرة استخدامها وخاصة في هياكل الطائرات . تبين أن استخدام مسار الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي يؤثر على منحنى حد التشكيل . حيث استنتج أن منحنى حد التشكيل عند كل مسارات الانفعال (الانفعال الرئيس) قد انخفضت (في المرحلة الثانية).

الكلمات الدالة: مخطط حد التشكيل ، انفعال مسبق ، المط ثنائي المحور المتساوي

### Abstract:

The strain path for sheet metal may be changed during forming , this may be affect the forming limit curve (FLC) . In this work the FLC before and after prestraining was determined for aluminum alloy (2024 T3) to study the effect of this type of prestraining and in different values on the FLC. This alloy was chosen because it is used widely , specially in aircraft structures. It was shown that the using of The equibiaxial stretching (in the first stage), reduces the forming limit curve at all strain paths (in the second stage) . It was noted that, the major strain at Forming Limit Level, when prestrains in equibiaxial stretching path direction is used was lowered at the three levels of prestrain (0.3, 0.5 and 0.07) .

Keyword:Forming limit Diagram, Prestrain , Uniaxial Tension.

### المقدمة:

تعد عمليات تشكيل المعادن بشكل عام من العمليات المهمة والأساسية في مجال الصناعة العالمية حيث أنها تستخدم التشويه اللدن لتغيير شكل القطعة المعدنية . وأن من بين عمليات التشكيل هذه تشكل عمليات تشكيل الصفائح المعدنية نسبة تزيد عن نصف مجموع عمليات تشكيل المعادن [1]. أن من الفوائد الحقيقية للتكنولوجيا في القرن العشرين القابلية على إنتاج أشكال مختلفة من الصفائح المعدنية المستوية للمعادن وبمعدلات إنتاج عالية [2]. غالباً ما يكون الهدف الأساسي في تشكيل الصفائح هو ما إذا كان التشكيل المطلوب يمكن أن نحصل عليه بدون فشل معدن الشغلة ، حيث تعرف قابلية تشكيل الصفائح على أنها قابلية المعدن على تحمل التشويه اللدن (التشكيل بالمط أو السحب) أي

<sup>+</sup> تاريخ استلام البحث ٢٠٠٩/١/٢٠ ، تاريخ قبول النشر ٢٠١٠/٥/٤ .

<sup>\*</sup> مدرس مساعد /الكلية التقنية /الموصل

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 خليط من الانفعالات التي تقود إلى الفشل.

أنشأ مخطط حد التشكيل أول مرة العالم (keeler). حيث أن كل من الانفعالات الرئيسية والثانوية القسوى يمكن وصفها مع بعض وتوضيحها وذلك عن طريق مخطط حد التشكيل. وهذا المخطط يكثر استخدامه 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 ويعتبر أداة مهمة في تصميم القوالب بالإضافة إلى التوقع الصحيح للمشاكل في خط الإنتاج [3]، معظم مخططات حد التشكيل في البحوث والمختبرات الصناعية معتمد حصولها بالمط فوق خرامة نصف كروية [4].

غالبا ما تحتوي أجزاء الصفيحة المعدنية المشكولة على تغييرات في مسار الانفعال خلال عمليات التشكيل و أن تأثيرات تغييرات مسار الانفعال على قابلية التشكيل للصفيحة تكون مهمة ومعلومة لدى مهندسي التشكيل (Stamping Engineers) وقد يتغير مسار الانفعال (Strain Path) عند تشكيل صفيحة ما للحصول على الشكل النهائي الذي يحمل المواصفات المطلوب [5].

تم اكتشاف تأثير تغيير مسارات الانفعال من خلال المشاهدات في عدد من البحوث التي كانت فيها حدود الانفعال مرتفعة أو منخفضة معتمدة بذلك على طبيعة تغيير مسار الانفعال [4]. مع مرور الوقت تم تطوير طرائق عديدة لحساب حد التشكيل في الصفائح المعدنية ، والمساهمة الرئيسة في هذا الاتجاه تمت من قبل الباحثين (Keeler & Backofen 1963) [6] حيث قام الباحثان بتعيين حدود الانفعال في الجهة اليمنى من منحنى حد التشكيل عمليا أي أن ( الانفعال الرئيسي موجب والانفعال الثانوي موجب أيضا) وذلك عند استخدام تقنية التشكيل باستخدام خرامة (Punch) ذات أشكال مختلفة، ويعتبر (Keeler) [7] أول من أستخدم تقنية رسم الدوائر على الصفائح المعدنية وبطريقة كهروكيميائية (electrochemically) حيث قام برسم دوائر بقطر (2.5mm) وذلك لحساب الانفعال على سطح الصفيحة . بعدها قام الباحث ( Goodwin 1968 ) [8] بحساب حدود الانفعال في الجهة اليسرى من منحنى حد التشكيل عمليا (الانفعال الثانوي سالب)، حيث استخدم تقنية التشكيل باستخدام خرامة مسطحة ، ونتيجة لذلك أكمل رسم المنحني (الجهة اليمنى والجهة اليسرى) للصلب الكربوني وأصبح يسمى منحني (Keeler-Goodwin) أو منحنى حد التشكيل .

بالنسبة للدراسات الحديثة قام الباحثان (Shakeri and Dariani 2000) [9] بالتشكيل باستخدام خرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) بقطر (90mm) لصفائح الصلب منخفض الكربون والصلب المقاوم للصدأ والنماذج التي استخدمت هي دائرية ومستطيلة وذلك لتعيين منحنى حد التشكيل عمليا مع استخدام عامل التزبييت، حيث وجد الباحثان تقارب النتائج للصلب والصلب المقاوم للصدأ (Stainless Steel) ، وكذلك قام الباحث ( Kim et.al ) (2003) [10] بأجراء عملية التشكيل بالمط باستخدام خرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) بقطر (50mm) ، كما استخدم نماذج لها نفس الطول (100mm) ولكن مختلفة العرض ، قام الباحث بأجراء التشكيل لنماذج من صفيحة سبائك الألمنيوم ومقارنته مع صفيحة تتكون من الألمنيوم والبوليمر (Sandwich) فقد وجد الباحث أن صفيحة (Sandwich AL-Poly-AL) تعطي منحنى حد التشكيل أفضل من منحنى سبائك الألمنيوم ، حيث تم استخدام نفس قطر الخرامة في هذه الدراسة. خلال الفترة الماضية تم تطوير طرق عديدة لدراسة تأثير مسارات الانفعال (Strain Paths) على مخططات منحنى التشكيل (FLDs) في الصفائح المعدنية ، والمساهمة الرئيسة في هذا الاتجاه

تمت من قبل الباحثين [11-14] حيث قاموا بإجراء عدة بحوث في تأثير مسارات الانفعال على مخططات حد التشكيل (FLDs) لصفائح الفولاذ قليل الكربون. بالنسبة للدراسات التي تناولت سبائك الألمنيوم ، حيث قام الباحثان (A.Graf&W.F. Hosford 1993) [4] بدراسة تأثيرات تغيرات مسار الانفعال (Strain-Path Changes) المفاجئة على مخططات حد التشكيل لسبيكة الألمنيوم 2008T4. ثم قام نفس الباحثين (A.Graf&W.F. Hosford 1994) [5] بدراسة تأثيرات تغيرات مسار الانفعال (Strain-Path Changes) على مخططات حد التشكيل لسبيكة الألمنيوم (6111T4) ، فقد وجد الباحثان أنه عند تغيير مسار الانفعال من مسار الشد أحادي المحور إلى مسار الانفعال المستوي يؤدي إلى رفع منحنى حد التشكيل عن المنحني الأصلي ، أما عند تغيير مسار الانفعال باتجاه مسار المط ثنائي المحور المتساوي من المنحني فان ذلك يؤدي إلى زيادة منحنى حد التشكيل عن المنحني الأصلي في المط ثنائي المحور و الانفعال المستوي بالتتابع.

أن اختيار سبائك الألمنيوم للدراسة في الفترة الأخيرة جاءت نتيجة استخدام سبائك الألمنيوم في عملية تشكيل الصفائح المعدنية التي تشمل صناعة الطائرات و خاصة في الجسم والجنح و الهيكل الخارجي للسيارات (الأبواب و غطاء المحرك و الواقيات) و العلب و دعامات السيارات و كذلك أغطية الكثير من المكائن [2,15]، ولكون أن هذه السبائك تمتاز بقلّة (نسبة وزنها إلى المقاومة) و سهولة تشكيلها، هذا بالإضافة إلى إمكانية تحسين خواصها الميكانيكية عن طريق المعاملات الحرارية [16]. في هذا البحث تم دراسة قابلية تشكيل صفائح سبيكة الألمنيوم (2024T3) والتي يكثر استخدامها في إنتاج الهياكل الخارجية للطائرات [2]، من خلال دراسة منحنى التشكيل وتأثير الانفعالات المسبقة عليه ، حيث تم دراسة تأثير المط ثنائي المحور المتساوي إلى مستويات ثلاثة على مخطط حد التشكيل .

#### الصفحة المعدنية المستخدمة وتحليلها الكيميائي:

أن السبيكة المستخدمة هي من نوع (AL 2024 T3) ذات سمك (1.2mm) حيث تم تحليل هذه السبيكة كيميائياً بواسطة جهاز التحليل الكيميائي (Spectroscopy) بمختبر فحص المواد في جامعة حلب والجدول (1) يبين التحليل الكيميائي لهذه السبيكة.

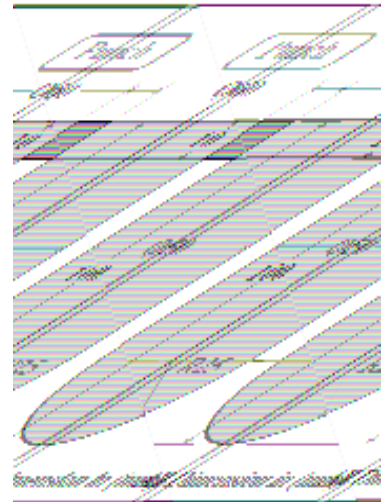
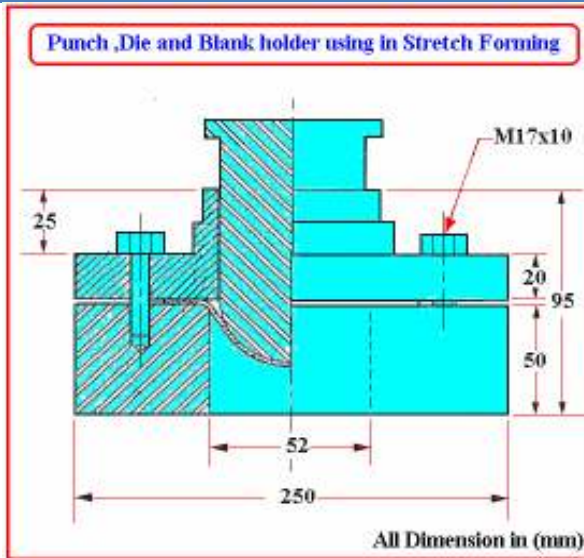
الجدول (1) التحليل الكيميائي لسبيكة الألمنيوم (AL 2024 T3)

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

**الجانب العملي:** صفائح سبيكة الألمنيوم (AL 2024 T3) اجري عليها انفعال مسبق في المط ثنائي المحور المتساوي ولعدة مستويات من الانفعال . بعد ذلك تقطع النماذج من الصفحة نفسها التي اجري عليها انفعال مسبق لإجراء عملية التشكيل حيث تشكل بخرامة نصف كروية للحصول على مخططات حد التشكيل .

تعتبر عملية التشكيل بواسطة خرامة نصف كروية من العمليات المهمة والأساسية والنهائية في تشكيل الصفائح المعدنية ،أستخدم في هذه العملية خرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) وقالب (Die) ومثبت الخامة (Blank Holder) ، حيث توضع الصفحة المعدنية على القالب ثم تكبس بالخرامة أي عملية تشكيل المادة فوق الخرامة بحيث تأخذ شكل الخرامة [15] .

في الجانب العملي تم استخدام خرامة قطرها (50mm) كما في الشكل (1) من الصلب ذي صلادة (50 HRC) مع قالب من الصلب صلادته (40 HRC). وكذلك مثبت الخرامة لتثبيت الصفيحة من نفس معدن القالب كما في الأشكال (2) و (3) ، وهذه الأجزاء تم وضعها على جهاز فحص الشد بعد استخدامه كجهاز كبس كما في الشكل (4). لغرض الحصول على طرق انفعال تمتد بين مسار الشد أحادي المحور (Uniaxial Tension Path) ومسار المط ثنائي المحور المتساوي (Equibiaxial Stretching Path)، فقد تم اختيار أشكال النماذج للمعادن لتعطي رسماً كاملاً للمنحنى متبعين الطريقة المستخدمة من قبل [17, 18] التي أعطت نتائج جيدة والتي استخدمت في عدد كبير من البحوث [9,10&18] وهي ثمانية نماذج لها نفس الطول ومختلفة العرض مع وجود أقواس، 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 بواسطة مثبت الخرامة 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) يمثل رسماً تجميعياً للخرامة والقالب ومثبت النموذج

الشكل (1) الخرامة المستخدمة في التشكيل



الشكل (3) صورة للخرامة والقالب مثبت



الشكل (4) يبين جهاز فحص الشد

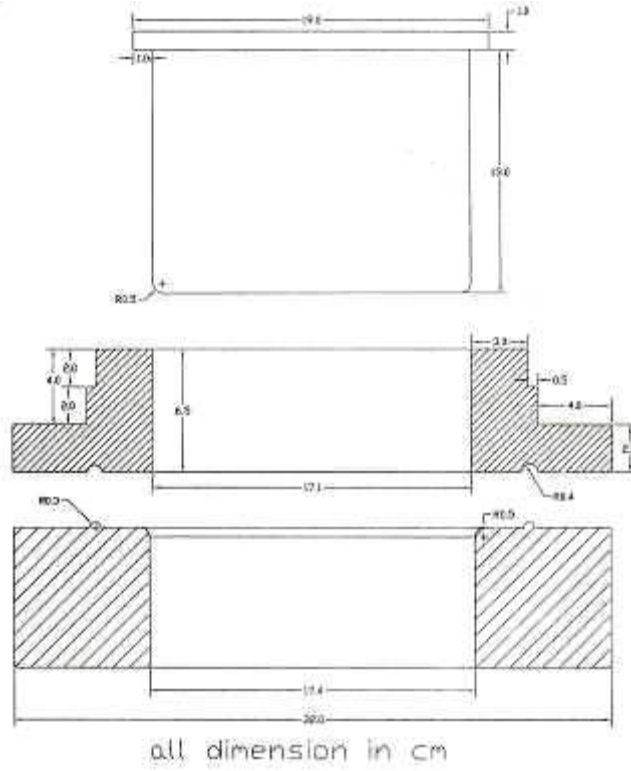
أ- الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي (Prestraining in Equibiaxial Stretching): لغرض إجراء الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور (المرحلة الأولى) كان لابد من تصنيع خرامة مسطحة ذات قطر

كبير (170 mm) وبارتفاع (130 mm) كما في الشكل (5) من الصلب ذات صلادة (50 HRC) مع قالب من الصلب  
صلادته (40 HRC) حيث كان قطراه الداخلي والخارجي (174,320 mm) على التوالي وبارتفاع (75 mm) وكذلك  
مثبت الخامة لتثبيت الصفيحة من نفس معدن القالب ، كما أن أقطار الأقواس لحافة القالب والخرامة كانت (9.6 mm)  
[19] . كما كان قطر حافة السحب المحدبة (Draw-Bead) يساوي (232 mm). أما أقواس التعشيق للقالب و ماسك  
النموذج في حافة السحب المحدبة فكانت بأقطار (6 and 8.4 mm) على التوالي [20]. وهذه الأجزاء تم وضعها على  
جهاز فحص الشد بعد استخدامه كجهاز كبس كما في الشكل (6). قُطعت النماذج في هذه العملية إلى صفائح دائرية  
الشكل (نماذج المرحلة الأولى) والتي كان قطرها حوالي (250 mm) [21] والتي عن طريق هذه الخرامة المسطحة  
تعرضت إلى الكبس وذلك لعدة مستويات من الانفعال كما في الجدول (2).

الجدول (2) يبين قيم الانفعالات المسبقة في هذا البحث

الانفعال الرئيسي (€1) (Major Strain)	مستوى الانفعال
0.03	1
0.05	2
0.07	3

حيث أن النماذج شوهدت بفعل انفعالات ثنائية المحور في الجزء المسطح من قعر الخرامة كما في الشكل (7).



الشكل (5) الخرامة المسطحة ومثبت النموذج والقالب والمستخدمين لإجراء عملية الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي

الشكل (6) صورة توضح الخرامة ومثبت النموذج والقالب بعد كبس النموذج

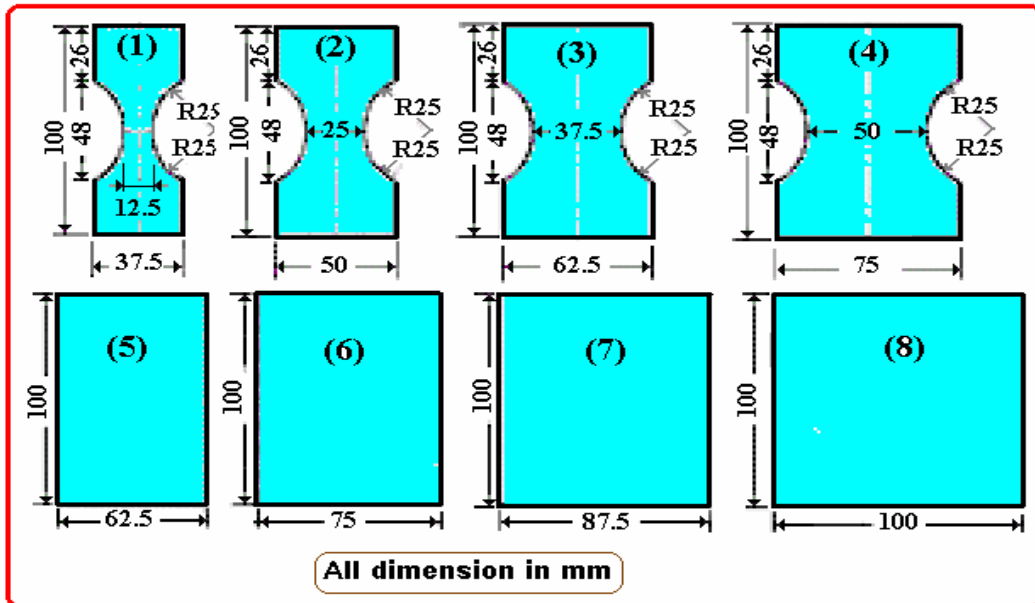


الشكل (7) صورة لنموذج المرحلة الاولى في عملية الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي بعد تشكيله بواسطة خرامة مسطحة

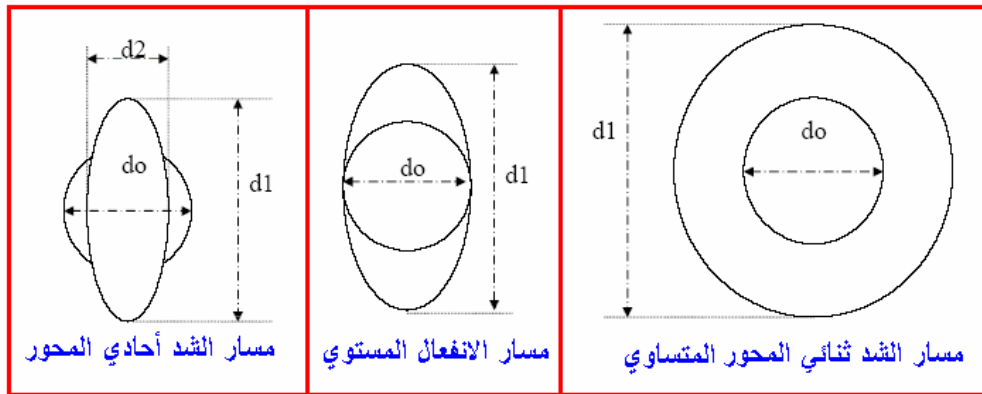


ب- تحضير النماذج المستخدمة في بناء منحنى حد التشكيل: بعد أن تم سحب الصفائح باتجاه الشد أحادي المحور إلى ثلاث مستويات من الانفعال تم تقطيع هذه الصفائح المعدنية إلى ثمانية نماذج ، لها نفس الطول (100mm) ، ومختلفة العرض (بعضها يحتوي على أقواس) لغرض الحصول على مسارات انفعال (Strain Paths) (أي من مسار الشد أحادي المحور) (uniaxial tension Path) إلى مسار المط ثنائي المحور المتساويين (equibiaxial stretching Path) مروراً بمسار الانفعال المستوي (plain strain Path) لكي تمثل منحنى حد التشكيل كاملاً أي من (مسار الشد أحادي المحور) إلى (مسار المط ثنائي المحور المتساوي) [22]. بعد تقطيع النماذج بواسطة مكانن التشغيل، تم تنعيم وصقل أطراف النماذج لكي تكون صفيحة ولا تحتوي على نتوءات وذلك لتجنب ظهور إجهادات مركزة تسبب الكسر المبكر في تلك المنطقة [2].

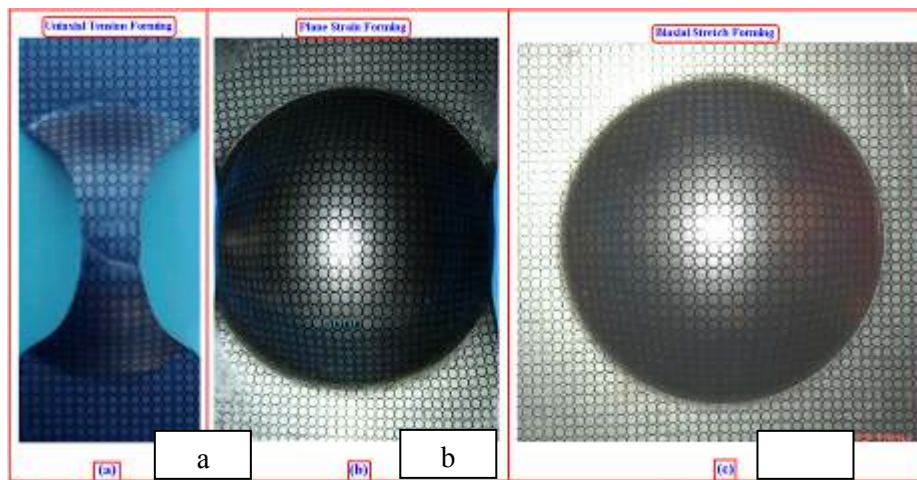
ج - تشكيل النماذج ورسم منحنى حد التشكيل: تم إجراء عملية كبس النماذج ( 1 إلى 8 كما في الشكل (8) ) بواسطة الخرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) باستخدام جهاز فحص الشد بعد تحويله إلى جهاز كبس كما في الشكل (4) ، وتم وضع النموذج على القالب ، حيث ربط بأحكام داخل القالب ، ووضعت الأجزاء (الخرامة والقالب وماسك الخرامة) على جهاز فحص الشد، ثم يبدأ بتشكيل النماذج بواسطة حركة الخرامة إلى داخل القالب بمعدل (20mm/min) ونلاحظ ارتفاع الحمل المسلط تدريجياً مع الاستطالة ، ويستمر إلى أن يصل الحمل إلى الحد الأقصى ثم ينخفض ، وفي لحظة الحمل يبدأ بالانخفاض ويتم إيقاف الخرامة حين يكون تعرض النموذج إلى التخصر أو الكسر، نلاحظ تغير أشكال النماذج بعد التشكيل. 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 أكبر وحسب النموذج كما في الشكل (9). يلاحظ في مسار الشد أحادي المحور (uniaxial tension) أن شكل الاهليلج يزداد بالطول ويقل بالعرض وكما في الشكل (10.a) والشكل (10.b) أستخدم لرسم مسار الانفعال قرب مسار الانفعال المستوي (Plane Strain) ، أما في الشكل (10.c) لتعيين مسار الانفعال قرب مسار المط ثنائي المحور المتساويين (Equibiaxial Stretching) فان الشكل يكون دائرياً أي الزيادة في الطول والعرض .



شكل (8) أشكال وأبعاد النماذج المستخدمة بالتشكيل لتعيين منحنى حد التشكيل



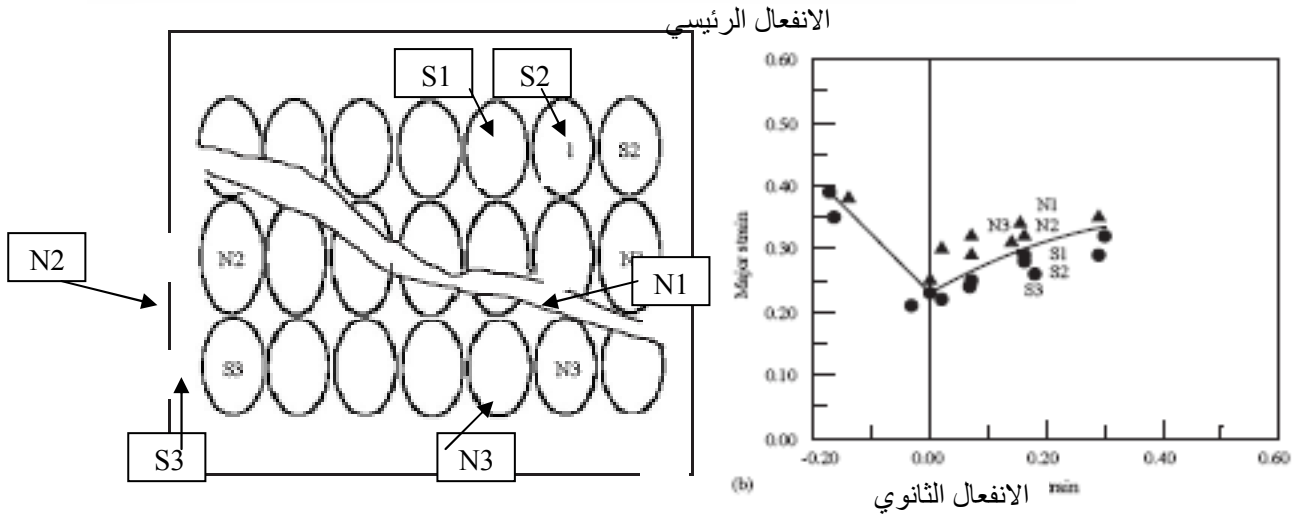
شكل(9) أشكال الدوائر و الأهليج المرسومة على الصفحة قبل وبعد التشكيل ولكل المسارات



شكل(10) صور للنماذج ( 8 , 5 , 1 ) بعد تشكيلها ولكل المسارات التشكيل

تم الاعتماد على تحديد حد الانفعال في المناطق القريبة من عدم الاستقرار (التخصر) باستخدام طريقة (Hecker 1972) [23] حيث ميز الباحث ثلاثة أنواع من الدوائر المشكلة، النوع الأول اهليج (Ellipse) متعرض إلى كسر (Fracture)، والنوع الثاني تعرض إلى تخرص (Necking) أو قريب من الكسر والنوع الثالث اهليج مقبول (Accepted Ellipse) بعيد عن منطقة الكسر أو التخصر، عند رسم خط يفصل بين النوع (الأول والثاني) من النوع (الثالث) فإن هذا الخط يمثل منحنى حد التشكيل عمليا أي أن النقاط أسفل الخط مقبولة (النوع الثالث)، أما النقاط أعلى الخط تمثل الفشل (النوع الأول والثاني) حيث أن هذا المنحنى يفصل بين منطقة الفشل ومنطقة القبول، والشكل (11) يبين تحليل الأشكال الاهليجية (Elliptical) للنموذج الحقيقي مع رسم جزء من منحنى حد التشكيل وحسب طريقة (Hecker). كذلك تم قياس الانفعال الرئيسي (اتجاه الدرفلة) والانفعال الثانوي (عمودي على اتجاه الدرفلة) 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 تخرص والمقبولة في النموذج. وبعد استخراج النتائج نستخدم العلاقات (1)&(2) [10] لحساب الانفعالين الحقيقي الرئيس والثانوي ولكل المسارات، وباستخدام تحليل (Hecker) وذلك لرسم منحنى حد التشكيل عمليا.

$$\epsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \dots \dots \dots ( 1 )$$

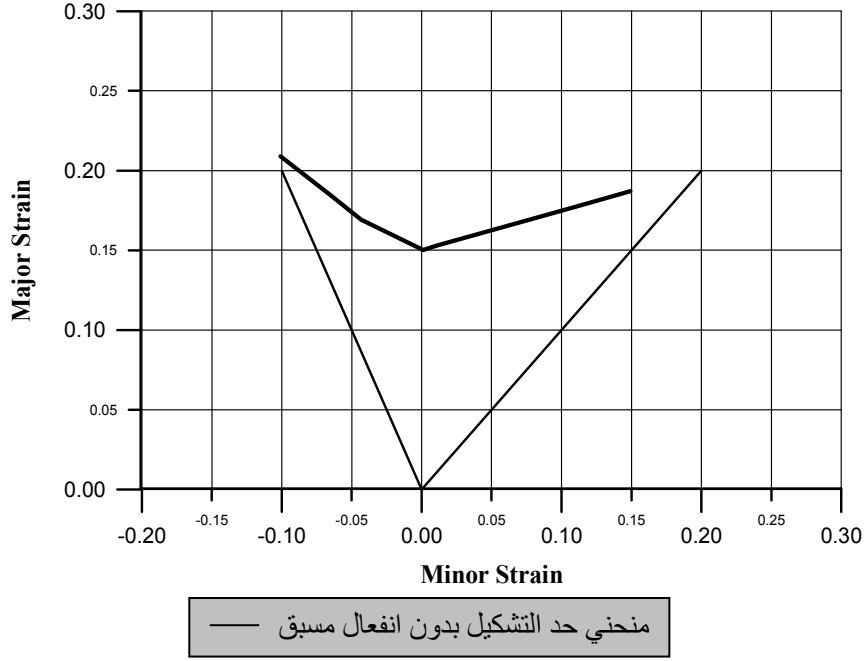


شكل (11) تحليل أشكال الاهليج بعد التشكيل مع رسم جزء من منحنى حد التشكيل بطريقة (Hecker) [10]

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 المشكولة التي استخدمت في الكثير من البحوث وفي هذه الدراسة تم استخدام المجهر المتنقل [20,24&25] لقياس أقطار الدوائر أو الاهليج، وهذه الطريقة أدق من الطرائق السابقة، حيث تبلغ دقتها (0.01mm). وتطبع الشبكة قبل إجراء الانفعال المسبق ومرة ثانية قبل الانفعال النهائي .

### النتائج ومناقشتها :

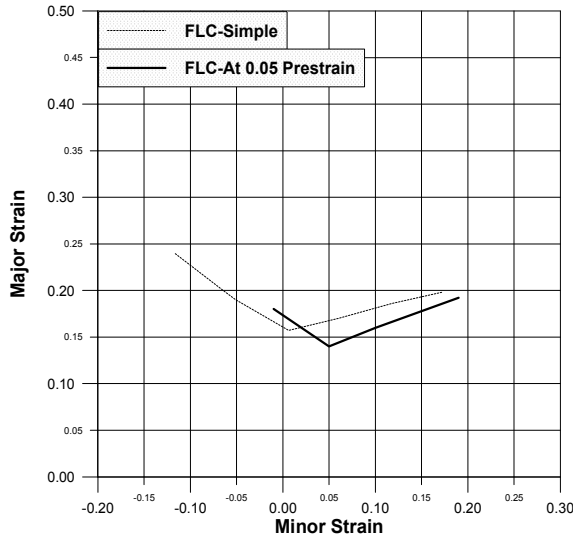
بعد إجراء عملية التشكيل تم تعيين حد التشكيل في كل نموذج من نماذج الصفحة المعدنية المستخدمة باستخدام طريقة (Hecker) [23] ، ومن جميع النماذج تم رسم منحنى حد التشكيل لصفائح سبيكة الألمنيوم وكما في الشكل (12) يتبين من هذا الشكل وجود قيم مختلفة للانفعالات ناتجة من عملية التشكيل حيث نلاحظ أن أعلى قيمة للانفعال الرئيسي 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 منحنى حد التشكيل ، بينما ظهرت له قيمة متوسطة باتجاه مسار المط 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) فقد ظهرت أعلى قيمة باتجاه مسار المط ثنائي المحور وأقل قيمة باتجاه مسار الشد أحادي المحور. ويعتبر الانفعال المسبق أحد العوامل المهمة المستخدمة في عمليات تشكيل الصفائح المعدنية ، حيث بعد إجراء عملية الانفعال المسبق للصفائح المعدنية المستخدمة ، تم تشكيل النماذج للصفائح المستخدمة وتعيين منحنى حد التشكيل للصفائح .



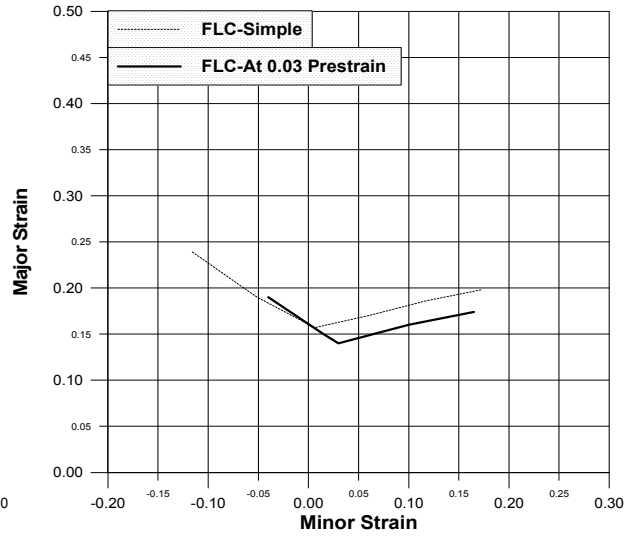
الشكل (12) مخطط حد التشكيل كما مستلم (AS-Received)

عند اجراء عملية التشكيل للصفائح المعدنية (المرحلة الثانية) والتي اجري عليها الانفعال المسبق (المرحلة الاولى) لوحظ أن منحني حد التشكيل سوف يكون بصورة عامة منخفضاً، إذ تتخفف قابلية التشكيل عند إجراء عملية الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور ومن ثم فإن مواصفات تشكيل الصفيحة سوف تتخفف. في هذه الدراسة كان الانفعال في المط ثنائي المحور في عدة مستويات من الانفعال موضحة في الجدول (2).

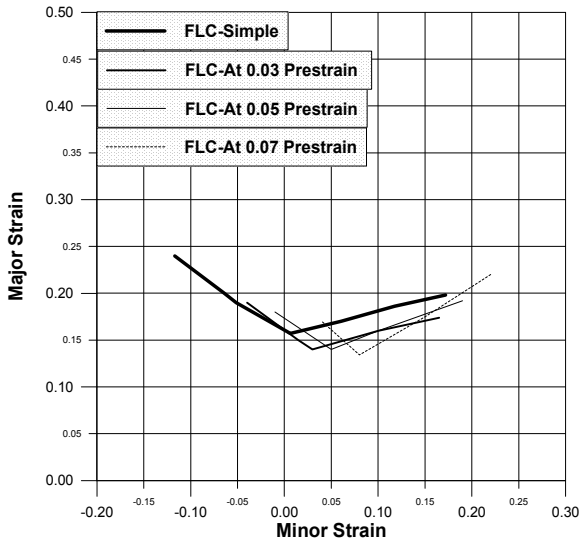
تم تحديد منحنيات حد التشكيل بعد إجراء عملية الانفعال المسبق للسبيكة كما مستلمة (As Received) في المط ثنائي المحور للصفائح المعدنية المستخدمة ومقارنته مع المنحني الأصلي (البسيط) وكما في الأشكال (13) و (14) و (15)، وبشكل عام وجد أن منحنيات حد التشكيل لكل الصفائح قد انخفضت، في جميع مسارات انفعال المنحني إذ كلما ازداد الانفعال المسبق المط ثنائي المحور المتساوي ازداد معدل الانخفاض في منحني حد التشكيل، حيث يلاحظ انخفاض الانفعال الرئيسي بصورة كبيرة باتجاه مسار الشد احادي المحور مقارنة بإنخفاضه باتجاه مسار المط ثنائي المحور المتساوي. ويعلل سبب نقصان حد التشكيل باتجاه مسار الشد احادي المحور أن الإصلاح الإنفعالي في المط ثنائي المحور هو أقل من الشد احادي المحور أو الانفعال المستوي وبناء على ذلك سوف يبدأ التشكيل بمعدل إصلاح أعلى مما يؤدي إلى تقليل الانخلاعات [4]. فضلاً عن ذلك فقد تبين أن مستوى حد التشكيل الذي يمتلكه اقل انفعال رئيس يتأثر بازدياد الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي إذ يزداد الانفعال الثانوي عند (مسار الانفعال المستوي) بهذه الزيادة للانفعال المسبق (أي يتحرك إلى اليمين) كما في الشكل (16). إن ظاهرة انخفاض المنحني في منطقة الانفعال المستوي تكون مضرّة بصورة كبيرة وذلك لكونها تستخدم في صناعة السيارات.



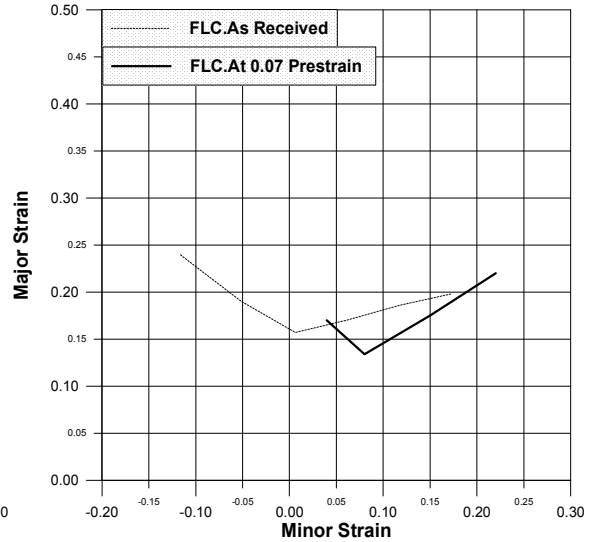
الشكل (14) تأثير عملية الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي والذي مقداره ( $\epsilon_1=0.05$ ) على منحنى حد التشكيل البسيط



الشكل (13) تأثير عملية الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي والذي مقداره ( $\epsilon_1=0.03$ ) على منحنى حد التشكيل البسيط



الشكل (16) تأثير زيادة الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي على مستوى حد التشكيل في منحنى حد التشكيل البسيط وذلك عند مستويات انفعال رئيس مختلفة



الشكل (15) تأثير عملية الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي والذي مقداره ( $\epsilon_1=0.07$ ) على منحنى حد التشكيل البسيط

### الاستنتاجات :

من خلال هذه الدراسة يمكن الخروج بالاستنتاجات الآتية :

- ١- كفاءة التشكيل التي ظهرت باستخدام خرامة نصف كروية ذات قطر (50mm) واستخدام ثمانية أشكال من النماذج ، حيث تم الحصول على مسارات انفعال اقرب إلى مسار الشد ثنائي المحور مقارنة بالبحوث السابقة .
- ٢- التغيرات في مسار الانفعال خلال التشكيل يمكن أن تنتج تغيرات مؤثرة في حدود التشكيل .

٣- يؤدي الانفعال المسبق دوراً مهماً و مؤثراً في رفع وخفض مستوى منحنى حد التشكيل وذلك حسب مسار الانفعال المسبق ، إذ كلما كان اتجاه مسار الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور استنتج أن منحنيات حد التشكيل عند كل مستويات الانفعال الرئيس الأكبر قد انخفضت، وفي جميع مسارات انفعال المنحني ولكن بصورة متفاوتة إذ يكون أكبر معدل للانخفاض باتجاه مسار المط ثنائي المحور المتساوي. أي أنه كلما ازداد الانفعال المسبق باتجاه مسار الانفعال الثنائي المتساوي ازداد معدل الانخفاض في منحنى حد التشكيل .

٤- الانفعال المسبق في هذه الدراسة بثلاثة مستويات من الانفعال الرئيس الأكبر، و كانت قيم الانفعال المسبق الرئيس الأكبر (0.03, 0.05, and 0.07)، ومن خلال ذلك تبين أن مستوى حد التشكيل الذي يمتلك اقل انفعال رئيس في هذا المنحني (النقطة الاوطأ في منحنى حد التشكيل) يتأثر بازدياد الانفعال المسبق في المط ثنائي المحور المتساوي إذ يزداد الانفعال الثانوي في هذه النقطة عند (مسار الانفعال المستوي) بهذه الزيادة للانفعال المسبق (أي تتحرك إلى اليمين).

#### 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. , " *Theoretical 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.Graf.A&Hosford.W.F, *The influence of strain path changes on forming limit diagrams of Al 6111T4*. *Int.J.Mech.* Vol. 36, No. 10, pp. 897-910, 1994.
- 6.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) .
- 7.Keeler.S.P,"Circular Grid System", A Valuable Aid For Evaluating Sheet Metal Formability," *Society of Automotive Engineers Technical Paper* ", no.680093 (1968).
- 8.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) .
9. 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).
10. Kim.K.J.,et al," *Formability of AA5182j/polypropylene/AA5182 sandwich sheets*",J.Mat.Proc.Tech.139, 1-7(2003).
- 11.Muschenborn W.& Sonee H.M."*Influence of the strain path on the forming limits of sheet metal*".Arch. Eisenhutt. 46,597(1975).
- 12.Laukois.J.V.&Ghosh A.K., "Anisotropic strain localization in tensile prestrained sheet steel.*Met*". Trans. 9A, 1849(1978).
- 13.Ranta-Escola A.J., "Effect of loading path on stress -strain relationships of steel sheet and brass.*Mater*". Technol. 45, (1980).
- 14.Schmittj Raphael-E.Raush J.H. & Marten P., *Plastic instability of Prestrained material, Computational Methods for predicting Materials Processing Defects*, p.309. Elsevier, Amsterdam(1987).
15. Marciniak, Z. ; Duncan, J.L., " *Mechanics of Sheet Metal Forming*", Butter worth-Heinemann ,2002.
16. Hosford.W.F.,Caddell.R.M., " *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*" .Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey,1983.
17. Hitchcock-Manthey,LLC.<http://www.surfacestrain.com> , USA.
18. Junior.E.H , <http://www.pdfactory.com> .
19. Chung S.Y., *Proc. Inst. Mech.*, vol.68, pp.195, 1951 .
- 20.Gupta.A.K, Kumar.D.R, "Formability of galvanized interstitial-free steel sheets"*Journal of Materials Processing Technology* 172, 225–237(2006).
21. Die Design Handbook. A.S.T.M.E., 11-13 and 26- (10-14), 1965 .

22. 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.
23. Hecker, S.S., "*Simple Technique for Determining Forming Limit Curves*", *Sheet Metal Industries*, pp. 671-676, 1972.
24. 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).
25. Date, P.P., Padmanabhan, K.A., "Deformation behavior of sheets of three aerospace Al-alloys", *J. Mat. Proc. Tech.* 139, 68-77 (2001).