

دراسة العوامل المؤثرة على تعيين منحنى حد التشكيل للصفائح المعدنية

د.وليد جلال علي
انس عبيد إدريس
قسم الهندسة الميكانيكية - جامعة الموصل / نينوى

الخلاصة

عمليات تشكيل الصفائح تعرف على أنها قابلية المعدن على تحمل التشويه اللدن (التشكيل بالمط) دون حدوث تخصر أو كسر ، لكي نسيطر على عملية تشكيل الصفائح دون حدوث فشل يتم استخدام مخطط يبين فيه مناطق التشكيل المقبولة ومناطق الفشل والمناطق الحرجة وهو مخطط حد التشكيل (Forming Limit Diagram) ، يعتبر مخطط حد التشكيل من الادوات والوسائل المهمة في تحديد قابلية تشكيل الصفائح المعدنية . لقد تم إنشاء منحنى حد التشكيل عمليا لكل من صفائح سبيكة الألمنيوم والصلب القليل الكربون والبراص ، وكذلك تم إنشاء منحنى حد التشكيل لكل من الصفائح المستخدمة بعد إجراء عوامل عديدة عليه ومنها عامل التزيت وعامل التلدين . أشارت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذا البحث الى أن منحنى حد التشكيل للبراص هو الأعلى ، بينما منحنى حد التشكيل للألمنيوم كأن الأقل ، كما أن العوامل المستخدمة في الجانب العملي كالتلدين والتزيت أدت الى رفع منحنى حد التشكيل لجميع الصفائح ولكن بمقادير مختلفة ، حيث أن التزيت أعطى زيادة أكبر في صفيحة البراص وأقل في صفيحة الصلب ثم الأقل في صفيحة الألمنيوم ، وكذلك وجد أن أعلى قيم لحدود الانفعال ظهرت في منحنى حد التشكيل باستخدام عملية التلدين والتزيت معا (أوسع في المنحنى) وخاصة في صفيحة البراص .

الكلمات الدالة

تشكيل الصفائح المعدنية ، منحنى حد التشكيل ، التشكيل بالمط

قائمة الرموز

الرمز	تعريفه	الوحدة	الرمز	تعريفه	الوحدة
S	الإجهاد الهندسي	MPa	F	قوة الشد	N
σ	الإجهاد الحقيقي	MPa	AO	مساحة المقطع الابتدائية	mm
e	الانفعال الهندسي		LO	طول النموذج القياسي	mm
ϵ	الانفعال الحقيقي		ΔL	التغير بالطول	mm
n	معامل الأصلا الانفعالي		m	معامل حساسية معدل الانفعال	
K	معامل المقاومة	MPa	R	معامل تباين الخواص	

المقدمة

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) [1] حيث قام الباحثان بتعيين حدود الانفعال في الجهة اليمنى من منحنى حد التشكيل عمليا أي أن (الانفعال الرئيس موجب والانفعال الثانوي موجب أيضا) وذلك عند استخدام تقنية التشكيل باستخدام خرامة (Punch) ذات أشكال مختلفة ، ويعتبر (Keeler) [2] أول من استخدم تقنية رسم الدوائر على الصفائح المعدنية وبطريقة الكهروكيميائية (electrochemically) حيث قام برسم دوائر بقطر (2.5mm) وذلك لحساب الانفعال على سطح الصفيحة .

بعدها قام الباحث (Goodwin 1968) [3] 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 واصبح يسمى منحني (Keeler-Goodwin) أو منحني حد التشكيل .

الباحثان (Veerman & Hartman 1971)[4] استخدموا بالتشكيل خرامة نصف كروية بقطر (75mm) ونماذج من الصفيحة ذات طول (166mm) ومختلفة العرض (40,70,90,166mm) ، ووجدوا أن النماذج المستخدمة أعطت نتائج لتعيين منحني حد التشكيل من مسار الشد أحادي المحور إلى مسار الشد ثنائي المحور ، أي أن نسبة الانفعال $(\rho = -0.5, 0.3)$ تقريبا ، أما الباحثان (Marciniak and Pokora 1973) [5] فقد استخدموا تقنية التشكيل باستخدام أربعة أنواع من الخرامات ، النوع الأول خرامة مسطحة (Flat Punch) دائرية المقطع ، والنوع الثاني خرامة اهليلجية (Elliptical Punch) ذات نسبة (1.35) ، والنوع الثالث خرامة إهليلجية ذات نسبة (1.7) ، والنوع الرابع خرامة مستطيلة الشكل (Rectangular Punch) ، حيث تم استخدام صفائح الألمنيوم والنحاس والصلب ، فقد وجد الباحثان أن الخرامات المستخدمة أعطت نتائج لتعيين منحني حد التشكيل من مسار الشد ثنائي المحور إلى مسار الانفعال المستوي ، وعند مقارنة المنحني العملي مع المنحني المعين نظريا بالنسبة للصلب فإن المنحنيين متقاربان عند مسار الشد ثنائي المحور ، أما بالنسبة للنحاس فإن المنحني النظري أعلى من المنحني العملي في مسار الشد ثنائي المحور وعندما يقترب من مسار الانفعال المستوي ينخفض المنحني النظري عن العملي ، أما بالنسبة للألمنيوم فإن المنحني النظري لا يقترب من المنحني المعين عمليا وخاصة في مسار الانفعال المستوي .

قام الباحث (Hecker 1977) [6] بحل المشاكل التي تصادف عمليات تشكيل الصفائح المعدنية واسعة التطبيق بالطرائق العملية 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 لغرض حساب منحنى حد التشكيل بكل مساراته عمليا ولصفائح معدنية كثيرة ، وهذه المنحنيات معتمدة في الكثير من البحوث الحديثة لغرض مقارنتها بالنتائج النظرية [7].

قام الباحثان (Tadros & Mellor 1977) [8] بدراسة منحنى حد التشكيل عمليا وذلك عن طريق إجراء التشكيل باستخدام ثلاثة أنواع من الخرامات المسطحة ، النوع الأول خرامة دائرية (Circular Punch) ، والنوع الثاني إهليلجي (Elliptical Punch) بنسبة (1.35) ، والنوع الثالث إهليلجي بنسبة (1.7) ، حيث وجد أن هذه الأنواع من الخرامات تعطي نتائج لحدود الانفعال في منحنى حد التشكيل من مسار الشد ثنائي المحور (biaxial stretching) إلى مسار الانفعال المستوي (Plain Strain) لصفائح الألمنيوم والصلب والبراص وعند مقارنة هذه النتائج مع نتائج المنحنى المعين نظريا، ظهر أن منحنى الصلب العملي مقارب إلى المنحنى النظري باستثناء ما كان باتجاه مسار الانفعال المستوي حيث لا يقترب المنحنيان ، أما بالنسبة للألمنيوم فإن المنحنى العملي غير مطابق للمنحنى النظري وبالنسبة للبراص فإن منحنى حدود الانفعال العملي مطابق للمنحنى النظري في الجهة اليمنى من منحنى حد التشكيل .

الباحثان (Kleemola and Kumpulainen 1980) [9] قاما باستحداث طريقة للتشكيل مستخدما خرامة مسطحة ذات قطر (100mm) ونماذج مستطيلة طولها متساو (150mm) وعرضها مختلف (80--150mm) ، وذلك لكي تغطي مسارات منحنى حد التشكيل ، فقد وجد أن هذه النماذج المستخدمة ذات كفاءة في تعيين مناطق تشكيل قريبة من مسار الانفعال المستوي أي أن نسبة الانفعال ($\rho = -0.3$) ، في منحنى حد التشكيل باستخدام التشكيل بالسحب لصفائح الألمنيوم والصلب، أما الباحث (Gronostajisk et al 1980) [10] فقد قام باستخدام نماذج دائرية ذات اقواس مختلفة في حافة الدائرة لإكمال مسارات المنحنى عند التشكيل باستخدام خرامة مسطحة (Flat Punch) وبقطر (101mm) ، وجد الباحث كفاءة النماذج الدائرية في

رسم منحنى حد التشكيل بكل مساراته لصفحة الألمنيوم عند مقارنته بالنتائج المعينة نظرياً بطريقة (Hutchinson and Neale 1978) ^[11].

بالنسبة للدراسات الحديثة قام الباحثان (Shakeri and Dariani 2000) ^[12] بالتشكيل باستخدام خرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) بقطر (90mm) لصفائح الصلب قليل الكربون والصلب المقاوم للصدأ والنماذج التي استخدمت هي دائرية ومستطيلة وذلك لتعيين منحنى حد التشكيل عملياً مع استخدام عامل التزييت ومقارنتها بالمنحنى المعين نظرياً باستخدام نظرية الخضوع (Hill 1948) ^[13] تحت شرط الإجهاد المستوي ، حيث وجد الباحثان تقارب النتائج للصلب والصلب المقاوم للصدأ (Stainless Steel) ، وكذلك قام الباحث (Kim et.al 2003) ^[14] 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 صفائح سبائك الألمنيوم ومقارنته مع صفائح تتكون من الألمنيوم والبوليمر (Sandwich) فقد وجد الباحث أن صفائح (Sandwich AL-Poly-AL) تعطي منحنى حد التشكيل أفضل من منحنى سبائك الألمنيوم ، حيث تم استخدام نفس قطر الخرامة في هذه الدراسة .

الجانب العملي

تعتبر عملية التشكيل بالمط (Stretch Forming) من العمليات المهمة والأساسية والنهائية في تشكيل الصفائح المعدنية ، تستخدم في هذه العملية خرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) وقالب (Die) ومثبت الخرامة (Blank Holder) ، توضع الصفائح المعدنية على القالب ثم تكبس بالخرامة أي عملية مط المادة فوق الخرامة بحيث تأخذ شكل الخرامة ، عملية التشكيل بالمط باستخدام قوة كبس كمط المادة فوق قالب التشكيل ، العملية هي نمو خارجي لمستويات المط للصفائح المعدنية ، فان تشوهاً كبيراً يمكن أن يحصل بهذه العملية بالمعادن ذات المطيلية المناسبة ^[15].

في الجانب العملي تم تصنيع خرامة قطرها (50mm) من معدن الصلب ذات صلادة (50HRC) مع قالب من الصلب صلادته (40HRC) وكذلك مثبت الخامة لتثبيت الصفيحة من نفس معدن القالب كما في الشكل (1) [14]، وهذه الأجزاء تم وضعها على جهاز فحص الشد بعد استخدامه كجهاز كبس .

تم اختيار أشكال النماذج للمعادن لتعطي رسماً كاملاً للمنحني وهي ثمانية نماذج لها نفس الطول ومختلفة العرض مع وجود أقواس [16]، وفي هذه الدراسة تم طبع شبكة (بطريقة السكرين الحريري) من الدوائر بقطر (2mm) على سطح الصفيحة المعدنية لقياس الانفعال الحقيقي بعد التشكيل .

يوضع النموذج من (الصفيحة المعدنية) على القالب، ويثبت بأحكام بوساطة مثبتت الخامة، ثم يتم الكبس بقوة تتراوح (10KN) بالنسبة للألمنيوم و(24KN) للبراص والصلب، يتم قياس الانفعال من خلال التشكيل الذي حدث بالدوائر المرسومة على المعدن باستخدام مجهر متنقل (Travelling Microscope) مخصص لقياس الأبعاد الدقيقة بدقة (0.01mm).

تم استخدام الصفائح المعدنية من سبيكة الألمنيوم والبراص والصلب القليل الكربون وبسمك (1mm) في هذا البحث بسبب قابليتها على التشكيل واستخدامها في بلدنا بكثرة وتوفرها بالأسواق المحلية، والجدول (1)، (2)، (3) تبيين التركيب الكيميائي للمعادن بعد فحصها في المعهد المتخصص في بغداد.

فحص الشد للمعادن المستخدمة

أن معظم الخواص الميكانيكية التي نحصل عليها من تجربة فحص الشد تمثل نموذجاً من الصفيحة المعدنية المراد تشكيلها، النموذج القياسي المستخدم بتجربة فحص الشد حسب قياسات (DIN) ولجميع الصفائح المستخدمة .
تم حساب الإجهاد الهندسي باستخدام العلاقة (1) .

$$S = \frac{F}{A_0} \dots \dots \dots (1)$$

وكذلك تم حساب الانفعال الهندسي باستخدام العلاقة (2) .

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \dots \dots \dots (2)$$

تم تحديد إجهاد الخضوع والإجهاد الأعظم والنسبة المئوية للاستطالة من منحنيات الإجهاد والانفعال الهندسي وكما في الجدول (4).

تم حساب الإجهاد الحقيقي والانفعال الحقيقي للصفائح المستخدمة بالتشكيل من الانفعال والإجهاد الهندسي باستخدام العلاقات الآتية (3)،(4).

$$\sigma = S(1 + e) \dots \dots \dots (3)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \dots \dots \dots (4)$$

تم رسم العلاقة بين الإجهاد الحقيقي والانفعال الحقيقي لكل نموذج من الصفائح المستخدمة ، أن منحنى الإجهاد-الانفعال الحقيقي يسمى منحنى الانسياب لأنه يعطي الإجهاد اللازم الذي يسبب انسياب المعدن بصورة لدنة لأي انفعال معطى ، لقد أجريت العديد من المحاولات لإيجاد المعادلات الرياضية التي تلائم هذا المنحنى والأكثر شيوعاً هي العلاقة الآتية (5) (Hollomon Equation) [17] .

$$\sigma = K\varepsilon^n \dots \dots \dots (5)$$

حيث أن (K) يمثل معامل المقاومة (Strength coefficient) تحسب قيمته من المنحنى أعلاه ، أما (n) يمثل معامل الأصلاد الانفعالي (Strain Hardening exponent) ويحسب من المنحنى أيضاً وكما في الجدول (5)، العلاقة (5) تستخدم فقط في مرحلة اللدونة أي منذ الانسياب اللدن حتى ما قبل الحمل الأقصى (Ultimate Load) عندما تبدأ العينة بالتخسر الموضعي [18] .

وبهذا يأخذ منحنى الأصلاد الانفعالي للألمنيوم الشكل حسب العلاقة (6a)

وللبيراص (6b) وللصلب (6c).

$$\sigma = 272.5\varepsilon^{0.2099} \dots \dots \dots (6a)$$

$$\sigma = 880.5\varepsilon^{0.3215} \dots \dots \dots (6b)$$

$$\sigma = 924.3\varepsilon^{0.2607} \dots \dots \dots (6c)$$

عند تصنيع الصفائح المعدنية سوف يلاحظ اختلاف الخواص بالصفحة عند فحص النموذج من هذه الصفحة بجهاز فحص الشد بكل الاتجاهات (باتجاه الدرفلة وعمودي على اتجاه الدرفلة وبزاوية (45°) عن اتجاه الدرفلة) ، المعادن المختلفة الخواص في الاتجاهات تحسب من خلال معامل تباين الخواص (R)، استخدمت نماذج (بنفس أبعاد نماذج فحص الشد) ولكن بإضافة تأشيريات على طول النموذج وذلك لحساب معدل قيمة (R) للنموذج ، حيث قطعت بزوايا ميل $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$ عن اتجاه الدرفلة (Rolling Direction) ، وتم إيجاد قيمة المعامل باستخدام العلاقة الآتية .

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \dots\dots\dots(7)$$

حيث أن (ε_w) يمثل الانفعال بالاتجاه العرضي و (ε_t) الانفعال باتجاه السمك ، بعد حساب معامل تباين الخواص لكل اتجاه (R_0, R_{45}, R_{90}) كما في الجدول (6) نلاحظ اختلافاً في قيم معامل تباين الخواص ، ولإيجاد معدل هذه القيم أستخدم العلاقة الآتية التي تسمى نسبة معامل تباين الخواص (normal plastic anisotropy ratio) والمتمثلة في العلاقة (8)، وكما في الجدول (6) .

$$R' = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \dots\dots\dots(8)$$

تم حساب قيمة معامل حساسية معدل الانفعال (m) بطريقة التغير المفاجئ^[18] ، باستخدام جهاز فحص الشد وذلك بتغيير سرعة ماسك النموذج وباستخدام العلاقة (9) التالية

$$m = \frac{\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{\log\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} \dots\dots\dots(9)$$

حيث أن (P1) يمثل الحمل المسلط قبل تغيير سرعة ماسك النموذج، و(P2) يمثل الحمل المسلط بعد تغيير السرعة. وكذلك (V1) السرعة الابتدائية لماسك النموذج، (V2) السرعة بعد التغيير .

تحضير النماذج المستخدمة في بناء منحنى حد التشكيل

تم تقطيع الصفائح المعدنية إلى ثمانية نماذج، لها نفس الطول (100mm)، ومختلفة العرض ذات أقواس لغرض الحصول على مسارات انفعال (Strain Paths) أي من مسار الشد أحادي المحور (unaxial tension) إلى مسار الشد ثنائي المحور المتساويين (equibiaxial stretching) مروراً بمسار الانفعال المستوي (plain strain) لكي تمثل منحنى حد التشكيل كاملاً أي من الجهة اليسرى (مسار الشد أحادي المحور) إلى الجهة اليمنى (مسار الشد ثنائي المحور). قسمت النماذج إلى نوعين، النوع الأول يتكون من أربعة نماذج لها نفس الطول (100mm) ومختلفة العرض (100mm، 87.5، 75، 62.5) كما في الشكل (2) التي تستخدم لرسم الجهة اليمنى لمنحنى حد التشكيل إلى ما قبل مسار الانفعال المستوي، أما النوع الثاني فيتكون من أربعة نماذج لها نفس الطول (100mm) ومختلفة العرض (75mm، 62.5، 50، 37.5) مع وجود أقواس نصف قطرها (25mm)^[16] بجانب كل نموذج وكما في الشكل (2) وهذا النوع يستخدم لرسم الجهة اليسرى من المنحنى أي من مسار الانفعال المستوي إلى مسار الشد أحادي المحور، بعد تقطيع النماذج بمكائن التشغيل، تم صقل أطراف النماذج لكي تكون صقيلة ولا تحتوي على نتوءات وذلك لتجنب ظهور إجهادات مركزة تسبب الكسر

المبكر في تلك المنطقة^[15]، بعد الانتهاء من عملية الصقل تتم طباعة الشبكة المؤلفة من دوائر بقطر (2mm) على سطح النماذج المعدنية من جهة واحدة وذلك لحساب الانفعال الحاصل بسطح النموذج بعد التشكيل .

طريقة الطباعة بالسكرين الحريري (Silk Screening)

- وهي من اسهل وارخص الطرائق وقد تم استخدامها بسبب توفرها في القطر، وهذه الطريقة تتكون من خطوات عديدة
- 1- رسم شبكة من الدوائر المتلاصقة بقطر (2mm) باستخدام برنامج للرسم الدقيق (Auto Cad 2000) في الكمبيوتر وطباعته على شفافية حرارية وبحجم (A4) .
 - 2- تطبع الشفافية على قطعة كبيرة من الحرير .
 - 3- تضاف مواد الطبع على قطعة الحرير .
 - 4- يتم تنظيف سطح الصفيحة المعدنية جيداً .
 - 5- بعدها يتم سحب النماذج أي الطباعة على سطح المعدن .
 - 6- تترك الصفائح لكي تجف .
 - 7- يتم قياس قطر الدوائر بعد الطبع للتأكد من دقتها .

عملية الكبس

يتم إجراء عملية كبس النماذج (1 الى 8 كما في الشكل (2)) بواسطة خرامة نصف كروية (Hemispherical Punch) باستخدام جهاز فحص الشد بعد تحويله إلى جهاز كبس، ويتم وضع النموذج على القالب، ويربط بأحكام داخل القالب ، وتوضع الأجزاء (الخرامة والقالب وماسك الخامة) على جهاز فحص الشد ، ثم نبدأ بتشكيل النماذج بواسطة حركة الخرامة إلى داخل القالب بمعدل (20mm/min) نلاحظ ارتفاع الحمل المسلط تدريجياً مع الاستطالة، ويستمر إلى أن يصل الحمل إلى الحد الأقصى ثم ينخفض ، لحظة الحمل يبدأ بالانخفاض يتم إيقاف الخرامة حيناً أذن النموذج قد تعرض إلى تخرس أو كسر، نلاحظ تغير أشكال النماذج بعد التشكيل .

تعاد عملية الكبس بحيث يتم تشكيل ثلاثة نماذج لكل مسار من المسارات المذكورة ،

الشكل (3) يبين صورة النماذج لصفيحة الصلب بعد التشكيل .

طريقة قياس الانفعال على سطح الصفيحة باستخدام المجهر المتنقل لقياس الأبعاد
التقنية المستخدمة على نحو واسع لقياس التغير في البعد الذي حصل بالدوائر المشكلة التي استخدمت في الكثير من البحوث وفي هذه الدراسة كذلك ، حيث يتم القياس بوضع النموذج تحت المجهر والبدء بقياس الأبعاد وذلك عن طريق تحريك النموذج بعد تكبيره من قبل المجهر ، وهذه الطريقة أدق من الطرائق السابقة ، حيث تبلغ دقتها (0.01mm) .

تشكيل النماذج ورسم منحنى حد التشكيل

بعد الانتهاء من عملية التشكيل ، تتغير الدوائر المطبوعة على النموذج إلى أشكال اهليلجية (Elliptic) أو دوائر ذات أقطار أكبر وحسب النموذج، ويلاحظ في مسار الشد أحادي المحور (uniaxial tension) أن شكل الاهليلج يزداد بالطول ويقل بالعرض كما في الشكل (4) وأما الشكل (5) يعطي مسار انفعال باتجاه مسار الانفعال المستوي وكذلك نلاحظ النموذج (8) يعطي مسار الانفعال باتجاه مسار الشد ثنائي المحور المتساوي (Equibiaxial Stretching) فان الشكل (6) يكون دائرياً أي الزيادة في الطول والعرض ، تم الاعتماد على طرائق تحديد حد الانفعال في المناطق القريبة من عدم الاستقرار (التخصر) باستخدام طريقة (Hecker 1975)^[19] حيث ميز الباحث ثلاثة أنواع من الدوائر المشكلة ، النوع الأول اهليلج (Ellipse) متعرض الى 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 منحنى حد التشكيل عملياً 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 (7) يبين تحليل الأشكال الاهليلجية (Elliptical) للنموذج الحقيقي مع رسم جزء من منحنى حد التشكيل وحسب طريقة (Hecker)^[19] .

تم قياس الانفعال الرئيس (اتجاه الدرفلة) والانفعال الثانوي (عمودي على اتجاه الدرفلة) الذي حدث بالدوائر نتيجة التشكيل بجهاز قياس الإحداثيات بعد تكبيرها باستخدام مجهر متنقل (Travelling microscope) ذي دقة (0.01mm) ، نختار الدوائر التي حدث بها كسر وتخصر والمقبولة في النموذج ، بعد استخراج النتائج نستخدم العلاقات (10)(11) [14] آلتية لحساب الانفعالين الحقيقي الرئيس والثانوي ولكل المسارات، وباستخدام تحليل (Hecker 1975) وذلك لرسم منحني حد التشكل عمليا .

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_o} \dots\dots\dots(10)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_o} \dots\dots\dots(11)$$

حيث أن

(do) : قطر الدوائر المطبوعة على سطح النماذج قبل عملية التشكيل

(d1) : القطر الرئيس للهليج (Ellipse) بعد التشكيل .

(d2) : القطر الثانوي للهليج (Ellipse) بعد التشكيل .

العوامل المستخدمة بالجانب العملي

1.التلدين لغرض إعادة التبلور:

عملية التلدين ضرورية في عملية التشكيل حيث إذا سخن المعدن المشكل على البارد مسبقا إلى ما فوق درجة حرارة معينة تسمى درجة حرارة إعادة التبلور (Recrystallisation Temp.) التي تحسب تقريبا من العلاقة (12) [22]، تتكون بلورات جديدة خالية من آثار التشكيل على البارد وتحرر المعدن من الحالة التي اجبر على التواجد فيها تحت وطأة التشكيل على البارد ، لذا فان المعدن سوف يستعيد خواصه الأصلية قبل التشكيل على البارد .

$$Tr = 0.4 Tm \text{ -----}(12)$$

(Tr): درجة حرارة إعادة التبلور.

(Tm): درجة انصهار المعدن المطلقة

درجة إعادة التبلور ليست درجة ثابتة بل تعتمد على عوامل عديدة ، من أهم هذه العوامل مقدار التشكيل على البارد المسبق والعناصر التي تضاف إلى المعدن وكذلك الشوائب.

والجدول (7) يبين درجات حرارة التلدين لكل معدن والزمن الذي يجري فيه تسخين القطعة وكذلك زمن مكوث القطعة بنفس درجة التلدين التي استخرجت من مصادر [20]، [21]، [22] وكذلك بعد إجراء تجارب عديدة للحصول على أفضل النتائج المختبرية للتخمير من حيث درجة الحرارة التسخين والوقت وإيجاد أفضل النتائج بالنسبة للتشكيل .

2. عامل التزيب

أن استخدام التزيب في عمليات تشكيل المعادن له تأثيرات عديدة في الجانب العملي ومن هذه التأثيرات هي لتقليل من سوفان العدد وكذلك التقليل الاحتكاك والحرارة والتآكل وكذلك يعطي سطحاً صقيلاً للمعادن المشكلة .

يعتبر عامل التزيب من العوامل المهمة في تشكيل الصفائح المعدنية على البارد وذلك مما يساعد على جعل الانفعال اكثر انتظاما ، ولدراسة هذا العامل فقد تم اختيار الشحم (C140 Oil) نوعاً من أنواع التزيب المستخدم ، وسبب اختيارنا لهذا الشحم (C140 Oil) يرجع إلى الباحث (ALBasseem) [23] حيث قام بدراسة تأثير التزيب على تشكيل الصفائح المعدنية، وقد استخدم أنواعاً عديدة من التزيب ، وقد خرج بنتيجة أن أفضل تزييب مستخدم هو (C140 Oil) ، بالإضافة إلى ذلك توفره بالأسواق المحلية .

النتائج والمناقشة

وبعد إجراء عملية التشكيل تم تعيين حد التشكيل في كل نموذج من نماذج الصفائح المستخدمة باستخدام طريقة (Hecker) [19] ، ومن جميع النماذج تم رسم

منحني حد التشكيل لصفائح الألمنيوم والبراص والصلب وكما في الشكل (8) يتبين من هذه الأشكال 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) فقد ظهرت أعلى قيمة باتجاه مسار الشد ثنائي المحور وأقل قيمة باتجاه مسار الشد أحادي المحور ، وهذه النتائج تتفق مع نتائج أغلب البحوث السابقة منها [4,6,10,12,24].

1. تأثير اختلاف معدن الصفيحة على قيم الانفعالات المتولدة من عملية التشكيل

عند إجراء المقارنة بين قيم الانفعالات في المنحنيات التي تم تحديدها عملياً كما في الشكل (8)، نلاحظ أن أعلى قيمة لحدود الانفعال الرئيس باتجاه مسار الشد أحادي المحور ظهرت في منحني حد التشكيل للبراص ، وأقل قيمة ظهرت له في منحني حد التشكيل للألمنيوم ، أما منحني حد التشكيل للصلب فكانت له قيمة متوسطة بين قيم المعدنين ، أما بالنسبة للانفعال الرئيس عند مسار الانفعال المستوي (المسار الحرج) نلاحظ نفس الترتيب السابق ولكن بقيم مختلفة ، وكذلك وجد أن أعلى قيمة للانفعال الرئيس باتجاه مسار الشد ثنائي المحور ظهرت في منحني حد التشكيل للبراص ، وأقل قيمة له في الألمنيوم ، ومتوسط القيم في الصلب ، وكذلك نلاحظ أعلى قيمة للانفعال الثانوي باتجاه مسار الشد ثنائي المحور ظهرت في منحني حد التشكيل للبراص ، وأقل في الألمنيوم ، ومتوسط القيم في الصلب . ولتعزيز عملية تحليل النتائج نلاحظ في الشكل (8) ميل الجهة اليمنى من منحني حد التشكيل للصفائح كافة (من مسار الانفعال المستوي إلى مسار الشد ثنائي المحور) مختلف ، كون أن الميل يعطي فرقاً واضحاً بين المسارات بالنسبة لارتفاع الانفعال الرئيس ، حيث أن الصفائح يمكن ترتيبها من حيث قيم الميل (Slop) في المنحني ، ميل الجهة اليمنى من

منحني الصلب أعلى من ميل كل من منحنيات الألمنيوم والبراص ، بينما ميل منحني البراص أقل من ميل جميع المنحنيات. من النتائج العملية ظهر أن منحني حد التشكيل للبراص أعلى من كل من منحنيات حد التشكيل للصلب والألمنيوم بكل مساراته ، مما يدل أن قابلية تشكيل البراص أعلى من قابلية تشكيل كل من الصلب والألمنيوم أي أن مطيلية البراص أكبر من مطيلية الصلب والألمنيوم ، كما أن قيمة معامل الأصداد الانفعالي للبراص أكبر من قيمة كل من الصلب والألمنيوم ، وهذا ما تؤكدته كثير من البحوث على أنه كلما ارتفعت قيمة معامل الأصداد الانفعالي يؤدي الى ارتفاع منحني حد التشكيل بكل مساراته ^[25] . ولكن بالنسبة لقيمة معامل تباين الخواص ظهرت قيمة معامل تباين الخواص للألمنيوم المستخدم أقل من معامل تباين الخواص للصلب والبراص وهذا خلاف ما أكده الباحثان (Parmar and Mellor) ^[26] من حيث أنه كلما انخفضت قيمة معامل تباين الخواص أدت الى ارتفاع الجهة اليمنى لمنحني حد التشكيل نظريا ، أما الباحثان (Woodthorpe and Pease) ^[27] فقد أكدوا أن قيمة معامل تباين الخواص لا تؤثر على الجهة اليمنى من منحني حد التشكيل المعين عمليا ، وكذلك نلاحظ أن منحني حد التشكيل للبراص أعلى من منحني حد التشكيل لكل من الصلب والألمنيوم حيث أن قيمة معامل حساسية معدل الانفعال للصلب أعلى من كل من البراص والألمنيوم من الجدول (6) ، وعلى الرغم كون هذا يخالف ما أكدته ^[25] أنه كلما ارتفعت قيمة معامل حساسية معدل الانفعال يؤدي الى ارتفاع منحني حد التشكيل بكل مساراته نظريا ، ولكن يبدو أن تأثيره على منحني حد التشكيل ثانوي مقارنة بتأثير معامل الأصداد الانفعالي [n] (أي أن دور معامل حساسية معدل الانفعال غير فعال في الجانب العملي) .

عند مقارنة المنحنيات التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة مع منحنيات العملية للباحثين (Graf and Hosferd 1990) ^[28] التي تم تعيينها في الجهة اليمنى من المنحني ، فقد وجدنا أن منحني حد التشكيل للصلب المستخدم مقارنة الى منحني حد التشكيل للصلب (AKSteel) المعين عمليا من قبل الباحثين باتجاه مسار الشد ثنائي المحور ومسار الانفعال المستوي ، حيث أن قيم معامل الأصداد الانفعالي ومعامل حساسية معدل الانفعال مقارنة لقيم الصلب المستخدم ، أما بالنسبة للبراص

فأن ميل الجهة اليمنى من منحنى البراص المستخدم أعلى بقليل من ميل منحنى البراص المعين عمليا من قبل الباحثين وأقل عند مسار الانفعال المستوي من منحنى البراص للباحثين وهذا الاختلاف سببه أن البراص المستخدم من قبل الباحثين ذات نسبة زنك (30%) وكذلك له قيمة معامل أصلا انفعالي (0.47) أعلى من قيمة معامل الأصلا للبراص المستخدم في هذه الدراسة ، أما عند المقارنة بالنسبة لمنحنى الألمنيوم كانت النتائج مختلفة .

2. تأثير عملية التزيت على منحنى حد التشكيل

لدراسة تأثير التزيت على منحنى حد التشكيل ، تم استخدام الشحم (C 140 Oil) في أثناء عملية تشكيل الصفائح المعدنية المستخدمة ومقارنته مع الظروف الأخرى للعمل .

تم تحديد منحنيات حد التشكيل عمليا باستخدام التزيت لكل من الألمنيوم والبراص والصلب ، والأشكال (9)،(10)،(11) تبين منحنيات حد التشكيل للصفائح المستخدمة باستخدام التزيت ومقارنته مع المنحنيات الأصلية (بدون استخدام تزييت)، حيث يلاحظ بصورة عامة أن الجهة اليمنى من منحنيات حد التشكيل لكل الصفائح المستخدمة ارتفعت باتجاه مسار الشد ثنائي المحور أعلى من الجهة اليسرى من المنحنى باتجاه مسار الشد أحادي المحور ، وهذا يعزى إلى أن مساحة الاحتكاك للنماذج في الجهة اليسرى أقل من مساحة الاحتكاك للنماذج في الجهة اليمنى من المنحنى ، وهذا يظهر بوضوح عند اقتراب منحنى حد التشكيل باستخدام التزيت من منحنى حد التشكيل الأصلي في مسار الشد أحادي المحور .

أن عامل الاحتكاك مهم جدا في عمليات تشكيل الصفائح ، حيث يؤثر الاحتكاك على توزيع الانفعال في الصفيحة في أثناء التشكيل^[18] وكذلك في عملية التشكيل بالمط حيث تتعرض منطقتان للاحتكاك وهي منطقة بين القالب والنموذج ومنطقة بين الخرامة والنموذج ، بالنسبة للمنطقة الأولى تكون نافعة بسبب كونها تمنع النموذج من الزحف في أثناء التشكيل ، أما المنطقة الثانية فتتعرض إلى التركيز بالاجهادات مما يؤدي إلى الفشل المبكر ، أي أن الاحتكاك يقاوم عملية التشكيل ولهذا يتم تزييت

المنطقة بين الخرامة والنموذج والشكل (12) يبين الفرق بين النموذجين لصفائح الألمنيوم بعد التشكيل باستخدام التزبييت وبدون التزبييت حيث يظهر النموذج باستخدام التزبييت أن التخصر قد حصل في موقع أقرب من قمة النموذج مع فرق في ارتفاع النموذج مقارنة بالنموذج دون تزبييت ، وكذلك نلاحظ في النموذج المشكل دون تزبييت أن التخصر ظهر بعيداً عن مركز النموذج وهذا يتفق مع الباحثين (Marciniak and Duncan)^[18] حيث درسا تأثير الاحتكاك وعدمه على منحنى حد التشكيل من خلال التشكيل باستخدام خرامة نصف كروية وخرامة مسطحة ، ووجدوا أن استخدام التزبييت أدى إلى زيادة الترقيق وخاصة باتجاه مسار الشد ثنائي المحور .

بشكل عام يمكن القول بأن التشكيل باستخدام التزبييت قد أعطى نتائج أفضل (أدى إلى زيادة كل من الانفعالات ϵ_1, ϵ_2) من ظروف التشكيل الجاف وخاصة في منحنى حد التشكيل للبراص وهذا ما يتفق مع نتائج الباحثين (Gronostajski et.al)^[30] أيضا الذين درسوا تأثير طبقة البلاستيك كعامل لتقليل تأثير الاحتكاك على منحنى حد التشكيل ، بالإضافة إلى ذلك أن من فوائد استخدام التزبييت في عمليات التشكيل يعطي سطوحاً صقيلة بعد التشكيل، ويقلل كل من الحرارة المتولدة في أثناء التشكيل والتآكل الذي يحدث في العدد المستخدمة .

نلاحظ عند مقارنة منحنى حد التشكيل للصلب المستخدم مع منحنى الصلب المعين عمليا من قبل الباحثين (Shakeri and Dariani 2000)^[12] حيث استخدمنا صلب منخفض الكربون (DIN 1623) مع استخدام التزبييت في أثناء التشكيل ، فقد وجدنا أن منحنى حد التشكيل للصلب المستخدم في الدراسة مقارب الى منحنى حد التشكيل للصلب للباحثين عند مسار الشد ثنائي المحور ومسار الانفعال المستوي ، أما باتجاه مسار الشد أحادي المحور فقد ظهر أن المنحنى المعين من قبل الباحثين أعلى بقليل من منحنى حد التشكيل للصلب المستخدم.

وكذلك عند مقارنة منحنى البراص المستخدم مع منحنى البراص المعين من قبل الباحثين (Dariani and Azodi 2003)^[24] (Brass 70B)، فقد لوحظ عدم تطابق المنحنيات وذلك بسبب اختلاف معامل الأصلا الانفعالي للبراص المستخدم (0.3215) عن معامل أصلا الانفعالي للبراص المستخدم من قبل الباحثين (0.25) ،

حيث أدت هذه النتائج الى انخفاض منحني البراص المستخدم من قبل الباحثين عن منحني البراص العملي باستخدام التزبييت في هذه الدراسة.

3. تأثير عملية التلدين على منحني حد التشكيل

يعتبر التلدين أحد العوامل المهمة المستخدمة في عمليات تشكيل الصفائح المعدنية ، حيث بعد إجراء عملية التلدين للصفائح المعدنية المستخدمة وحسب الجدول (7) الذي يبين درجات حرارة التلدين والوقت ، تم تشكيل النماذج للصفائح المستخدمة وتعيين منحني حد التشكيل للصفائح .

عند إجراء عملية التشكيل للصفائح المعدنية غير المعاملة بالتلدين فان الكسر يحدث بسرعة ومنحني حد التشكيل سوف يكون منخفضاً ، تتحسن قابلية التشكيل بعد إجراء عملية التلدين أي تصبح الصفيحة ذات مواصفات تشكيل مرتفعة.

تم تحديد منحنيات حد التشكيل عمليا بعد إجراء عملية التلدين لكل من صفائح الألمنيوم والبراص والصلب ومقارنته مع المنحنيات الأصلية (غير المعالجة) وكما في الأشكال (13) و(14) و(15) ، تبين الفرق بين منحني حد التشكيل بعد إجراء التلدين ومنحني حد التشكيل الأصلي ، حيث نلاحظ بصورة عامة أن منحنيات حد التشكيل لكل الصفائح ارتفعت في الجهة اليسرى من المنحني باتجاه مسار الشد أحادي المحور اكثر بقليل من الجهة اليمنى من المنحني باتجاه مسار الشد ثنائي المحور .

عند إجراء المقارنة للانفعال الرئيس في المنحنيات التي تم تحديدها عمليا باستخدام التلدين ، نلاحظ أن أعلى قيمة لحدود الانفعال الرئيس ظهرت في منحني حد التشكيل للبراص باتجاه مسار الشد أحادي المحور وكذلك أقل بالنسبة لمنحني الألمنيوم ، أما منحني حد التشكيل للصلب فأن الانفعال الرئيس باتجاه مسار الشد أحادي المحور ظهر متوسط القيم ، أما في مسار الانفعال المستوي ومسار الشد ثنائي المحور أعطت نفس ترتيب الصفائح في مسار الشد أحادي المحور ، وكذلك الانفعال الثانوي أعلى قيمة ظهرت باتجاه الشد ثنائي المحور في منحني حد التشكيل للبراص وأقل بالنسبة للألمنيوم والصلب متوسط القيم .

وبشكل عام يمكن القول بأن التشكيل باستخدام عملية التلدين قد أعطى نتائج أفضل من ظروف التشكيل الجاف والتشكيل باستخدام التزيبت للنماذج قبل التلدين ، كما وجد أن منحنى حد التشكيل للبراص قد أعطى حدود انفعال أعلى بالنسبة لمنحنيات الصلب والألمنيوم وذلك بسبب أن البراص المستخدم ذات نسبة زنك تقريبا (26%) وهذه النسبة ذات مطيلية عالية ،وعند إجراء عملية التلدين أدت إلى ارتفاع المطيلية أي قابلية تشكيل أعلى مما هي عليه قبل عملية التلدين .

4. تأثير عمليتي التلدين والتزيبت معا على منحنى حد التشكيل

بعد إجراء عملية التلدين للصفائح المعدنية المستخدمة ، نبدأ بالتشكيل بالمط (Stretch Forming) للصفائح المستخدمة وباستخدام التزيبت بالشحم (C140 Oil) أي استخدام العاملين معا (التلدين والتزيبت) ، تم تحديد منحنيات حد التشكيل عمليا باستخدام عملية التلدين ثم التزيبت لكل من صفائح الألمنيوم والصلب والبراص وكما في الاشكال (16) و (17) و (18) تبين المقارنة بين منحنيات التشكيل باستخدام التزيبت والتلدين ومنحنيات التشكيل باستخدام التلدين فقط (أي تم التشكيل دون تزيبت) بشكل عام نلاحظ أن منحنيات حد التشكيل باستخدام التلدين والتزيبت ارتفعت في الجهة اليمنى من المنحني باتجاه مسار الشد ثنائي المحور أعلى من الجهة اليسرى من المنحني باتجاه مسار الشد أحادي المحور، كذلك نلاحظ تقارباً شديداً للمنحنيات باتجاه مسار الشد أحادي المحور ويعزى ذلك كما ذكر سابقا ربما إلى زيادة مساحة التماس مع الخرامة.

عند إجراء المقارنة بين كل المنحنيات التي تم تعيينها عمليا للصفائح المستخدمة ، وجد أن أفضل منحنى حد تشكيل تم الحصول عليه (ذات قابلية تشكيل عالية) هي المنحنيات التي أجريت عليها عملية التلدين ثم التزيبت ، وكذلك وجد أن منحنى حد تشكيل البراص أعطى أعلى حدود للتشكيل في منحنى حد التشكيل مقارنة بالمنحنيات الأخرى .

المصادر

- 1) Keeler S.P. and Backofen W.A., (1963) Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches, Transactions of The ASM ,Vol. 56, 25-48.
- 2) Keeler.S.P(1968),”Circular Grid System”, A Valuable Aid For Evaluating Sheet Metal Formability,” Society of Automotive Engineers Technical Paper ,no.680093.
- 3) Goodwin, G.M. (1968), Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, Society of Automotive Engineers, technical paper no. 680093 .
- 4) Veerman ,C.C., Hartman ,L.Peels,J.J(1971),” Determination of Appearing Strains and Admissible Strain in cold reduced sheets”, Sheet metal Industrial, Vol.98,pp678-680.
- 5) Marciniak, Z., Kuczynski, K. and Pokra, T., (1973),” Influence of The Plastic Properties of A Material On The Forming Limit Diagram For Sheet Metal In Tension”, Int. J. Mech. Sci., vol. 15, pp. 789-805.
- 6) Hecker.S.S. (1977)., Experimental studies of sheet stretchability. Proc. of Symp. on Formability Analysis— Modeling and E.,cperimentation, Chicago, IL, p. 150.
- 7) Padwal, S.B. and Chaturvedi, R.C. (1992), Prediction of Forming Limits Using Hosford's Modified Yield Criterion, Int. J. Mech. Sci. vol. 34, No. 7, pp. 541-547 .

- 8) Tadros.A.K and Mellor. P.B.(1978),” An Experimental Study of the In-Plane Stretching of sheet metal , International Journal Mechanical Sciences, Vol.20,pp.121-134.
- 9) Kleemola H.J. and Kumpulainen J.O. (1980), Factors Influencing the Forming Limit Diagram: Part I-The Experimental Determination of the Forming Limits of Sheet Steel. Journal of Mechanical Working Technology, vol. 3, pp. 289-302.
- 10) Gronostajski, J. and Dolny, A. (1980), Determination of Forming Limit Curves by Means of Marciniak Punch, Memories Scientifiques revue metallurgic, pp. 570-578 .
- 11) Hutchinson, J.W. and Neale, K.W., and Needleman, A. (1978a), Sheet Necking-II. Time-Independent Behavior, in Mechanics of Sheet Metal Forming, eds. D.P. Koistinen and N.M. Wang, Plentim. New York, pp. 111-126.
- 12) Shakeri.M,A.Sadough and B.M.Dariani (2000) ,”Theoretical and Experimental analysis of sheet metal formability limits”,Rev.Metall.CIT Sci.Genie mater.,663-670.
- 13) Hill,R.(1948)”A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic materials. Proceedings of Royal society of London 1948 : A193:281-97.

- 14) Kim,K.J;Choi,S.H.(2003),” Formability of AA5182/polypropylene/AA5182 Sandwich sheets , Journal of Materials Processing Technology 139, 1-7.
- 15) Dieter,G.E.(1981),Mechanical Metallurgy, Second Edition ,McGraw-Hill Kogakusha.
- 16) Hitchcock-
Manthey,LLC.<http://www.surfacestrain.com>USA.
- 17) Wagoner.R.H., Chan.K.S, Keeler.S.P(1989), ”Forming limit Diagrams: Concepts , Methods ,and Applications”, Minerals, Metals and Materials Society 420 Commonwealth Drive , Warrendale , Pennsylvania 15086 , (412)776-9024.
- 18) Marciniak, Z. ; Duncan, J.L.(2002). Mechanics of Sheet Metal Forming . Butter worth-Heinemann .
- 19) Hecker, S.S., (1975b) Simple Technique for Determining Forming Limit Curves. Sheet Metal Industries, pp. 671, 676.
- 20) Higgins,R.A.(1984),Engineering Metallurgy, part one, Great Britain for Hodder and Stoughton Educational ,
- 21) Higgins,R.A.(1976), Engineering Metallurgy, part two, Great Britain for Hodder and Stoughton Educational ,
- 22) Lakhtin, YU.M.(1979)Engineering Physical Metallurgy and Heat Treatment ‘ ” MIR Publishers Moscow.
- 23) AL Bassam F.A.(1983),” Study of the Effect of Some Parameters on Deep Drawing Process,Msc., Production

Engineering and Metallurgy, University of Technology, PP.2-12.

- 24) Dariani.B.M. and Azodi.H.D.(2003) ,”Finding the optimum Hill index in the determination of the forming limit diagram”, Journal of Engineering Manufacture .Vol.217.pp.1677-1683 .
- 25) Grootenboer.H.J.,Huetink.H.J.(2002)“ Thermally Enhanced Forming of Aluminium Sheet Modelling and Experiments”,A.H.Van den Boogaard ,Hengelo,the Nether Lands,PP.83-87.
- 26) Parmar, A. and Mellor, P.B. (1978), Predictions of Limit Strains in Sheet Metal Using A More General Yield Criterion, Int. J. Mech. Sci., vol. 20, pp. 385-391.
Woodthorpe.J.and Pearce R.(1969), Sheet metal Indust.46,1061.
- 27) Graf, A. and Hosford, W.F. (1990), Calculations of forming limit diagrams. Metall. Trans. vol. 21A, pp. 87-96.
- 28) Gronostajski.J.Z.,Ali.W.J.,Gattas.M.S(1986)
”Advanced Technology of plasticity“, Vol.1,pp423-428,Speringer Verlag.
- 29) Hosford.W.F. ; Caddell.R.M.,(1983).Metal Forming Mechanics and Metallurgy .Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey .

الجدول (1) التحليل الكيميائي لصفحة الألمنيوم

Material	Sn%	Ni%	Ti%	Cr%	Zn%	
Aluminum	0.001	0.0006	0.016	0.009	0.027	
Material	Mg%	Mn%	Cu%	Fe%	Si%	Al%
Aluminum	0.01	0.015	0.15	0.58	0.38	Rem.

الجدول (2) التحليل الكيميائي لصفحة الصلب

Material	Cu%	Mo%	Ni%	Cr%	S%
Mild Steel	0.04	0.007	0.03	0.04	0.011
Material	P%	Si%	Mn%	C%	Fe%
Mild Steel	0.004	0.022	0.35	0.21	Rem.

الجدول (3) التحليل الكيميائي لصفحة البراص

Material	Cu%	Mn%	Pb%	Fe%	Zn%
α Brass	Rem.	0.001	0.001	0.19	26.2

الجدول (4) الخواص الميكانيكية للصفائح باستخدام فحص الشد

Material	Proof Stress (Mpa)	Ultimate stress (Mpa)	Elongation(%)
Aluminum	80	178	9.21
Mild Steel	430	570	27.63
α Brass	400	540	35.53

الجدول (5) يبين معامل الأصداد الانفعالي (n) ومعامل المقاومة (K) لكل من الألمنيوم والصلب والبراص

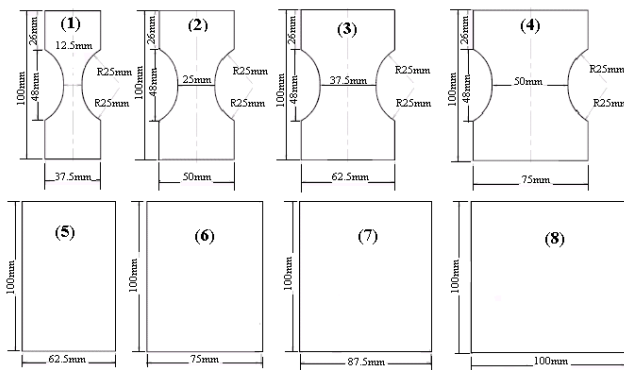
Material	Angle between specimens axis and Rolling direction	Number of specimens	Mean of Strain Hardening exponent (n)	Mean of Strength Coefficient (K) [Mpa]
Aluminum	0°	3	0.2099	272.5
	45°	3		
	90°	3		
Mild Steel	0°	3	0.2607	924.3
	45°	3		
	90°	3		
α Brass	0°	3	0.3215	880.5
	45°	3		
	90°	3		

الجدول (6) يبين قيم معامل تباين الخواص (R) ومعدل معامل تباين الخواص (R') ومعامل حساسية معدل الانفعال (m) للصفائح المستخدمة في هذه الدراسة .

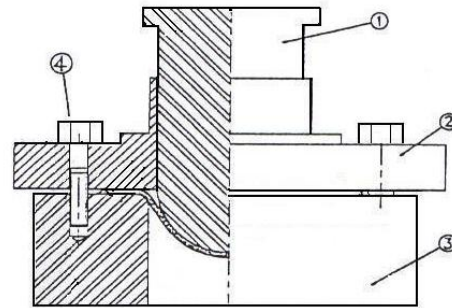
Material	Angle between specimens axis and Rolling direction	Number of specimens	Mean value of (R)	Normal plastic Anisotropic ratio (R')	Strain rate Sensitivity (m)
Aluminum	0°	3	1.1021	0.82608	0.001
	45°	3	0.6505		
	90°	3	0.9012		
Mild Steel	0°	3	1.7511	1.4493	0.016
	45°	3	1.2521		
	90°	3	1.5419		
α Brass	0°	3	1.2214	0.9301	0.005
	45°	3	0.7654		
	90°	3	0.9682		

الجدول (7) يبين درجات حرارة التلدين مع الزمن لجميع الصفائح المعدنية المستخدمة

المعادن	درجة حرارة التلدين (°م)	زمن تسخين الصفحة (دقيقة)	زمن مكوث الصفحة بنفس درجة التلدين (دقيقة)
الألمنيوم	275	13	11
البراص	558	22	25
الصلب	675	26	15



شكل (2) يبين أشكال النماذج المستخدمة

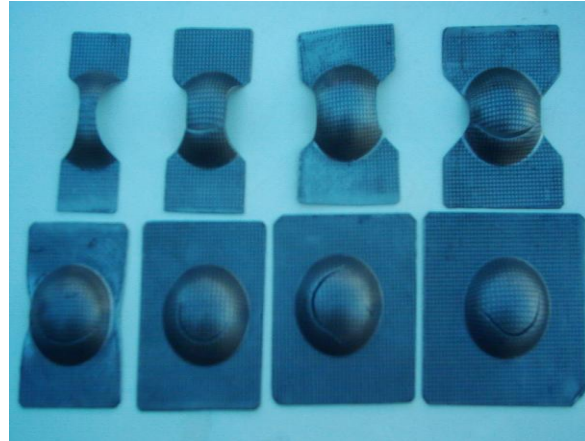


4	10	BOLT M17	STEEL
3	1	DIE	STEEL
2	1	BLANKHOLDER	STEEL
1	1	PUNCH	STEEL
NO. QTY		NAME	MAT.

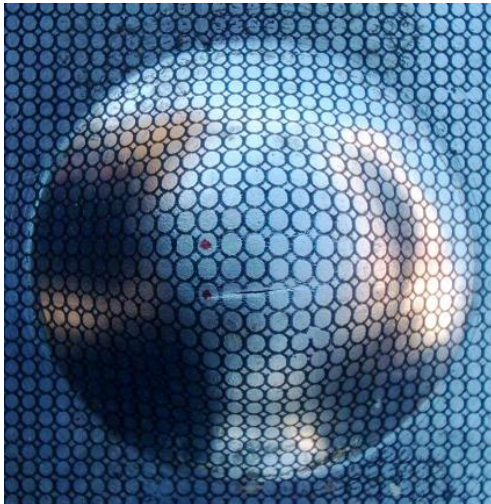
شكل (1) يمثل الخرامة مع القالب وماسك الخرامة



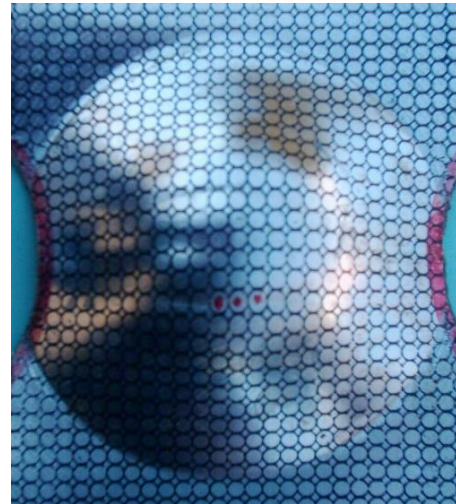
شكل(4) نموذج (1) من البراص بعد التشكيل



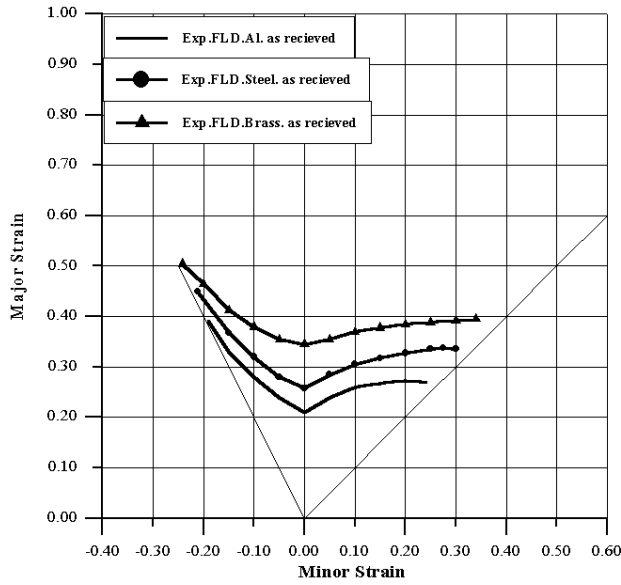
شكل(3) نماذج من الصلب بعد التشكيل



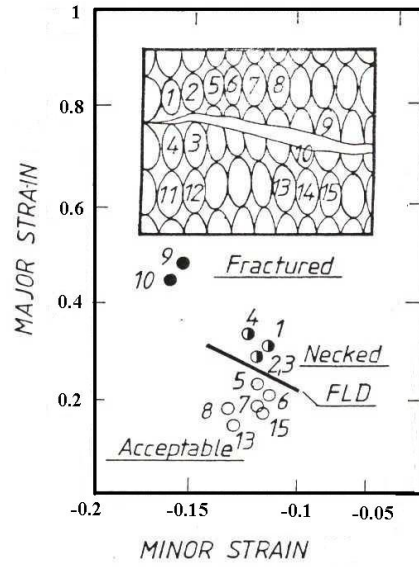
شكل(6) النموذج (8) من الألمنيوم بعد التشكيل



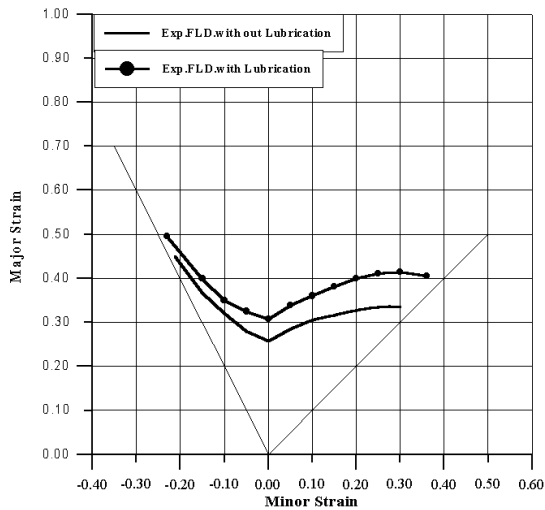
شكل(5) النموذج (4) من الألمنيوم بعد التشكيل



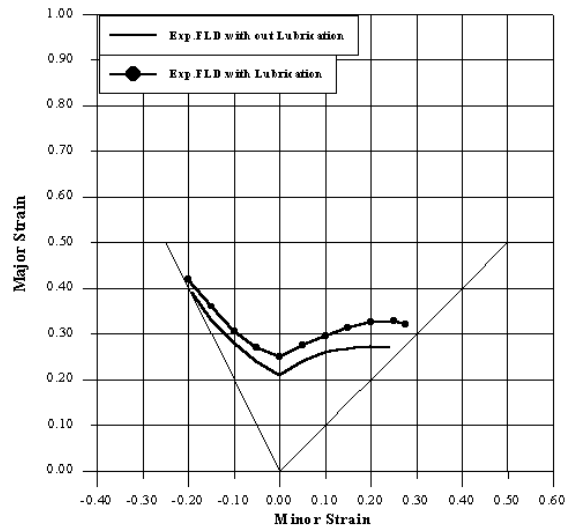
شكل (8) منحنى حد التشكيل للألمنيوم والصلب والبراص



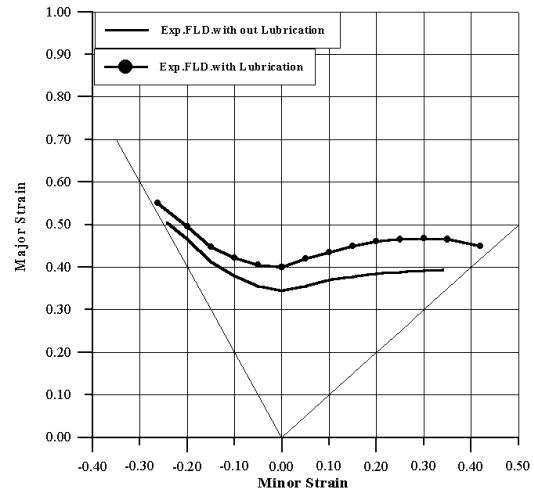
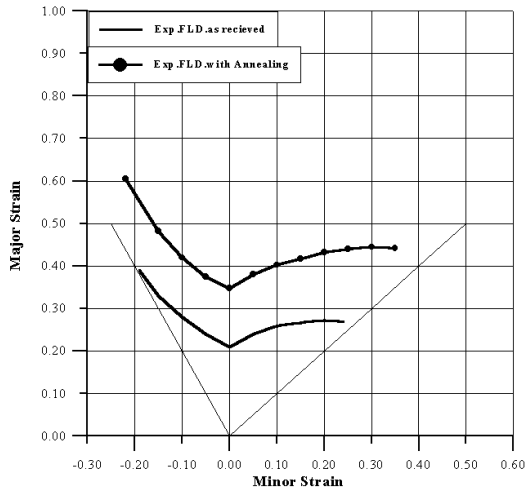
شكل (7) جزء من منحنى حد التشكيل بطريقة تحليل (Hecker)



شكل (10) يبين تأثير التزييت على منحنى الصلب



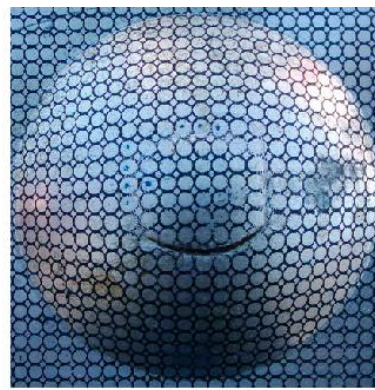
شكل (9) يبين تأثير التزييت على منحنى الألمنيوم



شكل (11) يبين تأثير التزييت على منحنى البراص شكل (13) يبين تأثير التلدين على منحنى الألمنيوم

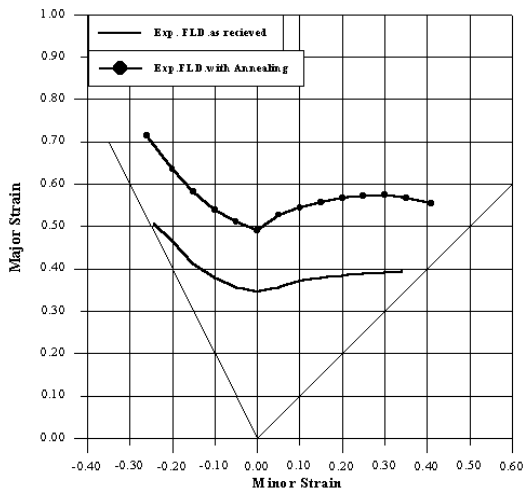


(B)

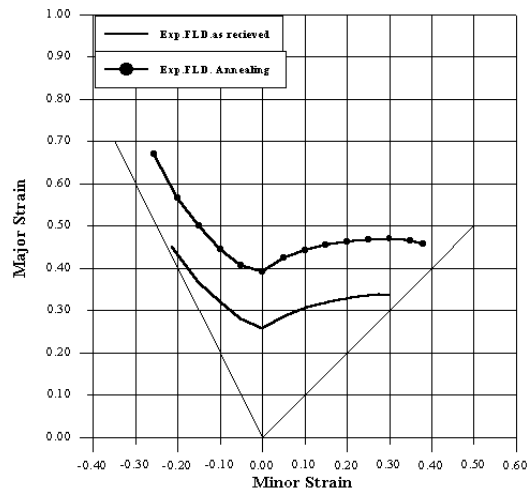


(A)

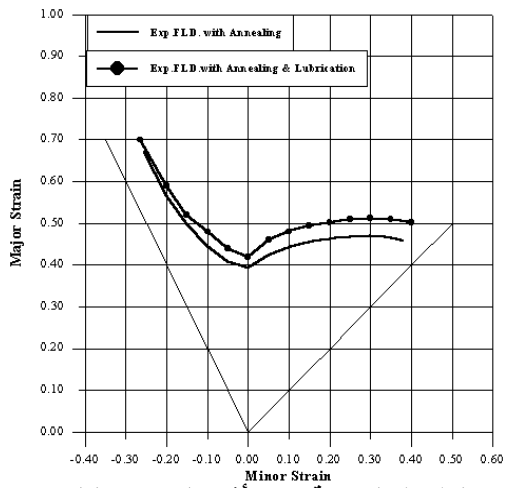
شكل (12) يبين نموذج (8) مشكل باستخدام التزييت وبدونه



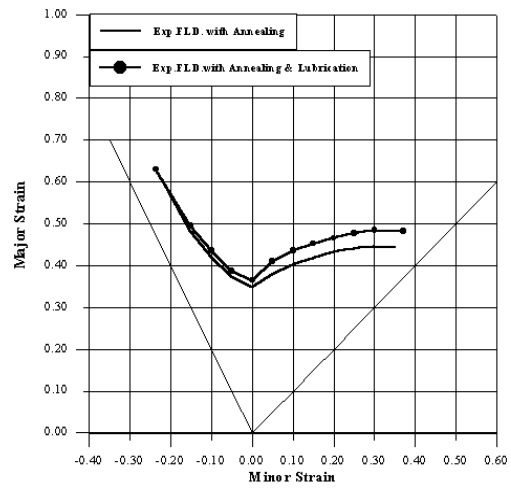
شكل (15) يبين تأثير التلدين على منحنى البراص



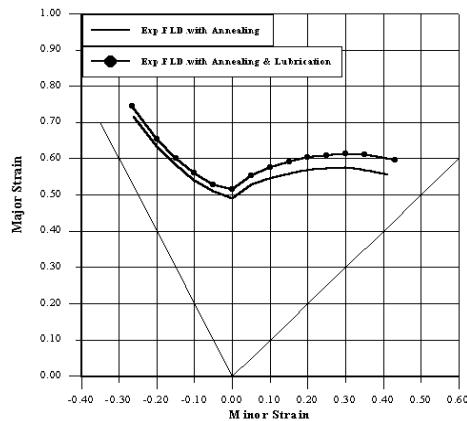
شكل (14) يبين تأثير التلدين على منحنى الصلب



شكل (17) المقارنة بين تأثير التزييت والتلدين وتأثير التلدين على منحنى الصلب



شكل (16) المقارنة بين تأثير التزييت والتلدين وتأثير التلدين على منحنى الألمنيوم



شكل (18) المقارنة بين تأثير التزييت والتلدين وتأثير التلدين على منحنى البراص

AFFECTING THE DETERMINATION OF FORMING LIMIT DIAGRAM FOR SHEET METALS

Dr.W.J.Ali

A.O.Balod

**Mechanical Engineering Department, Mosul University,
Mosul**

ABSTRACT

The sheet metal forming is defined as the ability of metal to deform plastically (stretch forming) without necking or fracture . to control the sheets forming operation failure a diagram is used , in which the ; accepted forming , failure and critical regions are shown . this diagram is known as “Forming Limit Diagram”(FLD) . It is considered as an important tool to determine the formability of sheet metals . The forming limit diagrams for Aluminum , low carbon Steel and Brass were constructed experimentally as received and after annealing (with and with out lubrication) . Results have shown that the forming limit diagram for Brass was the highest and for Aluminum was the lowest . Annealing and lubrication have increased FLD for all metals in different quantities . Highest values of strain limits were appeared in FLD using both annealing and lubrication in the same time (widening limit curve) specially in brass .

KEY WORDS

Sheet Metal Forming , Forming limit Diagrams, Stretch Forming.