



دراسة تأثير سرعة البثق وزاوية القالب على ضغط البثق النسبي لسبيكة الألمنيوم AA6061

فاروق منصور مهدي¹ حازم خليل خلف² أسيل ناظم فتحي³

^{1,2} قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة تكريت، صلاح الدين، العراق

³ قسم المشاريع الهندسية والأعمار، جامعة تكريت، صلاح الدين، العراق

الخلاصة

تم في هذا البحث اجراء دراسة عملية ونظرية للتعرف على تأثير زاوية القالب وسرعة البثق على ضغط البثق النسبي لسبيكة الألمنيوم AA6061 في حالتها المخمرة.

تم استخدام مجالين نظريين لهذا الغرض هما المجال ذو الحدود الجاسئة-اللينة والمجال المختلط وأعد برنامج حاسوبي بلغة (فورتران 77) لحساب ضغط البثق النسبي ومركباته لزاويا قالب (30° , 60° , 90° , 120° , 150°) وسرع بثق (3, 7, 10) ملم/دقيقة.

تم التوصل في هذا البحث الى أن طاقة القص وطاقة الاحتكاك تزداد بزيادة زاوية القالب إلا ان طاقة التشكيل الداخلي لم تتأثر بذلك. كما تم التوصل الى أن كل من ضغط البثق النسبي والانفعال غير المتجانس وكذلك الانفعال القصي عبر المقطع تزداد بزيادة زاوية القالب وسرعة البثق. وجد كذلك أن الزاوية المثلى التي تعطي أدنى مستوى لطاقة التشكيل هي 60° حسب النتائج العملية و 35° - 90° حسب المجال المختلط و 46° حسب المجال ذو الحدود الجاسئة -اللينة.

الكلمات الدالة: بثق، ضغط الذروة، زاوية القالب.

Study the Effect of Extrusion Speed and Die Angle on Relative Extrusion Pressure of Aluminum Alloy AA6061

Abstract

Theoretical and experimental study of die angle, and extrusion speed effect on relative extrusion pressure of annealed AA6061 aluminum alloy have been carried out in this research. Two theoretical fields have been employed, rigid-plastic field and mixed field, to predict the relative extrusion pressure. A FORTRAN program has been developed to calculate the relative extrusion pressure and its compounds. The tests have been conducted with various, die angle (30° , 60° , 90° , 120° , 150°) and various extrusion speed (10,7,3) mm/min.

The results showed an increase in shear power and friction power with increasing die angle, while no effect was observed on the internal power of deformation. It was also found that the relative extrusion pressure, the inhomogeneous strain, and the shear strain across the section increase as the die angle and extrusion speed increase. Experimental tests showed that the optimum die angle was 60° while the optimum die angle was between 35° - 90° and 46° according to the mixed field and the rigid- plastic field respectively.

Keywords: Extrusion, Extrusion Pressure, Die Angle.

الرموز	
α :	نصف زاوية القالب
a_o :	المسافة من بؤرة القالب الى مدخل القالب
a_m :	المسافة من بؤرة القالب الى نقطة الحدود الفاصلة بين المنطقتين المقتربة والمثلثية
$\dot{\epsilon}_{ij}$:	مركبة معدل الانفعال
$\Gamma_{1...6}$:	أسطح انقطاع السرعة.
m :	عامل الاحتكاك.
$\dot{w}_{f,i,s,c}$:	مركبات قدرة البثق الناتجة في المجال ذو الحدود لجاسئة-اللينة.
$\dot{w}_{\Gamma_{1...6}}$:	مركبات قدرة البثق في المجال المختلط.

تناولت البحوث السابقة دراسة مختلف العوامل المؤثرة في ضغط الذروة من ناحية وتجانس خواص الميثوق عبر المقطع من ناحية أخرى. ومن هذه الظروف حالة السطح بين الخامة والحاوية من جهة والخامة والقلب من جهة أخرى والتي لها أثر كبير في تحديد الطاقة المصروفة في العملية وتجانس الخواص عبر المقطع إذ يقل ضغط الذروة ويتحسن تجانس الخواص وجودة السطح مع تحسين ظروف التزيت [4,3]. كما أن لهندسية ممر التشكيل أثر كبير في تحديد نمط الانسياب وتوزيع الانفعال المكافئ عبر المقطع ومقدار ضغط الذروة. وقد وجد أن القوالب القطاعية التي تستند في تصميمها على مفاهيم نظرية قد أعطت ضغوطاً أقل مما تتطلبه القوالب المصنعة على الأسس الصناعية من ناحية ومن ناحية أخرى فقد كان توزيع الانفعال أكثر تجانسا عبر مقطع المنتج [6,5].

وجد كذلك أن لسرعة البثق أثر واضح في تحديد ضغط الذروة إذ وجد أن التناسب بينهما طردياً في سبائك الألمنيوم 2090 و 2091 و 8090 و [9,8,7]8091. كما وجد أن لدرجة حرارة الميثوق تأثيراً كبيراً يفوق تأثير سرعة البثق في تحديد ضغط الذروة [9]. يتغير ضغط الذروة بتغير زاوية القلب المخروطي وتوجد زاوية مثلى تعتمد على نسبة البثق وظروف الاحتكاك ودرجة الحرارة [11,10,8].

الجانب النظري

وضعت نظرية الحد الأعلى التي تستخدم بشكل واسع في إيجاد طاقة التشكيل المعدني من قبل Perger و Hodge عام 1951 ثم طورت من قبل Drucker عام 1954 [12]. تنص هذه النظرية على أنه من بين جميع مجالات معدل الانفعال المقبولة حركياً هنالك مجال حقيقي واحد يحقق أدنى قيمة للتعبير الآتي:

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dv + \int_{S_f} \tau |\Delta v| ds - \int_{S_f} T_i v_i ds \dots \dots \dots (1)$$

يحصل على مجال معدل الانفعال المقبول حركياً من مجال السرعة المقبول حركياً. وفي المعادلة أعلاه فإن الطاقة الحقيقية المسلطة خارجياً J^* تكون أعلى من القيمة المحسوبة في الطرف الثاني من المعادلة أو تساويها. ويمثل الحد الأول القدرة الداخلية للتشكيل فيما يمثل الحد الثاني القدرة المصروفة على القص عند أسطح انقطاع السرعة ويمثل الحد الثالث قدرة سحب الجسم المحددة مسبقاً. يتم تحليل سرعة أي جسيم من المعدن عند مدخل منطقة التشكيل ومخرجها وتحدد مركباتها بما يحقق شرط الاستمرارية وفرضية ثبات الحجم والشروط الحدية للسرعة.

المجال المختلط

تم اقتراح مجال نظري تحدد فيه الزاويتان (β_2, β_1) ، الشكل (1)، شكل المجال إذ تحدد ميل خطي مدخل ومخرج منطقة التشكيل على التوالي. ومن خلال تغيير قيم هاتين الزاويتين يمكن الحصول على القيمة الدنيا لطاقة التشكيل المستخرجة من نظرية الحد الأعلى لهذا المجال.

- σ_0 : إجهاد الخضوع الابتدائي.
- V_o, V_f : سرعة الدخول والخروج للمادة
- $V_{r\theta\phi}, V_{RZS}$: مكونات السرعة في المنطقة المقترية والمثلثية
- $\dot{\epsilon}_{rr, \theta\theta, \phi\phi, r\theta, r\phi, r\theta, \dots}$: مكونات الانفعال و الانفعال الفعال في المنطقة المقترية
- $\dot{\epsilon}_{t, s, \theta, t, s, \dots}$: مكونات الانفعال و الانفعال الفعال في المنطقة مثلثية
- $\dot{\epsilon}_{r, s, \theta, r, s, \dots}$: مركبات معدل الانفعال في المجال ذو الحدود الجاسئة-اللينة
- $\dot{\epsilon}_\theta$: معدل الانفعال الفعال في المجال
- τ : جهد القص
- $|\Delta v|$: انقطاع السرعة
- \bar{W}_T : الطاقة الكلية
- β_1, β_2 : زوايا ميل حدود المجالين المقترين والمثلثي عند مدخل ومخرج القلب
- $r(\eta), z(\eta)$: دالة الحدود الجاسئة-اللينة
- $r(\eta, z)$: دالة خط الانسياب مع المتغيرين η و z

المقدمة

تعد عملية البثق واحدة من أهم عمليات التشكيل المعدني إذ يمكن من خلالها تحقيق نسب تشكيل عالية جداً لا يمكن تحقيقها بأي طريقة من طرائق التشكيل الأخرى بسبب تحقق حالة إجهاد انضغاطية ثلاثية الاتجاه فيها. ويمكن من خلالها إنتاج عدد لا حصر له من الأجزاء بمقاطع ذات أشكال وأبعاد مختلفة [1].

يمثل ضغط البثق أحد أهم محددات العملية والذي يعتمد بدوره على ظروف التشكيل ممثلة بنسبة البثق وهندسية ممر التشكيل وظروف الاحتكاك وخواص المعدن الميثوق ودرجة حرارته [2]. نال ضغط البثق اهتماماً كبيراً من قبل الباحثين والمصنعين على حد سواء، حيث وضعت نظريات وتقريبات عديدة لتخمين الضغط المطلوب في عملية البثق علاوة على العلاقات التجريبية. وقد كان لنظرية الحد الأعلى (Upper bound) النصيب الأوفر بين هذه النظريات إذ تعطي حلاً مساوياً للحل الحقيقي أو تزيد عنه بمقادير تعتمد على مجال السرعة المفترض.

يعد ضغط الذروة (Peak pressure)، وهو ذلك الضغط اللازم لبدء عملية البثق المباشر، من أهم مراحل ضغط البثق، وله قيمة أكبر من قيمة الضغط اللازم لاستمرار عملية البثق. لضغط الذروة أهمية صناعية كبيرة إذ من خلاله يتم تحديد قدرة ماكينة البثق المطلوبة. يعزى ظهور هذه القيمة العظمى على منحنى الضغط – الزاوية في عملية البثق إلى الحاجة لتوليد انخلاعات جديدة أو زيادة سرعة الانخلاعات الموجودة لتتناسب مع معدل الانفعال المطبق وكلا الأمرين يتطلب تطبيق قوة أعلى.

وبسبب التناظر المحوري وعدم حدوث دوران في العينة تتلاشى مركبتا الانفعال القصي الآخرين فيكون:

$$\dot{\epsilon}_{r\phi} = \dot{\epsilon}_{\theta\phi} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

ومن تعويض معدلات الانفعال أعلاه في معادلة طاقة التشكيل المتجانس نحصل على طاقة التشكيل في المنطقة المقترية:

$$\begin{aligned} \dot{W}_I(II) &= 4\pi\sigma_0 v_0 a_0^2 \sin \beta_1 (\sin(\beta_1 + \alpha))^2 \ln\left(\frac{a_0}{a_m}\right) \\ &\times \int_0^\alpha \frac{\sin \theta}{(\sin(\beta_1 + \theta))^3} \\ &\times \sqrt{1 + \frac{3}{4}(\cot(\beta_1 + \theta))^2} d\theta \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

أما معدلات الانفعال في المنطقة المثلثية (III) والمشتقة وفق الإحداثيات S, t, θ :

$$\dot{\epsilon}_t = 0 \dots \dots \dots (7a)$$

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\partial V_s}{\partial S} = \frac{\partial V_s}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial S} + \frac{\partial V_s}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial S} = U_{r3} \sin \alpha \frac{R_{r3}}{R^2} \dots \dots \dots (7b)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{1}{R} (-V_s \sin \alpha) = -U_{r3} \sin \alpha \frac{R_{r3}}{R^2} \dots \dots \dots (7c)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ts} &= \frac{1}{2} \frac{\partial V_s}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial t} + \frac{\partial V_s}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial t} \\ &= \frac{1}{2} U_{r3} \left\{ \frac{\sec \alpha}{1 + (\tan \alpha / \tan \beta_1)} - \frac{R_{r3}}{R} \right\} \dots \dots \dots (7d) \end{aligned}$$

ومن تعويض معدلات الانفعال الخاصة بالمنطقة المثلثية في معادلة طاقة التشكيل المتجانس نحصل على طاقة التشكيل في هذه المنطقة:

$$\dot{W}_I(III) = \frac{2\pi\sigma_0}{\sqrt{3}} v_0 a_0 S \sin \alpha \dots \dots \dots (8)$$

إذ أن:

$$S = \left[\sqrt{P} - \sqrt{B} \ln \left(\frac{2B}{X} - \frac{A \cos \alpha}{2} + \frac{2\sqrt{BP}}{X} \right) - \frac{\cos \alpha}{2} \ln \left(A\sqrt{P} + \frac{A^2}{2} X - \frac{A \cos \alpha}{2} \right) \right]_{X=a_0/a_m}^{X=1}$$

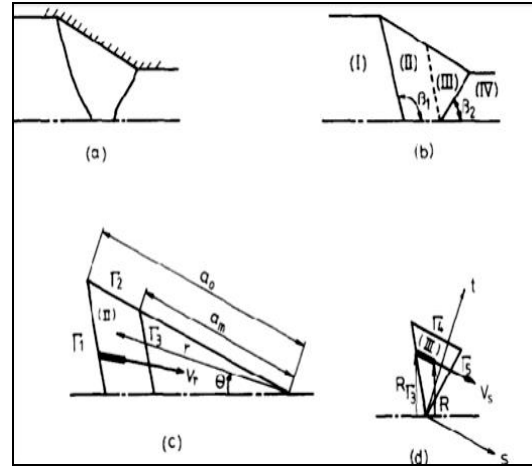
$$P = B - \frac{A \cos \alpha}{R_{r3} \sec \alpha} + \frac{A^2}{4} \frac{R^2}{R_{r3}^2}$$

$$A = \frac{1}{1 + (\tan \alpha / \tan \beta_1)}$$

$$B = (\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2 / 4$$

وبمساواة القدرة الخارجية مع القدرة المحسوبة من المعادلة أعلاه نحصل على:

يلاحظ من الشكل (1) أن المجال المختلط مكون في الحقيقة من مجالين نظريين مجتمعين سوية هما المجال المثلثي والمجال نصف القطري أو الشعاعي المقرب. وفيما يلي التحليل النظري لهذا المجال [13].



شكل (1) مجالات السرعة المقترية (a) الحقيقي (b) المختلط (c) المقرب (d) المثلثي [13]

في المنطقة المقترية (II) (Converging Zone) شكل (1):

$$\left. \begin{aligned} v_r &= -v_0 a_0^2 \frac{1}{r^2} \frac{\sin(\beta_1) (\sin(\beta_1 + \alpha))^2}{(\sin(\beta_1 + \theta))^3} \\ v_\phi &= v_\theta \end{aligned} \right\} \dots \dots (2)$$

وفي المنطقة المثلثية (III) (Triangular Zone) شكل (1):

$$\left. \begin{aligned} v_R &= -v_0 \left(\frac{a_0}{a_m} \right)^2 \frac{\sin(\beta_1)}{\sin(\beta_1 + \alpha)} \frac{R_{r3}}{R} \sin(\alpha) \\ v_Z &= v_0 \left(\frac{a_0}{a_m} \right)^2 \frac{\sin(\beta_1)}{\sin(\beta_1 + \alpha)} \frac{R_{r3}}{R} \cos(\alpha) \end{aligned} \right\} \dots \dots (3)$$

أما معدلات الانفعالات في المنطقة المقترية (II) فهي:

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r} = 2v_0 a_0^2 \frac{1}{r^3} \frac{\sin(\beta_1) (\sin(\beta_1 + \alpha))^2}{(\sin(\beta_1 + \theta))^3} \dots \dots \dots (4a)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{v_r}{r} = -v_0 a_0^2 \frac{1}{r^3} \frac{\sin(\beta_1) (\sin(\beta_1 + \alpha))^2}{(\sin(\beta_1 + \theta))^3} \dots \dots \dots (4b)$$

$$\dot{\epsilon}_{\phi\phi} = \frac{v_r}{r} = \dot{\epsilon}_{\theta\theta} \dots \dots \dots (4c)$$

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_r}{r} \right)$$

$$= \frac{3}{2} v_0 \frac{1}{r^3} \frac{\sin(\beta_1) (\sin(\beta_1 + \alpha))^2}{(\sin(\beta_1 + \theta))^3} \cot(\beta_1 + \alpha) \dots \dots \dots (4d)$$

$$\left. \begin{aligned} v_r &= -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ v_z &= \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

أما خط الانسياب فيمكن تمثيله بشكل عام بالآتي:

$$\eta(r, z) = \text{Constant} \dots \dots \dots (15)$$

وباشتقاق المعادلة اعلاه نحصل على:

$$\frac{\partial \eta}{\partial r} * dr + \frac{\partial \eta}{\partial z} * dz = 0 \dots \dots \dots (16)$$

ويعبر عن مجال السرعة بالصيغة التالية [14,19]

$$\left. \begin{aligned} v_r &= -\frac{1}{r} f(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial z} \\ v_z &= \frac{1}{r} f(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial r} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (17)$$

أما مركبات الانفعال بدلالة العاملين z و η فتعطى بالمعادلة الآتية [19]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = \frac{\partial v_r}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial r} \\ \dot{\epsilon}_z &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial v_z}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (18a, b)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{v_r}{r} \dots \dots \dots (18c)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_r}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (18d) \end{aligned}$$

وبتعويض هذه القيم في المعادلة الآتية ينتج:

$$\dot{\epsilon}_e = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_z^2 + 2\dot{\epsilon}_{rz}^2)} \dots \dots \dots (19)$$

إن طاقة التشكيل المتجانس يمكن إيجادها كالتالي [17]:

$$\dot{w}_i = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^1 \int_{z_2}^{z_1} \dot{\epsilon}_e 4\pi r G dz d\eta \dots \dots \dots (20)$$

أما طاقة القص فيمكن إيجادها من المعادلة الآتية [17]:

$$\begin{aligned} \dot{w}_s &= \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^1 |\Delta v|_1 2\pi r_1 G_1 d\eta + \\ &\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^1 |\Delta v|_2 2\pi r_2 G_2 d\eta \dots \dots \dots (21a) \end{aligned}$$

$$J^* = -\pi \sigma_{xb} v_0 R_0^2 = -\pi \sigma_{xb} v_f R_f^2 \dots \dots \dots (11)$$

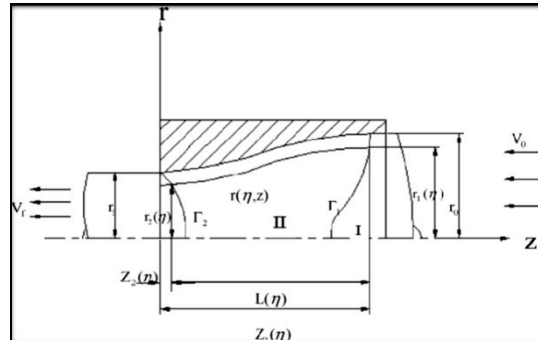
وبالتالي فإن ضغط البثق النسبي سيكون:

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} = -\frac{\dot{w}_T}{\pi v_0 \sigma_0 R_0^2} \dots \dots \dots (12)$$

المجال ذو الحدود الجاسئة-اللينة

تعود بدايات استخدام هذه الطريقة إلى عام (1963) حيث اقترح الباحث (Stepanski) أن تتم عملية حساب القدرة باستخدام دالة اختيارية مقبولة حركياً ولها علاقة بالحدود الجاسئة - اللينة. طورت هذه الطريقة واتسع استخدامها من قبل (Ling و Chen) [14] و (Zimernan و Avitzur) [15] وذلك باستخدام طريقة التقليل (Minimization) ثم اعتمد مفهوم مجال السرعة العام من قبل (Nagpal) [16]. طورت النظرية بعد ذلك من قبل Yang وآخرون [17]، الذين استخدموا قالباً ذا قطاع منحنى له ميل صفري عند مدخل ومخرج القالب، إلا إن هذه الطريقة لم تكن قادرة على حل مسائل عديدة مثل التشكيل باستخدام القوالب المخروطية (Conical) والبيضوية (Elliptic) وقوالب القطع الزائد (Hyperbolic) التي ليس لها ميل صفري عند مدخل أو مخرج القالب. ثم اقترح Wang وآخرون [18] أشكالاً اختيارية لحدود جاسئة-لينة وذلك لحل مسائل واسعة من عمليات الدرفلة. ثم طورت من قبل Huang وآخرون [19] الذين حللوا أشكالاً متنوعة من القوالب في عملية البثق وعالجوا المسائل السابقة التي لم يكن بالإمكان التعامل معها بإيجاد مجال السرعة المقبول حركياً المبين في شكل (2) الذي يفي بشروط السرعة وشرط عدم الانضغاطية الذي يعبر عنه بالمعادلة التالية [19]:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (13)$$



شكل (2) المجال ذو الحدود الجاسئة -اللينة [19]

ولتلبية شروط المعادلة أعلاه فإن مجال السرعة يمكن أن يعبر عنه بشكل دالة الانسياب [19] $\Phi(r, z)$:

العديد من الاستخدامات منها الموثقات المستخدمة في صناعة الأثاث ووسائل النقل وغيرها [21]:

الأجهزة والمعدات والمكانن المستخدمة

تم إجراء الاختبارات على ماكينة اختبارات جامعة نوع Sans سعتها 100 طن وفرن كهربائي Nabertherm أقصى درجة حرارة له 1260°C وجهاز قياس صلادة Rockwell نوع Metkon-Tcm ومكائن التشغيل الميكانيكي وخلية قياس القوة Load Cell ذات سعة قياس تصل إلى 3000 kN ومقياس انحراف Dial gauge موضح في الشكل (3).

منظومة البثق

تم تصنيع منظومة البثق وفق المخطط الموضح في الشكل (4) وقد استخدم صلب متوسط الكربون CK45 حسب المواصفة الألمانية (DIN) لتصنيع جميع أجزاء المنظومة وأجريت لها المعاملات الحرارية اللازمة لرفع صلابتها إلى حدود HRC (50-60) وذلك بالتسخين إلى درجة 850°C لمدة 45 دقيقة للحصول على بنية أوستنايتية. يتم بعد ذلك إخماد الأجزاء في الزيت أو الماء حسب الجزء ومن ثم المراجعة بدرجة حرارة 250°C لمدة ساعة، يتبع ذلك قياس الصلادة للتأكد من الحصول على القيمة المطلوبة لكل جزء من أجزاء المنظومة المبينة في الجدول (2). نعمت الأجزاء الداخلية للتقليل من تأثير الاحتكاك على القدرة المسلطة من الماكينة وانسياب المعدن بسهولة باستخدام أوراق تنعيم من كربيد السليكون بدرجات مختلفة آخرها درجة 2000.

وأما طاقة الاحتكاك فيمكن إيجادها كالتالي [20]:

$$\dot{w}_f = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} m \int_0^{L_o} |\Delta v|_f 2\pi r(z) dz \dots \dots \dots (21b)$$

وشغل الاحتكاك الناتج من التماس بين المعدن وجدار الحاوية C فهو:

$$\dot{w}_c = \int_0^{L_d} m \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} v_o 2\pi r_o^2 dL_d \dots \dots \dots (21c)$$

وبالتالي فإن طاقة التشكيل الكلية تكون:

$$\dot{w}_T = \dot{w}_i + \dot{w}_s + \dot{w}_f + \dot{w}_c \dots \dots \dots (22)$$

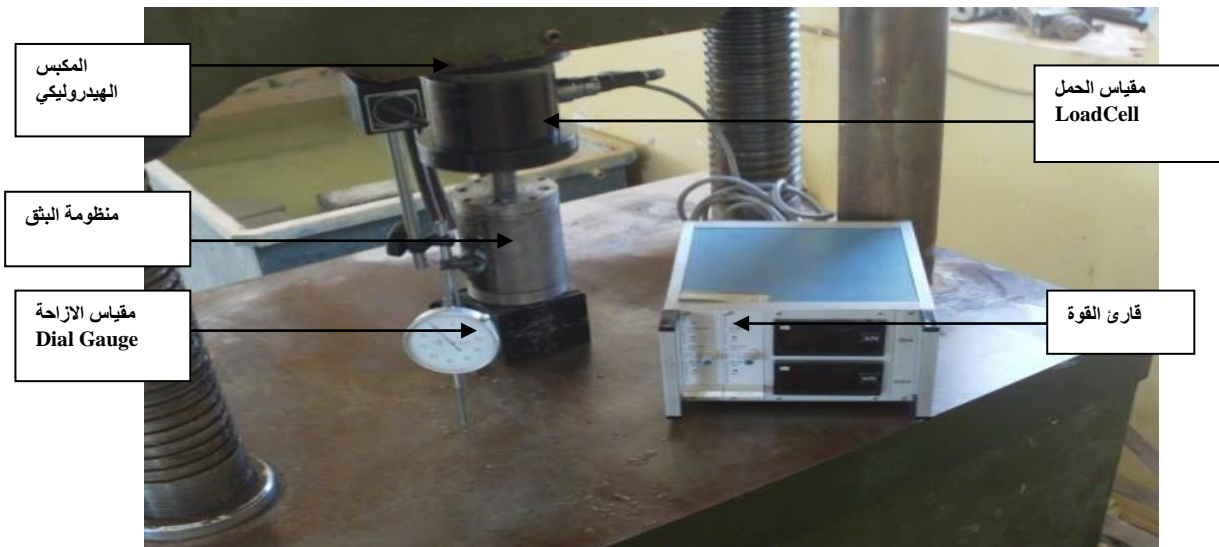
ويتم إيجاد ضغط البثق النسبي من المعادلة:

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} = - \frac{\dot{w}_T}{\pi v_o \sigma_o R_o^2} \dots \dots \dots (23)$$

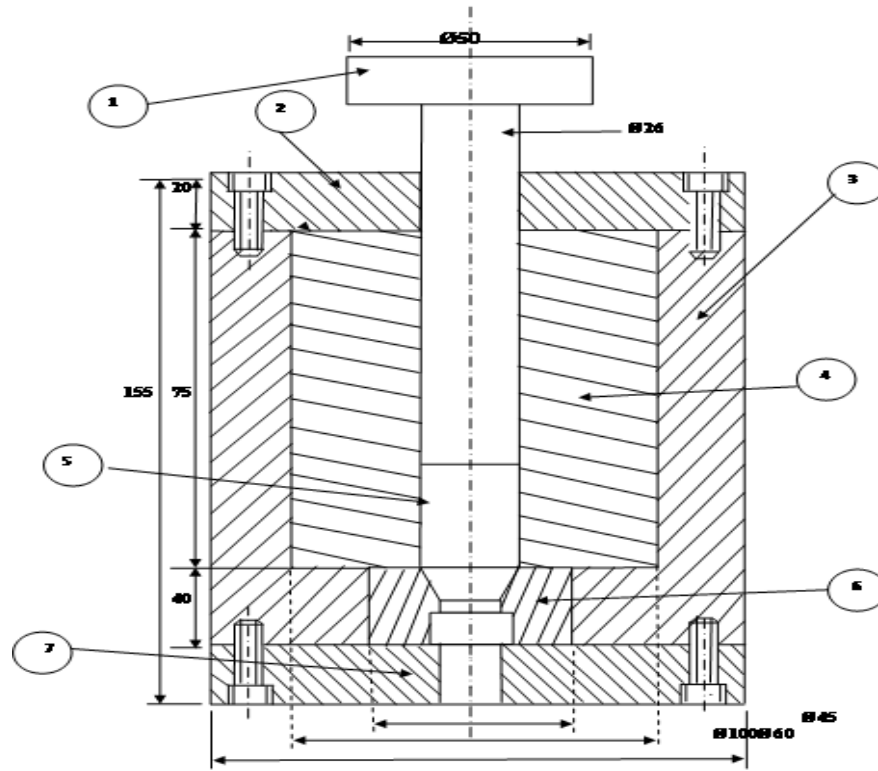
الجانب العملي

المعدن المستخدمة

تم استخدام سبيكة الألمنيوم AA6061 على شكل قضبان قياسية مخمرة (Annealed) بقطر 25.4 ملم مابين تركيبها الكيميائي في الجدول (1). هذه السبيكة ذات مقاومة متوسطة إذ يتراوح إجهاد الخضوع لها بين 55 و 275 ميكاباسكال اعتمادا على حالة السبيكة ولها قابلية التشكيل والمعاملة الحرارية وبذلك فإنها تلبي متطلبات



شكل (3) منظومة البثق مع اجهزة قياس الحمل والانحراف



شكل (4) مخطط منظومة البثق (الأبعاد بالملمتر)

جدول (1) التركيب الكيميائي لسبيكة الألمنيوم المستخدمة

Al (%)	Ni (%)	Ti (%)	Zn (%)	Cr (%)	Mg (%)	Mn (%)	Cu (%)	Fe (%)	Si (%)
الباقى	0.01	0.13	0.23	0.1	0.9	0.08	0.13	0.35	0.4-0.8

جدول (2) أجزاء منظومة البثق: المعدن المستخدم ومعاملاتها الحرارية

ت	اسم الجزء	المعدن المستخدم	المعاملة الحرارية
1	المذك Ram	CK45	إخماد بالماء من درجة حرارة 850 °C للحصول على صلادة HRC 60
2	المسند العلوي	CK45	كما مستلم
3	حامل الحاوية	CK45	كما مستلم
4	الحاوية	CK45	إخماد بالزيت من درجة حرارة 850 °C والمراجعة عند 250 °C لمدة ساعة للحصول على صلادة HRC 50
5	العينة	AA6061	مخممر بدرجة 500°C لمدة ساعتين
6	ال قالب Die	CK45	إخماد بالزيت من درجة حرارة 850 °C والمراجعة عند 250 °C لمدة ساعة للحصول على صلادة HRC 50
7	المسند السفلي	CK45	كما مستلم

حسب الجزء ومن ثم المراجعة بدرجة حرارة 250 °C لمدة ساعة، يتبع ذلك قياس الصلادة للتأكد من الحصول على القيمة المطلوبة لكل جزء من أجزاء المنظومة المبينة في الجدول (2). نعمت الأجزاء الداخلية للتقليل من تأثير الاحتكاك على القدرة المسلطة من الماكينة وانسياب المعدن بسهولة باستخدام أوراق تنعيم من كربيد السليكون بدرجات مختلفة آخرها درجة 2000.

منظومة البثق

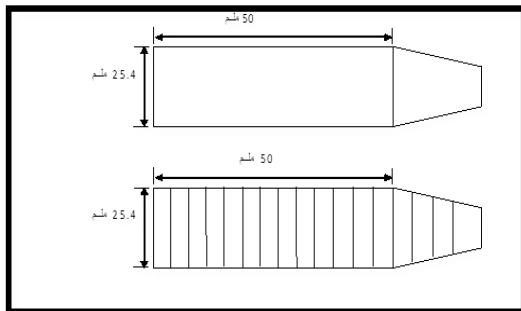
تم تصنيع منظومة البثق وفق المخطط الموضح في الشكل (5) وقد استخدم صلب متوسط الكربون CK45 حسب المواصفة الألمانية (DIN) لتصنيع جميع أجزاء المنظومة وأجريت لها المعاملات الحرارية اللازمة لرفع صلابتها إلى حدود HRC (50-60) وذلك بالتسخين إلى درجة 850 °C لمدة 45 دقيقة للحصول على بنية أوستنايتية. يتم بعد ذلك إخماد الأجزاء في الزيت أو الماء

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \dots \dots \dots (27)$$

إذ إن ε_1 و ε_2 هما الانفعالان قبل التشكيل وبعده على التوالي. وبتعويض المعادلات (1) و(2) و(3) في (4) نحصل على قيم متوسط إجهاد الانسياب للسرعة الثلاثة.

تحضير العينات

استخدمت مجموعتان من العينات كما في الشكل (5). كانت المجموعة الأولى عبارة عن عينات اسطوانية لإيجاد منحنى الحمل - الإزاحة. أما المجموعة الثانية من العينات فهي المستخدمة لإيجاد الانفعال القصي من خلال تقنية اللدونة المرئية وهي عبارة عن عينات ذات نصفين رسم على أحدهما خطوط متوازية متعامدة مع محورها الطولي وذلك لإيجاد الانفعال غير المتجانس عند مواقع مختلفة من مقطع العينة. استخدمت عدة خاصة على ماكينة التقزير العمودية لرسم هذه الخطوط وتركزت مسافة 5 ملم بين كل خطين متجاورين. جدير بالذكر إن العينات القياسية المستمدة من المنشأ كانت بحالة T_6 (معاملة محلولية متبوعة بتعتيق صناعي) خمرت عند درجة حرارة 500°C لمدة ساعتين [24]. وتم حساب عامل فائضية الانفعال Φ من العلاقة التالية:



شكل (5) العينات المستخدمة في البثق بعينات كاملة وعينات نصفية

$$\Phi = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_H} \dots \dots \dots (28)$$

ε_T : الانفعال الكلي ويعطي بالعلاقة:

$$\varepsilon_L + \varepsilon_H = \varepsilon_T \dots \dots \dots (29)$$

ε_H : الانفعال المتجانس ويتم إيجاده من العلاقة:

$$\varepsilon_H = \ln\left(\frac{R_o}{R_f}\right)^2 \dots \dots \dots (30)$$

ε_L : الانفعال غير المتجانس الطولي ويتم إيجاده من العلاقة:

القوالب

تم تصنيع القوالب من قضبان الصلب متوسط الكربون نفسه CK45. وهذه القضبان متوافرة بقطر 50 ملم وتم تقليل القطر الخارجي لكل قالب إلى 45 ملم مع التنعيم الجيد لها ليتوافق مع المنظومة. أما فتحات القوالب فقد تم تثبيت نسبة التخفيض في مساحة المقطع العرضي 60% وتغيير زوايا القالب، وقد أخذت الزوايا $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ كمتغيرات للقوالب المخروطية المستخدمة في الدراسة الحالية.

اختبار حلقة الانضغاط

تم تحضير عينات من السبيكة قيد الدراسة نفسها بأبعاد قياسية (25.4:12.7:8.5) ملم حسب النسب الآتية 6:3:2 وهي تمثل (سمك العينة: القطر الداخلي: القطر الخارجي) وتم استعمال ماكينة الاختبارات الجامعة نوع (Hoytom) لإجراء عملية كبس العينات وبسرعة 0.34 mm/min إلى الحد الذي يتساوى فيه الانفعال الحقيقي مع الانفعال الهندسي وذلك بالقيام بأخذ قياسات القطرين الداخلي والخارجي وسمك العينة بعد كل 1 ملم من حركة نزول الفك المتحرك لجهاز الاختبار مع تزييت أسطح الأقراص التي تلامس العينة في كل قراءة. وتمت المطابقة مع منحنيات المعايرة القياسية [22] ووجد أن عامل الاحتكاك $f=0.2$.

اختبار الانضغاط

تم إجراء اختبار الانضغاط على عينات طولها 34 ملم وقطرها 25.4 ملم وبواقع عينتين لكل ظرف باستخدام ماكينة الاختبارات الجامعة نوع (Hoytom) وبسرعة (3, 7, 10) ملم/دقيقة نفسها التي استخدمت مع عملية البثق مع مراعاة التزييت بزيت نوع (SAE140) على أسطح التماس بين العينة والأقراص للتقليل من ظاهرة التفلطح، تم تسجيل قيم القوة لكل مسافة نزول المكبس 1 ملم وبعد استخراج قيم الإجهاد والانفعال الحقيقي لهذه العينات تم رسم هذه القيم لإيجاد منحنى المطابقة وكانت العلاقات:

$$\sigma(\varepsilon) = 176.485 + 20.537\varepsilon - 10.6\varepsilon^2 + 5.3\varepsilon^3 - 2.4\varepsilon^4 + 0.785\varepsilon^5 - 0.04\varepsilon^6 - 0.363\varepsilon^7 \dots \dots (24)$$

عند السرعة 10 ملم/دقيقة و

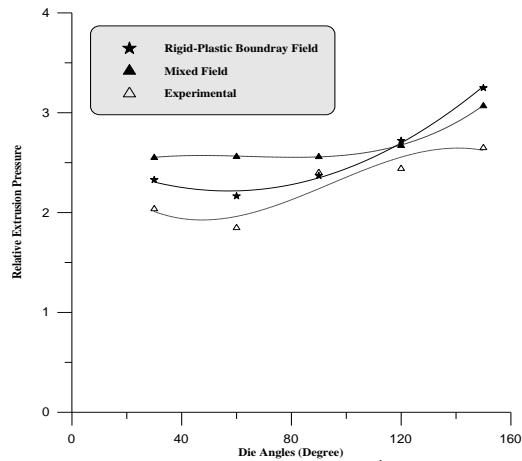
$$\sigma(\varepsilon) = 173.3 + 19.95\varepsilon - 11.7\varepsilon^2 + 6.8\varepsilon^3 - 3.7\varepsilon^4 + 1.39\varepsilon^5 - 0.18\varepsilon^6 - 0.6\varepsilon^7 \dots \dots (25)$$

عند السرعة 7 ملم/دقيقة و

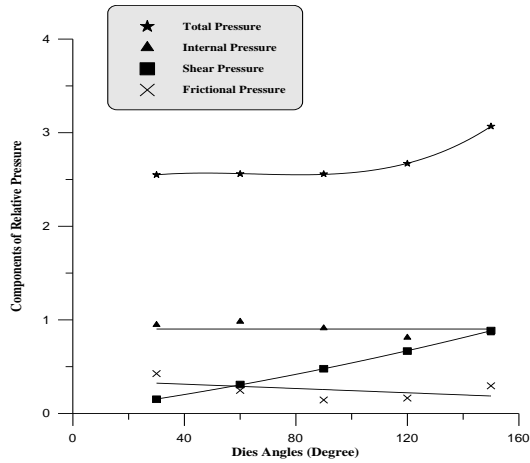
$$\sigma(\varepsilon) = 161.5 + 22.35\varepsilon - 10.95\varepsilon^2 + 5.748\varepsilon^3 - 3.23\varepsilon^4 + 1.82\varepsilon^5 - 1.33\varepsilon^6 - 0.49\varepsilon^7 \dots \dots (26)$$

عند السرعة 3 ملم/دقيقة

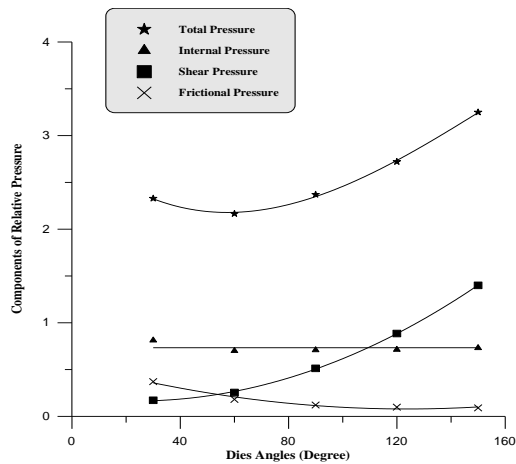
مع إيجاد متوسط إجهاد الانسياب من العلاقة الآتية [23]:



شكل (8) مقارنة بين نتائج المجالين النظريين المختلط والجاسي-اللدن مع النتائج المستحصلة عمليا عند سرعة بثق 3 مم/د



شكل (9) مركبات ضغط البثق النسبي للمجال المختلط



شكل (10) مركبات ضغط البثق النسبي للمجال ذو الحدود الجاسنة اللدنة

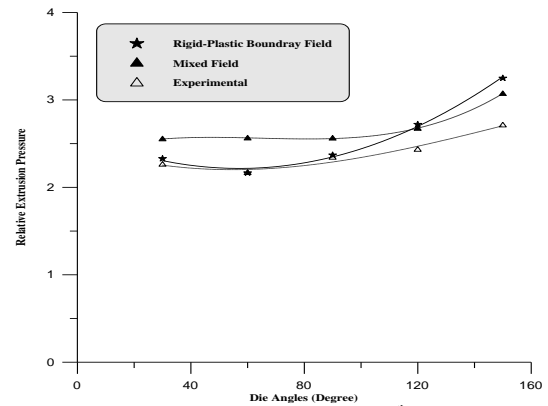
$$\epsilon_L = \cot \gamma \dots \dots \dots (31)$$

حيث ان γ زاوية ميل المماس لخط الانسياب عن محور العينة.

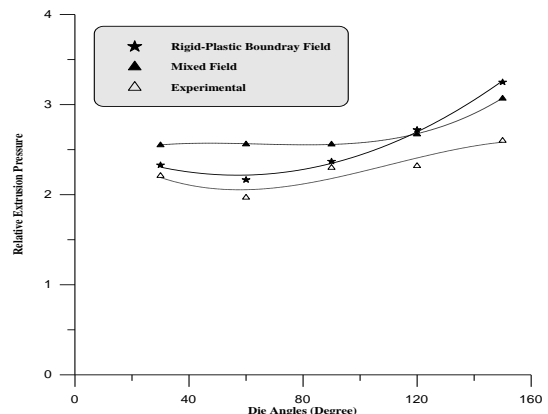
النتائج والمناقشة

تأثير الزوايا على ضغط البثق

تبين الأشكال (6) الى (8) تأثير زاوية القلب على ضغط البثق النسبي المستحصل من التجارب العملية ومقارنة ذلك بتلك التي تم استخراجها من مجالي السرعة الافتراضيين. يلاحظ من هذه الأشكال أن ضغط البثق النسبي المستحصل عمليا يبدأ بقيمة عالية عند الزوايا الكبيرة للقلب ثم يتناقص بتناقص تلك الزوايا حتى يصل الى قيمة مثلى ثم يأخذ بالزيادة بعد ذلك. يعزى هذا السلوك إلى تأثير مركبات الطاقة المفردة وهي طاقة التشكيل الداخلي وطاقة القص وطاقة الاحتكاك في ضغط البثق الكلي للتشكيل المبينة في الأشكال (9) و (10). إذ تكون مركبة القص هي المسيطرة في هذا السلوك عند الزوايا الكبيرة في حين تكون طاقة الاحتكاك هي المتحكمة في الزوايا الصغيرة وبين هذه وتلك توجد قيمة مثلى يتحقق عندها توازن بين مركبتي الطاقة المذكورتين. وقد وجد أن قيمة الزاوية المثلى للقلب تساوي 60° تقريباً.

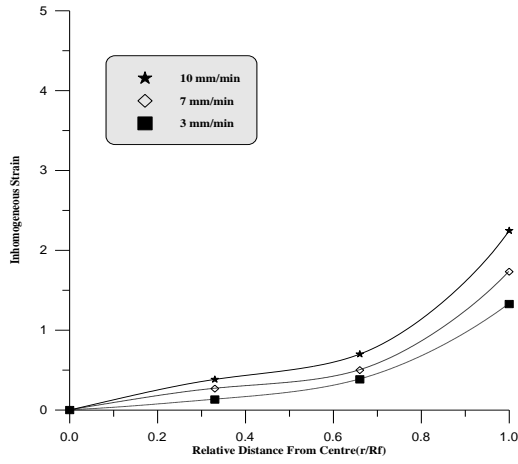


شكل (6) مقارنة بين نتائج المجالين النظريين المختلط والجاسي-اللدن مع النتائج المستحصلة عمليا عند سرعة بثق 10 مم/د

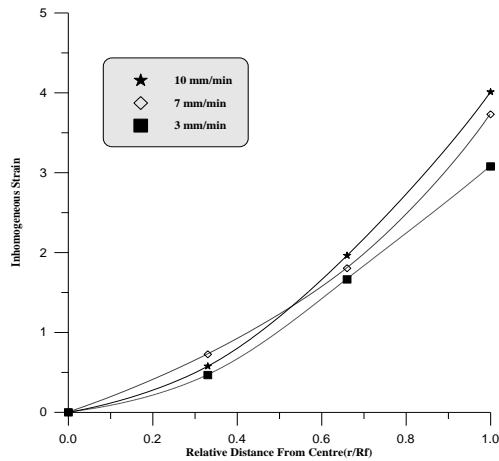


شكل (7) مقارنة بين نتائج المجالين النظريين المختلط والجاسي-اللدن مع النتائج المستحصلة عمليا عند سرعة بثق 7 مم/د

وبالرجوع إلى الأشكال من (6) إلى (8) والنظر إليها سوية مع الاشكال (11 الى 15) نجد أن زيادة زاوية القالب تزيد من كل من عدم تجانس توزيع الانفعال غير المتجانس عبر مقطع العمود المنتج وما يصاحبه من عدم تجانس في توزيع الخواص الميكانيكية وانعكاسه السلبي على أداء المنتج من جهة والطاقة المصروفة في العملية وزيادتها من جهة أخرى. وبناءً على ذلك يصبح من الأهمية بمكان تحديد زاوية البثق المثلى التي تجمع بين الخواص الأفضل للمنتج والكلف الأقل له وهو ما أمكن تحقيقه من النتائج المعروضة في الدراسة الحالية ويدعم ما تم التوصل اليه في دراسة سابقة [30].



شكل (11) تغير الانفعال القصي خلال العينة لزاوية قالب 30° عند سرع مختلفة



شكل (12) تغير الانفعال القصي خلال العينة لزاوية قالب 60° عند سرع مختلفة

وعند مقارنة السلوك العملي لضغط البثق النسبي إزاء زاوية القالب مع السلوك النظري نجد أن ذات السلوك يتحقق مع مجال السرعة ذو الحدود الجاسئة-اللينة. وعلى الجانب الآخر نجد أن المجال المختلط يعطي قيمة ثابتة تقريباً لمدى واسع من زوايا القالب ثم تزداد قيم الضغط النسبي بعد ذلك.

وبالعودة إلى هذه الأشكال، نلاحظ أن المجال ذو الحدود الجاسئة-اللينة هو الأقرب في قيمه إلى تلك المستحصلة عملياً عند الزوايا المثلى والزوايا القريبة منها في حين أن المجال المختلط أقرب إلى النتائج العملية عند الزوايا الكبيرة ويدعم هذه النتائج (بالنسبة للعلاقة بين زاوية القالب وضغط البثق) ما توصلت إليه دراسات سابقة [26,25].

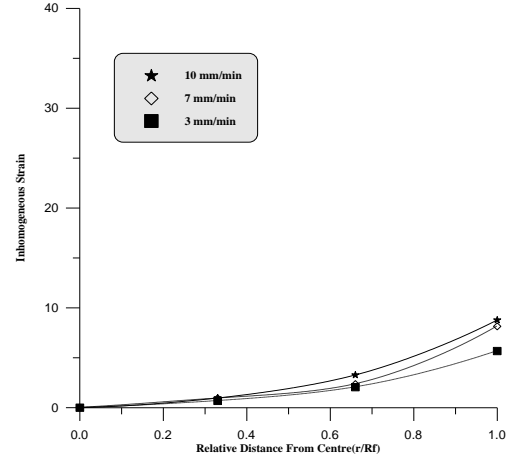
كذلك يلاحظ من الاشكال أن زيادة سرعة البثق تعمل على زيادة الضغط المطلوب لإنجاز العملية. ويمكن أن يرجع السبب في ذلك إلى أن زيادة سرعة البثق تؤدي إلى زيادة في سرعة التشكيل وأن الأخيرة تتطلب زيادة في عدد الانخلاعات المساهمة في العملية وزيادة في سرعة تحركها [6]. إن كل من زيادة سرعة الانخلاعات المتحركة وتوليد انخلاعات جديدة بتطلب تسليط قوة اضافية تظهر بصورة زيادة في ضغط البثق. هذه النتيجة على خلاف ما توصلت إليه العديد من الدراسات السابقة [29,28,27,7]. ولكنها تعد حلاً للحيرة التي أشارت إليها تلك الدراسات وتوصل إلى توافق بين الأساسيين النظري والعملي لتأثير سرعة البثق على الطاقة المصروفة.

تأثير زاوية القالب على الانفعال غير المتجانس

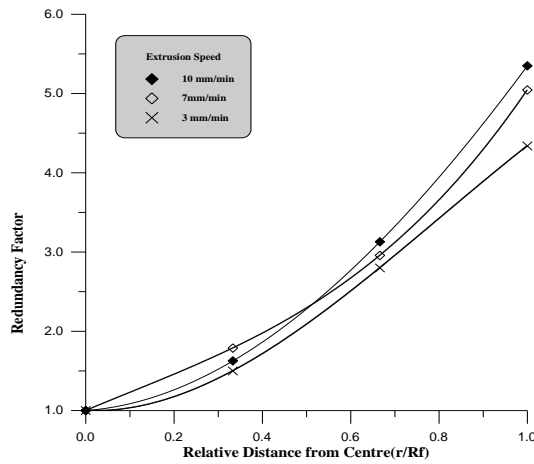
تبين الأشكال (11) إلى (15) تغير الانفعال غير المتجانس خلال العينة للزوايا 0°، 30°، 90°، 120°، 150° عند سرع البثق المختلفة. ويعد الانفعال غير المتجانس معياراً لمدى تجانس عملية البثق وقد تم تتبع تغير قيمه عبر مقطع العمود المنتج ابتداءً من مركز العمود وانتهاءً بسطحه الخارجي. إذ يعطي ذلك صورة واضحة لمدى تغير الخواص الميكانيكية عبر المقطع العرضي للمنتج ومدى تجانسها. يلاحظ من هذه الأشكال أن قيم الانفعال غير المتجانس عند مركز العمود المنتج تساوي صفراً ولجميع الحالات قيد الدراسة كما يشير إلى تحقق حالة نموذجية من التشكيل المتجانس الصرف عند المركز وغياب مركبة الانفعال الفانض بالكلية ومع الابتعاد عن مركز العمود باتجاه السطح نلاحظ حدوث تزايد في قيم الانفعال غير المتجانس لتصل إلى أقصاها عند السطح. تعتمد هذه القيم ومعدل تزايدها على كل من زاوية القالب وسرعة البثق. إذ يلاحظ ولجميع الحالات أن زيادة سرعة البثق تزيد من قيم الانفعال غير المتجانس إلا أن تأثير السرعة أقل مقارنة بتأثير زاوية القالب التي وجد لها فعل كبير في توزيع الانفعال غير المتجانس عبر مقطع العمود إذ إنه كلما زادت قيمة الزاوية زاد عدم التجانس في التوزيع ليصل الفرق إلى مقادير عالية جداً عند الزاوية 150° والتي تعد زاوية كبيرة جداً وتقترب من القالب العادل (Flat).

تأثير زاوية قالب على عامل فائضية الانفعال

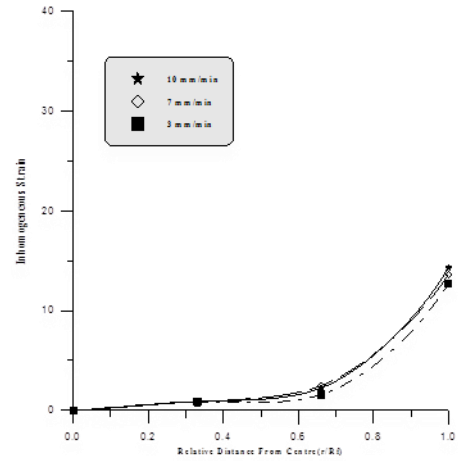
تبين الأشكال من (16) إلى (21) تغير عامل فائضية الانفعال خلال العينة للزاويا $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ عند سرع البثق المختلفة. وبعد الانفعال غير المتجانس معياراً لمدى تجانس عملية البثق وقد تم تتبع تغير قيمه عبر مقطع العمود المنتج ابتداءً من مركز العمود وانتهاءً بسطحه الخارجي. نرى ان سلوك عامل فائضية الانفعال هو نفس سلوك الانفعال القصي وذلك لاعتماد مقدار عامل الفائضية على مقدار الانفعال القصي في حالة البثق [31]. وأخيراً فإن الشكل (21) يبين نماذج من العينات المستخدمة في تقنية اللدونة المرئية لإيجاد الانفعال غير المتجانس الطولي.



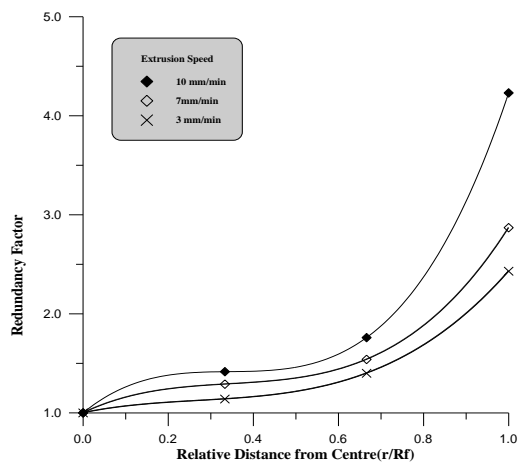
شكل (13) تغير الانفعال القصي خلال العينة لزاوية قالب 90° عند سرع مختلفة



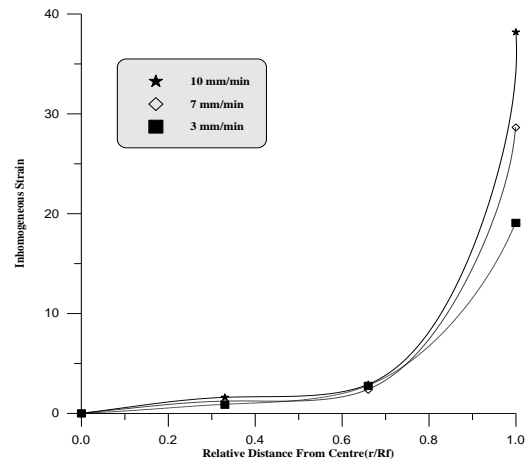
شكل (16) عامل فائضية الانفعال لقالب بزاوية 30° لسرع بثق مختلفة



شكل (14) تغير الانفعال القصي خلال العينة لزاوية قالب 120° عند سرع مختلفة



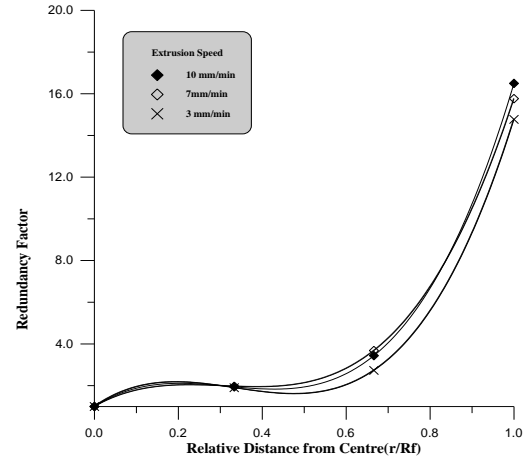
شكل (17) عامل فائضية الانفعال لقالب بزاوية 60° لسرع بثق مختلفة



شكل (15) تغير الانفعال القصي خلال العينة لزاوية قالب 150° عند سرع مختلفة



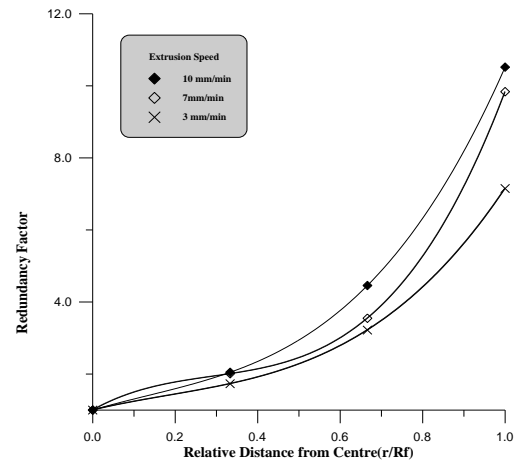
شكل (21- أ) عينة نصفية عند سرعة مدك 10 مم/د



شكل (18) عامل فانضية الانفعال لقالب بزاوية 90° لسرع بثق مختلفة



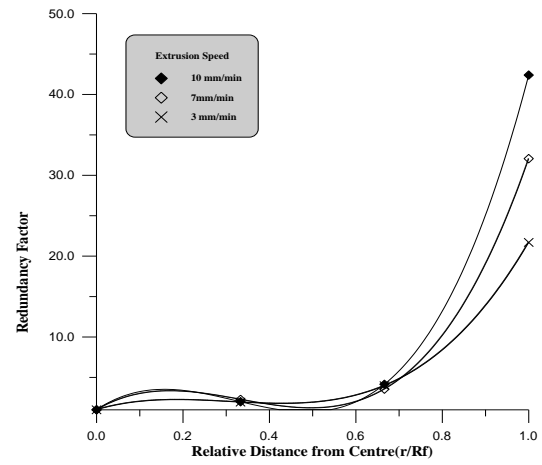
شكل (22- ب) عينة نصفية عند سرعة مدك 7 مم/د



شكل (19) عامل فانضية الانفعال لقالب بزاوية 120° لسرع بثق مختلفة



شكل (22- ج) عينة نصفية عند سرعة مدك 3 مم/د



شكل (20) عامل فانضية الانفعال لقالب بزاوية 150° لسرع بثق مختلفة

شكل (22) عينات اللدونة المرنية عند سرع مدك مختلفة وزاوية قالب قدرها 60°

- 9- Liu Gang, Zhou Jie, J. Duszczek, "Process Optimization Diagram Based on FEM Simulation for Extrusion of AZ31 Profile", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol.18, 247-251, 2008.
- 10- P. Tiernan, M. T. Hillery, B. Draganescu, M. Gheorghe, "Modeling of Cold Extrusion With Experimental Verification", Journal of Materials Processing Technology ", Vol.168, 360-366, 2005.
- 11- Mahesh Prakash , Pual W.Cleary , "Modeling of Cold Metal Extrusion Using SPH", Fifth International Conference on CDF in the Process Industries CSIRO Australia ,2006.
- 12- Betzalal Avitzur, "Metal Forming: Process and Analysis", McGraw, New York,1986.
- 13- Hung-kuk Oh, Byung-Woo Ryu,"Effects of Process Variables on the Deformation Filed in Extrusion Through Conical Dies", Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 11, 71-86, 1985.
- 14- Chen, P. C. T., Ling, F. F., "Upper bound solutions to axisymmetric extrusion problems", Int. J. Mech. Sci., vol.10, 863-879. 1968.
- 15- Zimerman, Z., Avitzur, B., "Metal flow through conical die" Trans. ASME, J. Eng.Ind..vol 92, 119-129, 1970.
- 16- Nagpal, V., "General kinematically admissible velocity fields for some axisymmetric metal forming problem", J. Eng. Ind, vol. 96, 1197-1201, 1974.
- 17- D. Y. Yang, C. H. Han and B. C. Lee, "The Use of Generalized Deformation Boundaries for the Analysis of Axisymmetric Extrusion through Curved Dies", Int. J. Mech. Sci, Vol.27, 653-663,1985.
- 18- Wang, J. P., Koa, W. E., Lee, H. D., Wang, J., "Analysis of 3D rolling forming with generalized rigid-plastic boundaries approach", J.Mater. Process. Technol. Vol. 204, 425-433, 2008.
- 19- Guo-Ming Huang, Jang-ping Wang, Hsien -Der Lee, Cheng-Sung Chang, "Rigid-Plastic Boundaries Approach to the Analysis of Arbitrary Profile Dies in Axisymmetric Extrusion", J. Materials Processing Technology, Vol.209, 4351-4359, 2009.
- 20- N. R. Chitkara, A. aleem, "Axi-symmetric Tube Extrusion -Piercing Using Die-Mandrel Combinations: Some Experiments and A Generalized Upper Bound Analysis" International Journal of

الاستنتاجات

إن أهم الاستنتاجات التي تم التوصل إليها من خلال البحث الحالي هي :

- 1 - تزداد طاقة القص بزيادة زاوية القالب وتقل طاقة الاحتكاك في حين أنها لا تؤثر على طاقة التشكيل الداخلية.
- 2- تراوحت زاوية القالب المثلى بين 35° و 90° في المجال المختلط و 46° في المجال ذو الحدود الجاسئة - اللدنة بينما كانت 60° حسب النتائج العملية.
- 3- قيم الطاقة الكلية المثلى المقابلة لقيم الزوايا المثلى المستخرجة من المجال ذو الحدود الجاسئة -اللدنة اقرب إلى القيم الحقيقية من القيم المستخرجة من المجال المختلط.
- 4- يزداد ضغط الذروة والانفعال القصي بزيادة زاوية القالب وسرعة المدك.
- 5- زيادة زاوية القالب يزيد من عدم تجانس توزيع الانفعال الأقصى عبر المقطع.

المصادر

- 1- George E. Dieter,"Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill, 1976.
- 2- K.Laue, H. Stenger, "Extrusion", American Society for Metals, 1981.
- 3- F. J. Gurney, V. Depierre, " The Influence of the Interface Condition on the Plastic Deformation Zone and the Resultant Product Integrity in Extrusion", Journal of Engineering for Industry, August 194,912-916, 1974.
- 4- C.C.Chen, S.I.Oh, S.Kobayashi,"Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing Part1: Deformation Mechanics of Extrusion and Drawing", Journal of Engineering for Industry ,Vol.101, 23-43, 1979.
- 5- Young Su Oh, "Extrusion of Axisymmetric Sections through Stream-lined and Conical Dies", A Master Thesis, Ohio University, 1987.
- 6- Al Salmani, Farouk Mansour, "Effect of Die Geometry on the Mechanism of Direct Extrusion and Properties of 1060 Al-Alloy" Ph. D. Dissertation UOT, Baghdad, 1999.
- 7- M. H. Skillingberg, R .F. Ashton, "Process-ing and Perfomance of Al-Li-Cu-x Extrusions", Journal De Physique, Colloque C3 ,Supplement au n 9,Tome 48, 179-186, 1987.
- 8- S. O. Onuh, M. Ekoja, M. B. Adeyemi, "Effects of Die Geometry and Extrusion Speed on The Cold Extrusion of Aluminum and Lead Alloys", Journal of Material Processing Technology ", Vol.132,274-285,2003.

- Zone Formation and Limit Analysis in Axially Symmetric Extrusion", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.43, 367-379, 2001.
- 27- A. F. Castle and T. Sheppard, "Pressure Required to Initiate Extrusion in Some Aluminum Alloys", Met. Tec., 465-475, 1976.
- 28- T. Sheppard, P. J. Tunnicliffe, S. J. Patterson, "Direct and Indirect Extrusion of High Strength Aerospace Alloy (AA 7075)", Journal of Mechanical Working Technology, Vol.6, 313-331, 1982.
- 29- M. J. Tan, T. Sheppard, "Extrusion processing of an Al-Li-Cu-Mg-Zr Alloy AA2091", 4th Int. Aluminum Lithium Conference, Paris (France), C33, 209-218, 10 – 12 June 1987.
- 30- R. K. Chin, P. S. Steif, "A Computational Study of Strain Inhomogeneity in Wire Drawing ", Int.j. Mech. Tools Manufact., Vol.35, 1087-1098, 1995.
- 31- A. Farzad, T. Z. Plazynski, "Geometry Factor and Redundancy Effects in Extrusion of Rod", Journal of Mechanical Working Technology, Vol.19, 357-372, 1989.
- Mechanical Sciences, Vol. 43, 1685 - 1709, 2001.
- 21- George E. Totten, D. Scott Mackenzie, "Handbook of Aluminum", Volume 1, Physical Metallurgy and Processes, Marcel Dekker, Inc, New York, 2003.
- 22- Hasan Sofuoglu, Hasan Gedikli, Jahan Rasty, " Determination of friction Coefficient by Employing the Ring Compression Test", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.12, 338-348, 2002.
- 23- Ozgur Kocak, "Analysis of the Formability of Metals", Master Thesis, Middle East Technical University, July 2003.
- 24- F. Ozturk, A. Sisman, S. Toros, S. Kilic, R. C. Picu, "Influence of Aging Treatment on Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy", Materials and Design, vol. 31, 972-975, 2010.
- 25- S. K. Sahoo, "An Analysis of Plastic Flow through Polygonal Linearly Converging Dies: As Applied to Forward Metal Extrusion", Journal of Material Processing Technology, Vol.132, 286-292, 2003.
- 26- S. Alexandrov, G. Mishuris, W. Miszuris, R. E. Sliwa, "On the Dead-