روش کرانه بالایی برای فرآیند اکستروژن مستقیم میله دو فلزه

باقر لطفی نسب [۱*]، ایمان گل شکوه [۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران
[۲] استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایذه، ایذه، ایران

دریافت: زمستان ۹۵ پذیرش: تابستان ۹۶

چکیده

هدف از انجام این پژوهش روش کرانه بالایی برای فرآیند اکستروژن مستقیم میله دو فلزه برای این فرآیند یک میدان سرعت استوانه‌ای که برای هر شکل قالبی قابل استفاده است، ارائه خواهد شد. ناحیه‌های تغییر شکل به سه قسمت تقسیم شده و توان داخلی تغییر شکل، توان برشی و توان اصطکاکی در این نواحی بر اساس روش کرانه فوقانی محاسبه شده و در نهایت نیرو و فشار متوسط اکستروژن محاسبه شده است. علاوه بر روش تئوری از روش المان محدود با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی اجزاء محدود (نرم افزار آباکوس) جهت تحلیل فرآیند استفاده خواهد شد . ابتدا مؤلفه‌های نرخ کرنش برای هر ناحیه محاسبه شده است که قاعدتاً با توجه به روابط موجود در این پژوهش، بعضی از عبارت‌ها صفر خواهد شد و محاسبه آنها ضرورتی ندارد.پس از آن توان داخلی برای ناحیه تغییر شکل محاسبه شده است.سپس توان برشی برای مرز ورودی و خروجی و در مرحله بعد، توان اصطکاکی تلف شده حاصل از تماس قالب با بیلت محاسبه شده است. حاصل جمع تمامی‌توان‌های بالا، توان کل مورد نیاز برای فرایند اکستروژن را به دست می‌دهد. و در پایان توان کل با تقسیم توان کل بر سرعت ورودی، نیروی شکل‌دهی لازم برای فرایند اکستروژن محاسبه شده است را با هم مقایسه می‌کنیم.نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد که تحلیل کرانه فوقانی و شبیه‌سازی به روش المان محدود فرآیند اکستروژن میله دو فلزی نتایج قابل قبولی ارائه داده‌اند.

[*] **عهده‌دار مکاتبات:** bagherlotfinasab@yahoo.com

کلمات کلیدی: *اکستروژن، کرنش، توان، کران فوقانی، المان محدود*

۱- مقدمه

صنعت اکستروژن دارای تاریخی بالغ بر ۱۵۰ سال است. اولین گزارش.رد از این فرآیند گزارشی از جوزف براماه و مربوط به سال ۱۸۷۰ میلادی است. این گزارش پرسی را شرح می داد که سرب ذوب شده یا دیگر را به داخل یک غالب استوانه ای پمپ می کرد. در سال ۱۸۲۰ توماس بور برای تولید لوله به وسیله اکستروژن پرسی هیدرولیکی ساخت و به وسیله آن سیلندرهای سربی ساخت. اکستروژن سرد فولاد برای اولین بار در اروپا در اواسط دهه ۱۹۳۰ شروع و بعضی از ساز برگهای نظامی مثل پوکه گلوله و غیره از فولاد تولید شد. در همین زمان توسط آلمانی ها نیز تحقیقاتی در زمینه اکستروژن سرد فولاد انجام شده بود که به دلیل حفظ اسرار نظامی تا سال ۱۹۲۴ آنها را به چاپ نرساندند. بعد از جنگ جهانی دوم ارتش امریکا توانست با اکستروژن سرد پوسته های فولادی و گلوله ۷۵ میلیمتری درست کند. آویتزور در سال ۱۹۶۳ کشش و اکستروژن سیم را از یک قالب مخروطی با زاویه کوچک [1] و سپس در سال ۱۹۶۴ با زاویه بزرگ [2]مورد بررسی قرار داد. وی در این مقالات تأثیر پارامترهای مختلف را بر نیروی کشش و اکستروژن بدست آورد.

ابراهیمی و همکاران [3] در سال ۲۰۰۸،تحلیل اکستروژن لوله در قالب با زاویه قائم را به روش کران بالا مطالعه کردند.ازاکادا و همکاران [4] در سال ۱۹۷۲ بر روی شکست میله دو فلزی در فرایند اکستروژن هیدرواستاتیکی مطالعاتی را انجام دادند.پنگ [5] در سال ۱۹۸۹ تحلیل کران بالای شکل هندسی ناحیه تغییر شکل یافته را در فرایند اکستروژن میله را مورد بررسی قرار داد.یانگ و همکاران [6] در سال ۱۹۹۱ به مطالعه و بررسی اکستروژن دو فلزی در قالب منحنی شکل به روش کران بالا پرداختند پونالاگوسامی و همکاران [7] در سال ۲۰۰۸ برروی جریان ماده در فرایند اکستروژن به کمک کامپیوتر مطالعه کردند. در تعریفی دیگر می‌توان گفت، اکستروژن یکی از فرایندهای شکل‌دهی است که در آن قطعه‌کار (بیلت)[1] با فشار از درون قالب (دای)[2] با سطح مقطع دلخواه عبور داده شده و شکل قالب را به خود می‌گیرد. در این حالت قطعه‌کار تحت تنش‌های فشاری تغییر شکل پلاستیک یافته و در قالب سیلان پیدا

[1] Billet
[2] Die

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

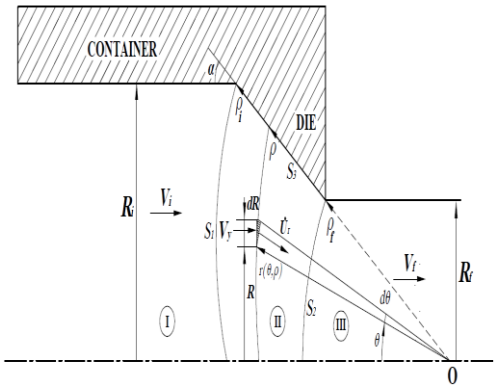
می‌کند. این فرایند می‌تواند به‌صورت داغ[3] یا سرد[4] انجام بگیرد. در فرایند اکستروژن داغ، قطعه‌کار قبل از عبور از قالب، بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم می‌شود تا بدین وسیله تغییر شکل پلاستیک و سیلان ماده راحت‌تر انجام بگیرد. برای انجام فرایند اکستروژن دو روش اساسی وجود دارد: اکستروژن مستقیم[5] و اکستروژن غیرمستقیم[6] [8]

۲-فرآیند اکستروژن میله

در تحلیل کرانه‌ی بالایی فرآیند اکستروژن متقارن محوری فرضیات زیر لحاظ می‌شود:

- فرآیند متقارن محوری می‌باشد.
- پانچ و محفظه قالب، صلب در نظر گرفته شده‌اند.
- قطر محفظه قالب برابر با قطر خارجی پوسته بیلت می‌باشد.
- ماده همگن، غیرقابل تراکم بوده و از قانون جریان فون میسز پیروی می‌کند.
- در تحلیل، رفتار ماده صلب - پلاستیک با تنش تسلیم متوسط در نظر گرفته شده است.
- سرعت دو ماده در خروج از قالب یکسان فرض شده است.

شکل ۱ شماتیک کلی فرایند اکستروژن تک فلزی با قالب مخروطی را نشان می‌دهد. بیلتی که برای این فرآیند در نظرگرفته شده است، میله‌ای با شعاع ورودی R_i وشعاع خروجی R_f می‌باشد. در شکل زیر V_i سرعت ورودی و V_f سرعت خروجی می‌باشد. α نیم زاویه‌ی قالب و حرف S نشان دهنده‌ی مرزها است. علاوه براین شکل به سه ناحیه تقسیم شده است. همان‌گونه که در شکل واضح است، میله پس از خروج از قالب شعاع آن کم و طول آن زیاد می‌گردد.



شکل۱- فرآیند اکستروژن میله تک فلزی، پارامترهای هندسی و نواحی تغییر شکل آن.

۳-میدان‌های سرعت[7]مجاز در نواحی تغییر شکل

میدان سرعتی که برای تحلیل جریان متقارن محوری ماده از قالب مخروطی استفاده شده است، میدان سرعت کروی[8] نامیده می‌شود. اولین گام در تحلیل کرانه فوقانی، پیشنهاد یک میدان مجاز سرعت می‌باشد. در این فرآیند برای ارائه میدان سرعت مجاز، دستگاه مختصات کروی (r,θ,ϕ) به‌کار گرفته شده و مبدأ مختصات (نقطه O در شکل۱) محل برخورد قالب مخروطی با محور افقیمی‌باشد.

حل کرانه‌ی بالایی با یافتن توان کل مورد نیاز فرآیند اکستروژن انجام می‌پذیرد.چگونگی یافتن توان کل مورد نیاز فرآیند درفرمول بندی زیر،که بر اساس یک میدان سرعت جنبشی مجاز به‌دست‌آمده است،بیان شده است.بنابراین حدس یک میدان سرعت مناسب، فشار اکستروژن، جریان فلز و شکل بهینه‌ی قالب را تحت تأثیر قرار می‌دهد.همان‌طور که در شکل۱ نشان داده شده است،ماده به سه ناحیه تقسیم می‌شود که در این نواحی میدان سرعت پیوسته می‌باشد. در ناحیه‌یI ماده صلب است و بخشی از ماده‌ی اولیه می‌باشد و مانند یک جسم صلب در جهت اکستروژن حرکت می‌کند.ناحیه‌یIIمنطقه‌ی تغییر شکل فلز می‌باشد و ناحیه‌یIII محصول فرآیند اکستروژن می‌باشد که مانند ناحیه‌ی اول به‌صورت جسم صلب حرکت می‌کند و بدون تغییر شکل می‌باشد.

با استفاده از ثابت بودن حجم خواهیم داشت :

$$V_i = \frac{R_f^2}{R_i^2} V_f \qquad (۱)$$

مرز خروجی ناحیه‌ی تغییر شکل با ρ_f نشان داده می‌شود و به‌صورت کروی فرض می‌شود.سطحی که مرکز آن رأس مخروطی قالب (نقطه O در شکل۱) در مختصات کروی (r,θ,φ) می‌باشد، و با استفاده از معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

$$r_f = \rho_f = \frac{R_f}{\sin\alpha} \qquad (۲)$$

تابع مرز برشی ورودی به‌صورت بخشی از سطح نمایی فرض می‌شودکه رابطه‌ی آن به‌صورت زیر ارائه می‌شود[۲]:

$$r(\theta,\rho_i) = \rho_i \exp[\frac{b(\theta-\alpha)}{\alpha}] \qquad (۳)$$

پارامترbپارامتر هندسی شکل در مرز ورودی ناحیه تغییر شکل II می‌باشد، که مقدار آن شکل مرز ورودی را تعیین می‌نماید. مقدارbمی‌تواند مثبت،منفی یا صفر باشد.

مقدارb اگر منفی باشد، مرز ورودی از مرکزO دور می‌شود و اگر مقدارb مثبت باشد، مرز ورودی به مرکزOنزدیک می‌شود و زمانی‌که

[3] Hot Extrusion
[4] Cold Extrusion
[5] Direct Extrusion
[6] Indirect Extrusion

[1] Velocity field
[2] Spherical velocity field

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

مقدار bصفر باشد، مرز ورودی به‌صورت یک سطح کروی است.(g=1)،معادله‌ی (۳).

معادله۳ با توجه به پیشنهاد ارائه شده توسط پنگ [9] برای سطح برشی جریان فلز از طریق قالب مخروطی می‌باشد.

تابع مرز برشی برای مؤلفه‌های محوری سرعت در منطقه‌ی تغییر شکل به‌صورت زیر بیان می‌شود :

(۴)

$$r(\theta,\rho)=\rho\exp[\frac{b(\theta-\alpha)}{\alpha}\frac{\rho-\rho_f}{\rho_i-\rho_f}]=\rho g(\theta,\rho)$$

g مؤلفه‌ی محوری دلخواه سرعتمی‌باشدو به‌صورت زیر بیان می‌شود :

$$g(\theta,\rho)=\exp[\frac{b(\theta-\alpha)}{\alpha}\frac{\rho-\rho_f}{\rho_i-\rho_f}] \qquad (۵)$$

برای سادگی بیان عبارت‌ها $g(\theta,\rho)$ و $r(\theta,\rho)$ به‌طور مختصربه‌صورت g و r نوشته می‌شوند.

میدان سرعت کلی برای جریان مواد در منطقه‌ی تغییر شکل با توجه به قانون تراکم ناپذیری به دست می‌آید.قانون تراکم ناپذیری در مختصات کروی با استفاده از رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\varepsilon}_{rr}+\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}+\dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi}=0 \qquad (۶)$$

۳-۱-میدان سرعت در ناحیه‌ی اول (I)

این ناحیه شامل قسمتی از ماده است که هنوز وارد قالب نشده است. در این ناحیه ماده با سرعت ثابت V_i در راستای محور قالب به طرف ورودی قالب در حرکت است. در این ناحیه، تغییر شکلی رخ نمی‌دهد و ماده همانند جسم صلب حرکت می‌کند. با توجه به تقارن محوری هندسه واضح است که در راستای ϕ مؤلفه سرعتی وجود ندارد. چنانچه بردار سرعت محوری دو ماده در این نواحی در راستای r و θ تجزیه شود، میدان سرعت برابر است با:

$$\dot{U}_r=-U_i\cos\theta$$
$$\dot{U}_\theta=U_i\sin\theta$$
$$\dot{U}_\varphi=0 \qquad (۷)$$

۳-۲- معادلات

این ناحیه همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، شامل قسمتی از میله است که توسط نواحی S_1، S_2 و S_3 محصور می‌باشد. در این ناحیه قطر میله کاهش می‌یابد و بنابراین این ناحیه، ناحیه‌ی تغییر شکل نامیده می‌شود. برای یافتن مؤلفه‌ی محوری سرعت در این ناحیه لازم است که از تعادل جریان حجم در مرز S_1 استفاده شود. بنابراین رابطه‌ی ۸ از برابر قرار دادن جریان‌های حجم در دو سمت مرز S_1 به‌دست‌آمده است.

$$V_y\,2\pi R(dR)=-\dot{U}_r\,2\pi r\sin\theta(r\,d\theta) \qquad (۸)$$

با ساده سازی عبارت بالا مؤلفه‌ی شعاعی سرعت به‌صورت زیر به دست می‌آید:

(۹)

$$\dot{U}_r=-\frac{V_y}{r}\frac{dR}{d\theta}=-V_i(\frac{\rho_i}{\rho})^2(\cos\theta+\frac{1}{g}\frac{\partial g}{\partial\theta}\sin\theta)$$

ازآنجایی‌که در حالت متقارن محوری اکستروژن میله رابطه‌ی ۱۰ به‌صورت زیر برقرار است:

$$\dot{U}_\varphi=0 \qquad (۱۰)$$

و روابط کلی مؤلفه‌های نرخ کرنش به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\dot{\varepsilon}_{rr}=\frac{\partial\dot{U}_r}{\partial r}$$
$$\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}=\frac{1}{r}\frac{\partial\dot{U}_\theta}{\partial\theta}+\frac{\dot{U}_r}{r}$$
$$\dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi}=\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial\dot{U}_\varphi}{\partial\varphi}+\frac{\dot{U}_r}{r}+\frac{\dot{U}_\theta}{r}\cot\theta \qquad (۱۱)$$
$$\dot{\varepsilon}_{r\theta}=\frac{1}{2}(\frac{\partial\dot{U}_\theta}{\partial r}-\frac{\dot{U}_\theta}{r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\dot{U}_r}{\partial\theta})$$
$$\dot{\varepsilon}_{\theta\varphi}=\frac{1}{2}(\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial\dot{U}_\theta}{\partial\varphi}+\frac{1}{r}\frac{\partial\dot{U}_\varphi}{\partial\theta}-\frac{\cot\theta}{r}\dot{U}_\varphi)$$
$$\dot{\varepsilon}_{\varphi r}=\frac{1}{2}(\frac{\partial\dot{U}_\varphi}{\partial r}-\frac{\dot{U}_\varphi}{r}+\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial\dot{U}_r}{\partial\varphi})$$

بنابراین با جایگذاری روابط ۹ و ۱۰ در رابطه‌ی ۱۱ مؤلفه‌ی سرعت $\dot{U}_\theta$ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{U}_\theta=V_i\frac{\rho_i^2}{\rho}\frac{\partial g}{\partial r}\sin\theta \qquad (۱۲)$$

در رابطه‌ی بالا $\frac{\partial g}{\partial r}$ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

(۱۳)

$$\frac{\partial g}{\partial r}=\frac{\partial g}{\partial \rho}\frac{\partial \rho}{\partial r}=\frac{b(\theta-\alpha)}{\alpha}\frac{1}{\rho_i-\rho_f}\frac{1}{1+\frac{b(\theta-\alpha)}{\alpha}\frac{\rho}{\rho_i-\rho_f}}$$

بنابراین مؤلفه‌های سرعت در ناحیه تغییر شکل به‌طور جمع بندی شدهدر ناحیه‌ی IIبه‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\dot{U}_r=-\frac{V_y}{r}\frac{dR}{d\theta}=-V_i\left(\frac{\rho_i}{\rho}\right)^2\left(\cos\theta+\frac{1}{g}\frac{\partial g}{\partial\theta}\sin\theta\right)$$

$$\dot{U}_\varphi=0 \qquad (۱۴)$$

$$\dot{U}_\theta=V_i\frac{\rho_i^2}{\rho}\frac{\partial g}{\partial r}\sin\theta$$

۳-۳- جدولها، شکل‌ها، دیاگرام‌ها و تصاویر

این ناحیه شامل قسمتی از ماده است که در ناحیه‌ی II تغییر شکل یافته و از قالب خارج شده است. مرز این ناحیه سطح S_2 است. در این ناحیه ماده با سرعت ثابت V_f در راستای محور قالب از قالب خارج می‌شود. در این ناحیه، تغییر شکلی رخ نمی‌دهد و ماده مانند جسم صلب تغییر مکان می‌دهد. با توجه به تقارن محوری هندسه واضح است که در راستای ϕ مؤلفه سرعتی وجود ندارد. چنانچه بردار سرعت محوری ماده در این نواحی در راستای r و θ تجزیه شود، میدان سرعت برابر است با:

$$\dot{U}_r=-\dot{U}_f\cos\theta$$

$$\dot{U}_\theta=\dot{U}_f\sin\theta$$

$$\dot{U}_\varphi=0 \qquad (۱۵)$$

۴-مؤلفه‌های نرخ کرنش

پس از یافتن مؤلفه‌های میدان سرعت در همه‌ی نواحی تشکیل‌دهنده‌ی میله، مرحله‌ی بعد یافتن مؤلفه‌های نرخ کرنش می‌باشد. برای یافتن مؤلفه‌های نرخ کرنش کافی است مؤلفه‌های سرعت را در رابطه‌ی کلی ۱۱ جایگذاری نماییم.

۴-۱- مؤلفه‌های نرخ کرنش در ناحیه‌ی اول(I)

با توجه به توضیحات ذکرشده در بالا مؤلفه‌های نرخ کرنش در این ناحیه به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\varepsilon}_{rr}=0$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}=0$$

$$\dot{\varepsilon}_{\phi\phi}=0 \qquad (۱۶)$$

$$\dot{\varepsilon}_{r\theta}=0$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta\phi}=0$$

$$\dot{\varepsilon}_{\phi r}=0$$

۴-۲-مؤلفه‌های نرخ کرنش در ناحیه‌ی دوم(II)

مؤلفه‌های نرخ کرنش با جایگذاری رابطه‌ی ۱۴ در رابطه‌ی ۱۱ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

(۱۷)

$$\dot{\varepsilon}_{rr}=-V_i\frac{\rho_i^2}{\rho^3}\frac{1}{g^2}\left[2\left(\rho\frac{\partial g}{\partial r}-1\right)g\cos\theta+\left(-2\frac{\partial g}{\partial\theta}+\rho\frac{\partial g}{\partial r}\frac{\partial g}{\partial\theta}+g\rho\frac{\partial^2 g}{\partial r\partial\theta}\right)\sin\theta\right)]$$

(۱۸)

$$\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}=V_i\left(\frac{\rho_i}{\rho}\right)^2\frac{1}{g}\left[\left(\frac{\partial^2 g}{\partial r\partial\theta}-\frac{1}{g}\frac{\partial g}{\partial\theta}\right)\sin\theta+\left(\frac{\partial g}{\partial r}-\frac{1}{\rho}\right)\cos\theta\right]$$

(۱۹)

$$\dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi}=V_i\left(\frac{\rho_i}{\rho}\right)^2\frac{1}{g}\left[\left(-\frac{1}{\rho}+\frac{\partial g}{\partial r}\right)\cos\theta+\frac{1}{g}\frac{\partial g}{\partial\theta}\sin\theta\right]$$

(۲۰)

$$\dot{\varepsilon}_{r\theta}=\frac{1}{2}V_i\left(\frac{\rho_i}{\rho}\right)^2\frac{1}{g}\left\{\left[-2\frac{\partial g}{\partial r}+\rho\left(\frac{\partial g}{\partial r}\right)^2+\rho g\frac{\partial^2 g}{\partial r^2}+\frac{1}{\rho}\left[-1-\frac{1}{g^2}\left(\frac{\partial g}{\partial\theta}\right)^2+\frac{1}{g}\frac{\partial^2 g}{\partial\theta^2}\right]\right]\sin\theta+\frac{1}{\rho}\frac{1}{g}\frac{\partial g}{\partial\theta}\cos\theta\right\}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta\phi}=0$$

(۲۱)

$$\dot{\varepsilon}_{\phi r}=0$$

(۲۲)

۴-۳-مؤلفه‌های نرخ کرنش در ناحیه‌ی سوم (III)

مؤلفه‌های نرخ کرنش در این ناحیه با جایگذاری رابطه‌ی۱۵ در رابطه‌ی۱۱ به‌صورت زیر به‌دست‌آمده است:

$$\dot{\varepsilon}_{rr}=0$$

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

$$\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}=0$$

$$\dot{\varepsilon}_{\phi\phi}=0$$

$$\dot{\varepsilon}_{r\theta}=0$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta\phi}=0$$

$$\dot{\varepsilon}_{\phi r}=0$$

(۲۳)

با توجه به این موضوع که در ناحیه‌ی I وIII ماده به‌صورت یک جسم صلب در حرکت است، بنابراین واضح است که کرنش یا به‌طورکلی تغییر شکلی در این نواحی رخ نمی‌دهد. پس روابط به‌دست‌آمده برای نرخ کرنش‌ها در روابط ۱۶ و ۲۳ کاملاً منطقی است.

۵-محاسبه‌ی مؤلفه‌های توان و نیروی شکل‌دهی

توان کل مورد نیاز برای تغییر شکل فرایند را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود :

- توان داخلی تغییر شکل
- توان برشی تلف شده در سطوح ناپیوستگی سرعت
- توانتلف شده به دلیل اصطکاک فلز با قالب در طول سطح تماس

بنابراین، با توجه به شکل ۱توان کل برابر با حاصل جمع توان داخلی منطقه‌ی تغییر شکل II،توان تلف شدهدر مرزهایناپیوستگی سرعت S_1 و S_2 و توان اصطکاکی تلف شدهدر سطح S_3 می‌باشد.

۵-۱-توان داخلی

رابطه‌ی کلی توان داخلی در نواحی تغییر شکل به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W}_i=\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_0\int_V\sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}\,dV \qquad (۲۴)$$

همان‌طور که از روابط (۱۶) و (۲۳) مشخص است، مقدار توان داخلی تغییر شکل در نواحی اول و سوم برابر با صفر است، زیرا همان‌طور که پیش‌تر گفته شد ماده در این نواحی به‌صورت صلب حرکت می‌کند و تغییر شکلی در آن به‌وجود نمی‌آید:

$$\dot{W}_{i1}=\dot{W}_{i3}=0 \qquad (۲۵)$$

توان داخلی در ناحیه‌ی دوم با استفاده از رابطه‌ی۲۴ به دست می‌آید. dV المان حجم در منطقه‌ی تغییر شکل می‌باشد و به‌صورت زیر به‌دست‌آمده است:

$$dV=2\pi\rho^2 g^2(g+\rho\frac{\partial g}{\partial\rho})\sin\theta\,d\theta\,d\rho \qquad (۲۶)$$

بنابراین، رابطه‌ی توان داخلی در ناحیه‌ی تغییر شکل به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W}_i=\frac{4\pi}{\sqrt{3}}\sigma_0\int_{\rho_f}^{\rho_i}\int_0^{\alpha}\sqrt{\frac{3}{4}\dot{\varepsilon}_{rr}^2+\dot{\varepsilon}_{r\theta}^2}\,\rho^2 g^2(g+\rho\frac{\partial g}{\partial\rho})\sin\theta\,d\theta\,d\rho \qquad (۲۷)$$

در رابطه‌ی بالا σ_0 تنش شارش میانگین بیلت می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_0=\frac{\int_0^{\varepsilon}\sigma\,d\varepsilon}{\varepsilon},\qquad \varepsilon=\ln\frac{R_i^{\,2}}{R_f^{\,2}} \qquad (۲۸)$$

۵-۲-توان برشی

رابطه‌ی کلی توان برشی، در سطوح ناپیوستگی سرعت به‌طورکلی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W}_S=\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\int_{S_v}|\Delta v|\,dS \qquad (۲۹)$$

ازآنجایی‌که در اکستروژن میله‌ی تک فلزی دو سطح ناپیوستگی سرعت وجود دارد بنابراین دو مقدار توان برشی وجود دارد که مقدار آن‌ها با توجه به روابطی که در زیر بیان می‌شود، معلوم می‌گردد.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

مقدار ناپیوستگی‌های سرعت در امتداد سطح S_1 به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

$$|\Delta v_1| = V_i \sqrt{1+(\frac{b}{\alpha})^2}\,(1-\rho_i \frac{\partial g}{\partial r}\Big|_{\rho=\rho_i})\sin\theta \qquad (۳۰)$$

هم‌چنین المان سطح به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$dS_1 = 2\pi\rho_i^2 g^2(\theta,\rho_i)\sqrt{1+(\frac{b}{\alpha})^2}\,\sin\theta d\theta \qquad (۳۱)$$

از رابطه‌ی۳۱، و هم‌چنین مقدار ناپیوستگی سرعت dS_1 با جایگذاری دررابطه‌ی۲۹ و پس از ساده سازی، خواهیم داشت:

$$\dot{W}_{S1} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}}\sigma_0\rho_i^2 V_i[1+(\frac{b}{\alpha})^2]\int_0^{\alpha}(1-\rho_i\frac{\partial g}{\partial r}\Big|_{\rho=\rho_i})g^2(\theta,\rho_i)\sin\theta d\theta \qquad (۳۲)$$

برای سطح برشی S_2 ، مقدار ناپیوستگی سرعت به‌صورت زیر می‌باشد:

$$|\Delta v_2| = V_f\,(1-\rho_f\,\frac{\partial g}{\partial r}\Big|_{\rho=\rho_f})\sin\theta \qquad (۳۳)$$

و هم‌چنین:

$$dS_2 = 2\pi(\rho_f\,\sin\theta)\rho_f\,d\theta \qquad (۳۴)$$

بنابراین توان برشی تلف شده در امتداد مرز S_2 به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W}_{S2} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}}\sigma_0 V_f\,\rho_f^2\int_0^{\alpha}(1-\rho_f\,\frac{\partial g}{\partial r}\Big|_{\rho=\rho_f})\sin^2\theta d\theta \qquad (۳۵)$$

بنابراین کل توان برشی کل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{W}_S = \dot{W}_{S1} + \dot{W}_{S2} \qquad (۳۶)$$

۵-۳- توان اصطکاکی

توان اصطکاکی تلف شده روی مرزهای اصطکاکی به‌طورکلی با استفاده از رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{W}_f = m\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\int_{S_f}|\Delta v|\,dS \qquad (۳۷)$$

برای یافتن توان اصطکاکی که در طول تماس بیلت با قالب مخروطی از دست می‌رود، مقدار ناپیوستگی‌های سرعت به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$|\Delta v_3| = V_i\,(\frac{\rho_i}{\rho})^2\,(\cos\alpha + \frac{b}{\alpha}\frac{\rho-\rho_f}{\rho_i-\rho_f}\sin\alpha) \qquad (۳۸)$$

علاوه بر این dS_3 به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$dS_3 = 2\pi\rho\sin\alpha\,d\rho \qquad (۳۹)$$

بنابراین با جایگذاری رابطه‌ی ۳۸ و ۳۹ در رابطه‌ی ۳۷، توان اصطکاکی در طول تماس قالب با بیلت به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W}_f = \frac{2\pi}{\sqrt{3}}m\sigma_0 V_i\rho_i^2\sin\alpha\int_{\rho_f}^{\rho_i}\frac{1}{\rho}(\cos\alpha+\frac{b}{\alpha}\frac{\rho-\rho_f}{\rho_i-\rho_f}\sin\alpha)d\rho \qquad (۴۰)$$

۵-۴-نیروی شکل‌دهی

ازآنجایی‌که توان کل با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W}_{ext} = F_e V_i \qquad (۴۱)$$

F_e نیروی شکل‌دهیمورد نیاز برای فرآیند اکستروژن تک فلزی می‌باشد. با توجه به روش معمول کرانه‌ی بالایی، توان داخلی $\dot{W}_{ext}$ برابر با حاصل جمع تمام توان‌های مصرفی می‌باشد و بنابراین نیروی شکل‌دهی مورد نیاز برای انجام فرآیندبه‌صورت زیر بیان می‌شود:

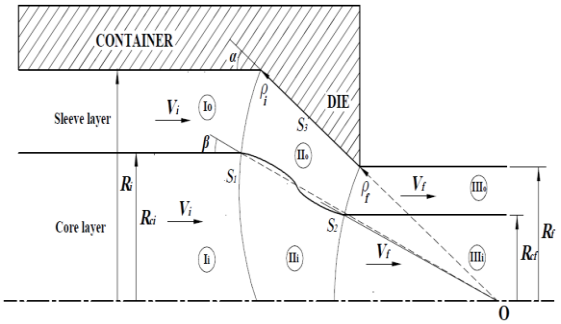
$$F_e = \frac{\dot{W}_i + \dot{W}_{S1} + \dot{W}_{S2} + \dot{W}_f}{V_i} \qquad (۴۲)$$

معادله‌ی بالا نشانمی‌دهدکه نیروی مورد نیاز برای فرایند اکستروژن میله تابعی است از پارامترهایی همچون شعاع اولیه‌ی بیلت،شعاع نهایی میله، ثابت‌های اصطکاک، نیم زاویه‌ی قالب، پارامتر مرتبط با میدان سرعت و مقدار bکه شکل مرزهای ورودی منطقه‌ی تغییر شکل را تعیین می‌کند. بنابراین،کم‌ترین مقدار به‌دست‌آمده از معادله‌ی بالا نسبت به پارامتر b،کم‌ترین نیروی مورد نیاز برای فرایند اکستروژن را به‌دست می‌دهد. بنابراین کم‌ترین مقدار نیروی اکستروژن با توجه به مؤلفه‌ی

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

شکل مرزی تعیین می‌شود.کم‌ترین مقدار b توان اکستروژن کل را تعیین می‌کند.

فرآیند اکستروژن دو فلزه نیر به همین شکل بوده و برای فلز دوم اندیس مربوطه قرار داده شده و روابط فوق عیناً تکرار می‌شوند.



شکل (۱) فرآیند اکستروژن میله دو فلزی، پارامترهای هندسی و نواحی تغییر شکل آن.[11]

۶-بحث و نتایج

ابعاد بیلت برای انجام این آزمایش که بکار رفته ، هسته از جنس آلومینیوم و پوسته از جنس مس می‌باشد. هسته‌ی آلومینیمی میله‌ای است با طول ۶۰ میلی‌متر و شعاع ۹ میلی‌متر و پوسته‌ی مسی لوله‌ای با طول ۶۰ میلی‌متر و شعاع ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. ضریب ثابت اصطکاک بین پوسته و قالب $m = 0.2$ می‌باشد.

مشخصات مکانیکی هسته‌ی آلومینیمی و پوسته‌ی مسی به‌صورت جدول‌های زیر داده شده است[10]

جدول ۱- مشخصات مکانیکی آلومینیم

چگالی	مدول یانگ	تنش تسلیم	رابطه تنش-کرنش	ضریب پواسون
2710 kg/m3	71 Gpa	95Mpa	$\sigma_{Al} = 189.2\,\varepsilon^{0.239}$	0.3

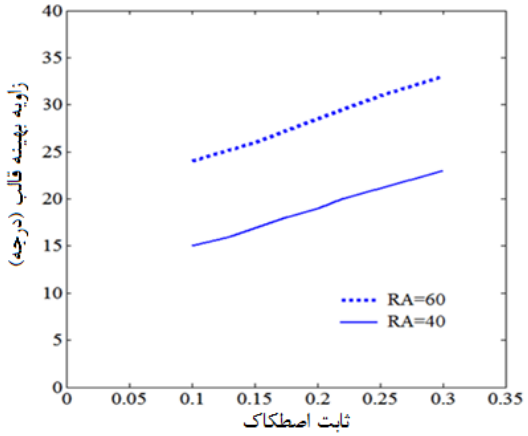
جدول ۲- مشخصات مکانیکی مس

چگالی	مدول یانگ	تنش تسلیم	رابطه تنش-کرنش	ضریب پواسون
8960 kg/m^3	117 Gpa	260 Mpa	$\sigma_{Cu} = 335.2\,\varepsilon^{0.113}$	0.35

۶-۱- تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروی اکستروژن و پارامتر شکل هندسی

۶-۱-۱- اثر درصد کاهش سطح مقطع و ضریب ثابت اصطکاک بر مقدار بهینه‌ی نیم زاویه‌ی قالب

در شکل (۲) منحنی تغییرات مقدار بهینه‌ی نیم زاویه‌ی قالب بر حسب ضریب ثابت اصطکاک با تغییر درصد کاهش سطح مقطع نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، مقدار بهینه‌ی نیم زاویه‌ی قالب افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش ضریب اصطکاک برشی، مقدار بهینه‌یزاویه‌ی قالب افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، قطر خروجی کاهش یافته و متناسب با آن مقدار بهینه‌یزاویه‌ی قالب افزایش می‌یابد.



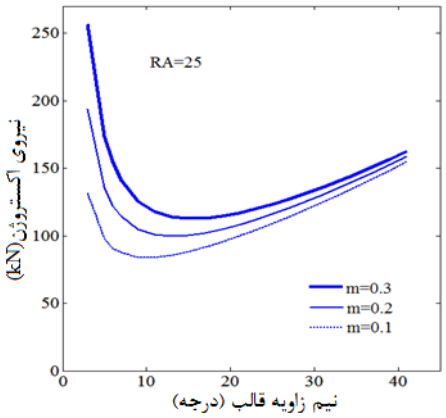
شکل(۲) اثر درصد کاهش سطح مقطع بر زاویه‌یبهینه‌ی قالب.

۶-۱-۲- اثر نیمزاویه‌ی قالب و ضریب ثابت اصطکاک بر نیروی اکستروژن

در شکل(۳) منحنی تغییرات نیروی اکستروژن بر حسب نیم زاویه‌ی قالب با تغییر ثابت اصطکاک بین پوسته و قالب در صورت ثابت بودن درصد کاهش سطح مقطع، نشان داده شده است. با افزایش مقدار ثابت اصطکاک بین پوسته و قالب، مقدار نیروی اکستروژن افزایش می‌یابد. هم‌چنینمی‌توان نتیجه گرفت که در زوایای بزرگ قالب، تأثیرضریب ثابت اصطکاک در سطح بین پوسته و قالب اثری بر نیروی اکستروژن ندارد، درحالی‌که در زوایای کوچک قالب، نیروی اکستروژن با افزایش ضریب ثابت اصطکاک، در صورت ثابت بودن درصد کاهش سطح مقطع، کاهش می‌یابد. دلیل تغییرات عنوان شده در بالا به این دلیل است که در زوایای کوچک، سطح تماس اصطکاکی بیش‌تر است، بنابراین با افزایش ضریب ثابت اصطکاک در صورت ثابت بودن درصد کاهش سطح مقطع، توان اصطکاکی افزایش یافته و متناسب با آن نیروی اکستروژن افزایش می‌یابد. ولی در زوایای بزرگ، ازآنجایی‌که سطح تماسی اصطکاکی به نسبت کم‌تر

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

است، بنابراین در صورت ثابت بودن درصد کاهش سطح مقطع، تغییرات نیروی اکستروژن چشم‌گیرنمی‌باشد.

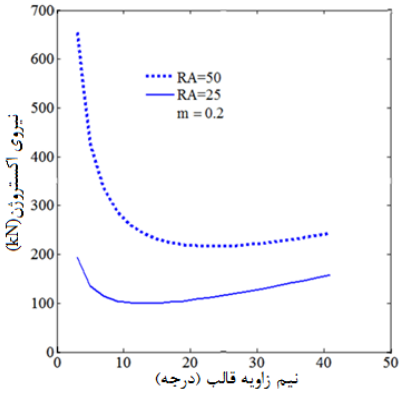


شکل (۳) اثر ضریب ثابت اصطکاک بر نیروی اکستروژن.

۶-۱-۳- اثر درصد کاهش سطح مقطع و نیم زاویه‌ی قالب بر نیروی اکستروژن

در شکل (۴) منحنی تغییرات نیروی اکستروژن بر حسب نیم زاویه‌ی قالب با تغییر در صد کاهش سطح مقطع و در صورت ثابت بودن ضریب ثابت اصطکاک، نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، مقدار بهینه‌ی نیم زاویه‌ی قالب کاهش می‌یابد. هم‌چنینمی‌توان نتیجه گرفت که در زوایای بزرگ، تغییر درصد کاهش سطح مقطع تأثیر چندانی بر روی نیروی اکستروژن نخواهد داشت. درحالی‌که در زوایای کم، نیروی اکستروژن با افزایش میزان درصد کاهش سطح مقطع در صورت ثابت بودن ضریب ثابت اصطکاک، کاهش می‌یابد.

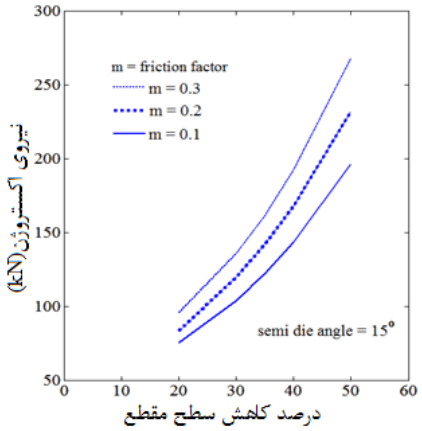
زیرا با افزایش نیم زاویه‌ی قالب علاوه بر این‌که طول سطح تماسی قالب با بیلت کاهش می‌یابد، بیلت با آزادی عملبیش‌تر به سمت جلو حرکت می‌کند.



شکل (۴) اثر درصد کاهش سطح مقطع بر نیروی اکستروژن.

۶-۱-۴- اثر درصد کاهش سطح مقطع و ضریب ثابت اصطکاک بر نیروی اکستروژن

در شکل (۵) منحنی تغییرات نیروی اکستروژن بر حسب درصد کاهش سطح مقطع با تغییرضریب ثابت اصطکاک و در صورت ثابت بودن نیم زاویه‌ی قالب، نشان داده شده است.همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب ثابت اصطکاک، نیروی اکستروژن افزایش می‌یابد. علاوه بر اینمی‌توان این نتیجه را گرفت که با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، نیروی اکستروژن روندی افزایش خواهد داشت. زیرا با افزایش ضریب ثابت اصطکاک، نیروی تلف شده‌ی اصطکاک بالا رفته و متناسب با آن نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد و با افزایش درصد کاهش سطح مقطع و در صورت ثابت بودن نیم زاویه‌ی قالب شعاع خروجی کم‌تر شده و نیروی بیش‌تری برای شکل‌دهی لازم می‌شود.

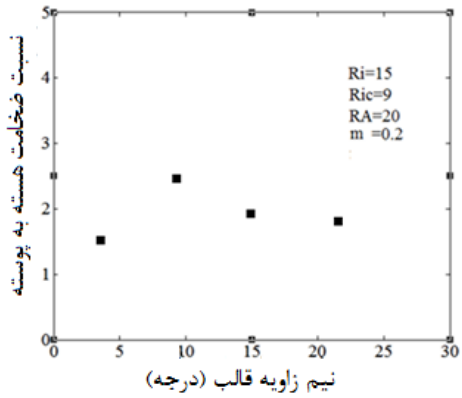


شکل(۵) اثرضریبثابت اصطکاک بر نیروی اکستروژن.

۶-۱-۵-اثرتغییرات نیم زاویه‌ی قالب بر نسبت ضخامت هسته به ضخامت پوسته‌ی محصول

شکل(۶)منحنی تغییرات نسبت ضخامت هسته به ضخامت پوسته در حالت خروج از قالب، با استفاده از روش شبیه سازی با نرم‌افزار آباکوس برای بیلت مقاله[10] رسم شده است.همان‌گونه که در شکل پیداست منحنی ابتدا حالت صعودی دارد و پس‌ازآن کاهش می‌یابد. با توجه به شکل(۴) و مقایسه‌ی آن با شکل(۶) مشاهده می‌شود که بیش‌ترین مقدار نسبت ضخامت هسته به پوسته‌ی محصول در نیم زاویه‌یبهینه‌ی قالب به‌دست می‌آید.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

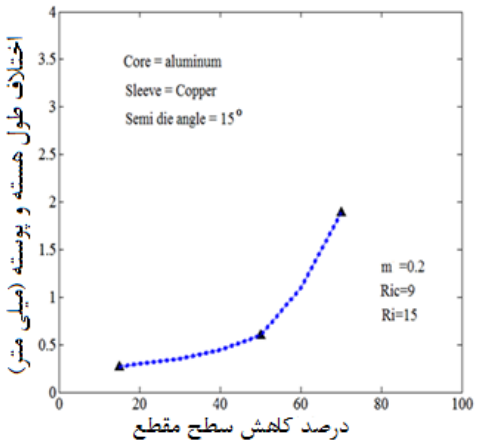


شکل(۶)ضخامت هسته به پوسته‌ی محصول نسبت به تغییرات نیم زاویه‌ی قالب.

۶-۱-۶-اثرتغییرات کاهش سطح مقطع بر اختلاف طول هسته و پوسته‌ی محصول

شکل (۷) منحنی اثر تغییرات کاهش سطح مقطع نسبت به اختلاف طول هسته و پوسته‌ی محصول برای نیم زاویه‌ی قالب ۱۵ درجه و بیلت [10]، با استفاده از روش شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل منحنی مشخص است، نمودار روندی کاملاً صعودی دارد و می‌توان این صعودی بودن نمودار را این‌گونه توجیه نمود که با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، و ثابت بودن زاویه‌ی قالب به دنبال آن افزایش طول قالب را خواهیم داشت و به دلیل افزایش طول قالب، سطح اصطکاکی بین قالب و پوسته افزایش می‌یابد و این امر باعث می‌شود تا توان اصطکاکیبیش‌تر شده و پوسته به طبع دیرتر از هسته از قالب خارج شود.

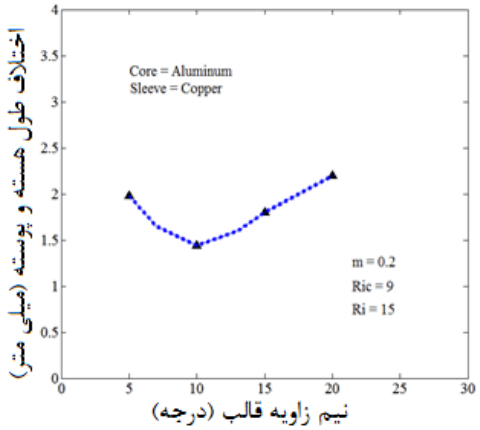
همان‌گونه که در شکل واضح اختلاف بین طول هسته و پوسته‌ی محصول چندان چشم‌گیرنمی‌باشد، و این امر به این دلیل می‌باشد که هسته و پوسته قبل از ورود به قالب به هم متصل می‌باشند.



شکل(۷) منحنی اختلاف طول هسته و پوسته‌ی محصول نسبت به تغییرات نیم زاویه‌ی قالب.

۶-۱-۷-اثر تغییرات نیم زاویه‌ی قالب بر اختلاف طول هسته و پوسته‌ی محصول

شکل (۸) منحنی اثر نیم زاویه‌ی قالب بر اختلاف طول هسته و پوسته‌ی محصول برای درصد کاهش سطح مقطع ۲۰٪ و بیلت [10]، با استفاده از روش شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل منحنی مشخص است، نمودار در ابتدا حالت نزولی و پس‌ازآن جهتی کاملاً صعودی را طی می‌کند. با دقت به شکل می‌توان این نتیجه را گرفت که کم‌ترین مقدار اختلاف طول هسته و پوسته در زاویه‌یبهینه‌ی قالب اتفاق می‌افتد.

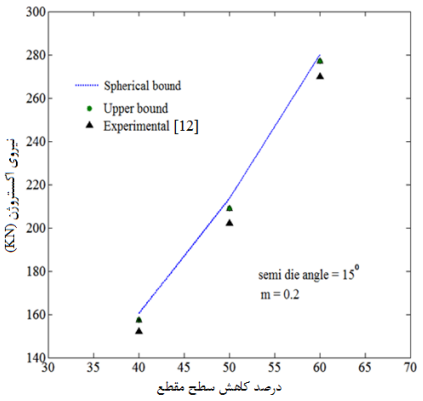


شکل (۸) اثر نیمزاویه‌ی قالب بر اختلاف طول هسته و پوسته.

۶-۱-۸-اثر کاهش سطح مقطع بر نیروی اکستروژن در سه حالت

شکل (۹) منحنی تغییرات نیروی اکستروژن بر حسب درصد کاهش سطح مقطع و در صورت ثابت بودن نیم زاویه‌ی قالب برای سه حالت نشان می‌دهد. حالت اول موقعی است که مرز ورودی به‌صورت کروی باشد، حالت دوم مربوط بهموقعی است که مرز ورودی به پارامتر هندسی مربوط و باشد و حالت سوم مربوط به کار آزمایشگاهی[10] را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود، حالتی که مرز ورودی به پارامتر هندسی مربوط می‌شود، نیروی شکل‌دهی به حالت آزمایشگاهی نزدیک‌تر است.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

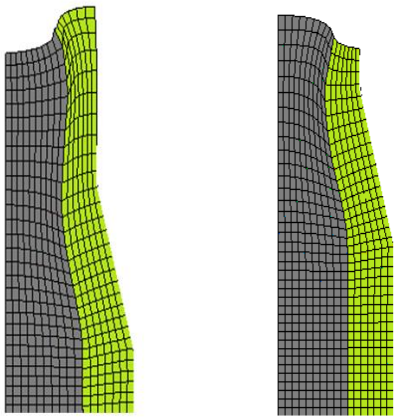


شکل (۹)مقایسه‌یاثر درصد کاهش سطح مقطع برنیروی اکستروژن با استفاده از روش کرانه‌یبالایی و آزمایش [10]

۶-۲-بررسی تغییر پارامترهای متفاوت براثر جابجایی هسته و پوسته

۶-۲-۱-مقایسه‌یجریان هسته و پوسته در میله‌ی Al/Cu و Cu/Al

همان‌گونه که در شکل(۱۰) ملاحظه می‌شود، در شکل(a) پوسته سریع‌تر و در شکل (b) هسته سریع‌تر خارج شده است. این موضوع این‌گونه توصیف می‌گردد که در شکل(a) جنس پوسته که سریع خارج شده است، آلومینیوم می‌باشد و در شکل (b) که هسته سریع‌تر خارج شده است نیز از آلومینیوم می‌باشد. و ازآنجایی‌که تنش سیلان آلومینیوم کم‌تر از تنش سیلان مس باشد، بنابراین سریع‌تر خارج می‌شود.

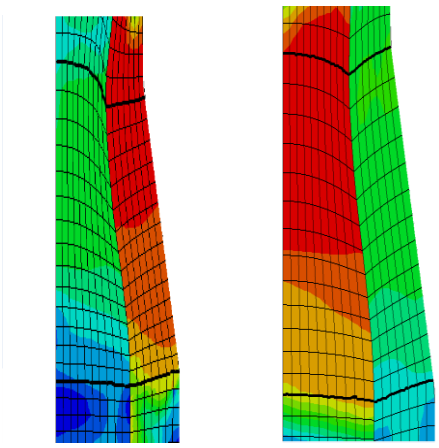


(a) (b)

شکل ۱۰-نحوه‌ی خروج هسته و پوسته از قالب : (a).Cu/Alو (b). Al/Cu

۶-۲-۲- مقایسه مرز ورودی و خروجی در میله‌ی Al/CuوCu/Al

در زیر شکل (a) حالتی است که میله Al/Cu و در شکل (b) حالتی است که میله Cu/Alمی‌باشد. با توجه به این نکته که نیروی لازم برای میله Al/Cuبیش‌ترمی‌باشد، بنابراین تغییر شکل ایجادشده در این میله نیز بیش‌ترمی‌باشد. البته همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، با جابه‌جایی دو فلز مرز ورودی نسبت به مرز خروجی تغییرات چندانی نمی‌نماید.



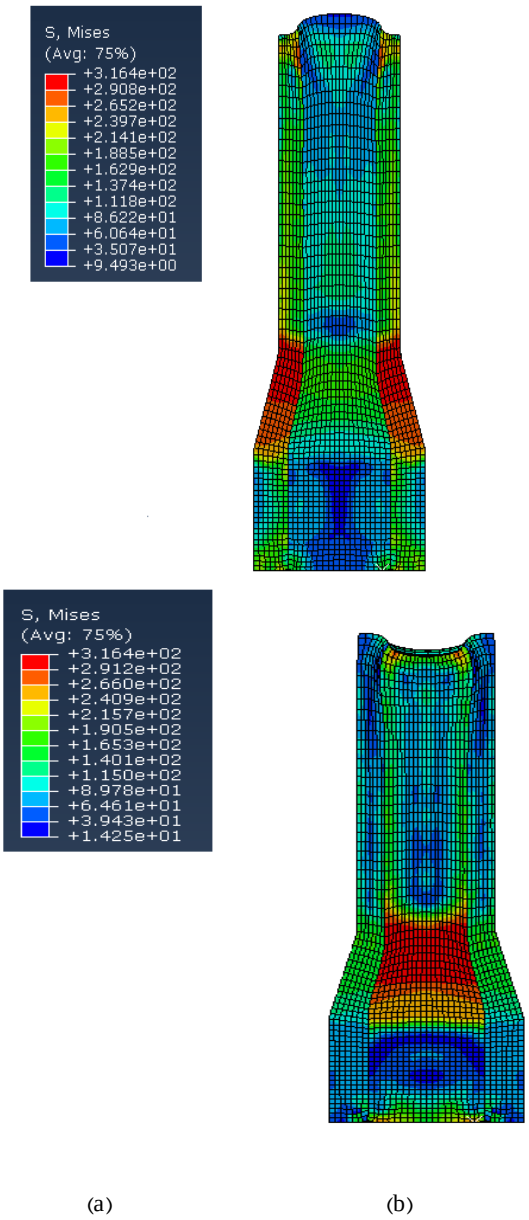
(a) (b)

شکل ۱۱-مقایسه‌ی مرزهای ورودی و خروجی در ناحیه‌ی تغییر شکل : (a). Al/Cu و (b). Cu/Al

۶-۲-۳- مقایسه‌ی توزیع تنش در میله‌ی Al/Cu و Cu/Al

در شکل ۱۲ قسمت (a) توزیع تنش در میله‌ی Al/Cu و در قسمت (b) توزیع تنش در میله‌ی Cu/Al را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود توزیع تنش در میله‌یAl/Cu نسبت به توزیع تنش در میله‌ی Cu/Alیکنواخت‌ترمی‌باشد و دلیل این امر را می‌توانان‌گونه توضیح داد،حالتیکه مس به‌صورت پوسته‌یمیله‌یدوفلزی باشد، وجود مس باعث می‌شود نیروی وارده از طرف قالب به میله توسط مس که تنش شارش بیش‌تری دارد گرفته شود وکم‌تر به هسته‌یآلومینیومی برسد ولی در حالت برعکس که آلومینیوم به‌صورت پوسته است به دلیل سبک بودن آلومینیوم نیروی وارد از طریق قالب به هسته‌ی مسی می‌رسد.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]



(a) (b)

شکل ۱۲-مقایسه‌ی توزیع تنش : (a). Al/Cu و (b). Cu/Al

۷- نتیجه گیری

با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، مقدار بهینه‌ی نیم زاویه‌ی قالب افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش ضریب اصطکاک برشی، مقدار بهینه‌یزاویه‌ی قالب افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، قطر خروجی کاهش یافته و متناسب با آن مقدار بهینه‌ی زاویه‌ی قالب افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار ثابت اصطکاک بین پوسته و قالب، مقدار نیروی اکستروژن افزایش می‌یابد. هم‌چنین می‌توان نتیجه گرفت که در زوایای بزرگ قالب، تأثیرضریب ثابت اصطکاک در سطح بین پوسته و قالب اثری بر نیروی اکستروژن ندارد با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، مقدار بهینه‌ی نیم زاویه‌ی قالب کاهش می‌یابد. هم‌چنینمی‌توان نتیجه گرفت که در زوایای بزرگ، تغییر درصد کاهش سطح مقطع تأثیر چندانی بر روی نیروی اکستروژن نخواهد داشت. درحالی‌که در زوایای کم، نیروی اکستروژن با افزایش میزان درصد کاهش سطح مقطع در صورت ثابت بودن ضریب ثابت اصطکاک، کاهش می‌یابد.

۷- پیشنهاداتی برای مطالعات آینده

در راستای پژوهش صورت گرفته پیشنهاداتی جهت غنای این پژوهش در آینده ارائه می‌شود:

۱- آزمایشات تجربی برای فلزات مختلف انجام شود.

۲- ثابت اصطکاک از تست حلقه فشاری بصورت دقیق استخراج گردد.

۳- از روان کننده های متفاوت مانند پودر تالکوم، گریس، روغن‌های صنعتی استفاده شده و اثرات هر کدام درنظر گرفته شود.

مراجع

[1] Avitzur, B., *Analysis of wire drawing and etrusion through conical dies of small cone angle.* Journal of Engineering for Industry, 1963. 1(1): p. 89-95.

[2] Avitzur, B., *Analysis of wire drawing and extrusion through conical dies of large cone angle.* Journal of Engineering for Industry, 1964. 1(1): p. 305-314.

[3] R. Ebrahimia, M.R., M. Kanaania, M.M. Moshksara, *An upper-bound analysis of the tube extrusion process.* Journal of Materials Processing Technology, 2008. 199(1): p. 214-220.

[4] K. Osakada, M.L., P. B. Mellor, *Hydrostatic extrusion of composite rods with hard cores.* Int. J. mech. Sci., 1972. 15(1): p. 291-307.

[5] Peng, D.S., *An upper-bound analysis of the geometric shape of the deformation zone in rod extrusion.* Journal of Materials Processing Technology, 1989. 21(1): p. 303-311.

[6] D. Y. Yang, Y.G.K., C. M. Lee, *An upper-bound solution for axisymmetric extrusion of composite rods through curved dies.* Int. J. Mach. Tools Manufact., 1991. 31(4): p. 565-575.

[7] R. Ponalagusamy, R N., R. Venkatesan, S. Senthilkumar, *Computer-aided metal flow investigation in streamlined extrusion dies.* Materials and Design, 2008. 29(1): p. 1228-1239.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]

[8] T. Sheppard.(1999), "Extrusion of Aluminum Alloys", Kluwer Academic Publishers, 2ndedition.

[9] Peng, D.S., *An upper-bound analysis of the geometric shape of the deformation zone in rod extrusion.* Journal of Materials Processing Technology, 1989. 21(1): p. 303-311.

[10] Yeong-Maw Hwang, T.-F.H., *An inestigation into the plastic deformation behavior within a conical die during composite rod extrusion.* journal of Materials Processing Technology, 2002. 121(1): p. 226-233.

[11] B. Avitzur, R.W., S. Talbert, Y.T.Chou, *Analysis of core fracture in drawing of bimetal rods and wires.* Journal of Engineering for Industry, 1986. 108(1): p. 133-140

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.4.2]