بررسی مسائل اکستروژن معکوس برای تولید قطعات با شکل داخلی دلخواه از بیلت های دایره ای با استفاده از روش حد بالا

کارن ابری نیا

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک – پردیس دانشکده های فنی _ دانشگاه تهران

فرهاد روزگاری

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۶/۲۹ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۸/۴ ، تاریخ تصویب ۸۴/۱۱/۱۵)

چکیده

اکستروژن معکوس یکی از فرایندهای شکل دهی فلزات می‌باشد که در سالهای اخیر در صنایع ، کاربرد وسیعی یافته است. در این مقاله فرآیند اکستروژن معکوس برای تولید قطعات توخالی با شکل داخلی دلخواه از بیلت‌های دایره ای با استفاده از روش حد بالا مورد تحلیل قرار گرفته است و یک میدان سرعت مجاز سینماتیکی جدید به منظور استفاده در رابطه حد بالا پیشنهاد شده است. با استفاده از این میدان سرعت، حد بالا برای فشار اکستروژن بدست آمده و نسبت به پارامترهای بهینه‌سازی، کمینه شده است. نتایج به دست آمده برای مقاطع چرخدنده‌ای به صورت نمودارهای بار اکستروژن و فشار نسبی اکستروژن برحسب تغییرات درصد کاهش سطح مقطع، ضریب شکل ، ضریب اصطکاک و تعداد دندانه ها ارائه شده‌اند. در نهایت این نتایج با نتایج تجربی و تئوری دیگر پژوهشگران مقایسه شده و توافق نسبتاً خوبی مشاهده شده است.

واژه های کلیدی : شکل دهی فلزات ، اکستروژن معکوس ، میدان سرعت، حد بالا، چرخ دنده

مقدمه

فرآیند اکستروژن معکوس برای تولید قطعات با شکل داخلی دلخواه از بیلت های دایره ای در سالهای اخیر کاربرد عملی زیادی پیدا کرده است. از جمله می توان به ساخت انواع چرخدنده ها ، آچار بکس و اجزاء پیچیده خودرو و هواپیما اشاره کرد. در حین انجام فرآیند اکستروژن معکوس، جریان ماده هم در سطح مقطع بیلت و هم در جهت طولی غیر یکنواخت است و این بدان معنی است که شبیه سازی و تحلیل فرایند اکستروژن معکوس را باید بصورت یک تغییر شکل سه بعدی در نظر گرفت. تا کنون مطالعات بسیاری به منظور درک مشخصات تغییر شکل در اکستروژن معکوس قطعات با تقارن محوری صورت گرفته است، ولی اکستروژن معکوس برای تولید قطعات با شکل داخلی دلخواه در حالی که تقارن محوری وجود ندارد، در سالهای اخیر بیشترمورد توجه بوده است[۴ تا ۱۴].

در سال ۱۹۶۱ ، کودو[۱] مطالعاتی بر روی فرآیند اکستروژن معکوس برای تولید قطعات با تقارن محوری انجام داد و می توان گفت که این بررسی اولین کار تحقیقی جدی بر روی این فرآیند بوده است. بعدها اویتزر وهمکارانش[۲] و لو واویتزر[۳] کارهای بیشتری بر روی این فرآیند انجام دادند. بائه و یانگ[۴] فرآیند اکستروژن معکوس را برای تولید قطعات با شکل داخلی بیضی و یانگ وهمکارانش[۵] فرآیند اکستروژن معکوس برای تولیدلوله های خارج از مرکز را با استفاده از روش حد بالا تحلیل کردند. در تحقیقات دیگر، بائه و یانگ تحلیل حد بالای فرآیند اکستروژن معکوس را برای تولید قطعات با شکل داخلی دلخواه از بیلت های دایره ای و بیلت های با شکل دلخواه ارائه دادند[۶و۷]. شیان و تارن [۸] این فرآیند را با استفاده ازروش المانی حد بالا تحلیل کردند. مشکسار و ابراهیمی[۹] تحلیلی را برای فرآیند اکستروژن معکوس قطعات تو خالی با شکل داخلی و خارجی چند ضلعی منتظم ارائه دادند. ابری نیا و علمائی[۱۰] این فرآیند را برای تولید قطعات با شکل داخلی دایره بصورت تئوری

Archive of SID

www.SID.ir

وتجربی تحلیل کردند. در سالهای اخیر روش اجزای محدود ترکیبی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است وگو وهمکارانش[۱۱]، لی و همکارانش[۱۲] وچو و همکارانش[۱۳] در تحقیقات جداگانه با استفاده از این روش فرآیند اکستروژن معکوس را تحلیل کردند.

در این مقاله، یک میدان سرعت مجاز سینماتیکی برای استفاده در رابطه حد بالا پیشنهاد شده است و نتایج به دست آمده برای مقاطع چرخدنده ای به صورت نمودارهای بار اکستروژن و فشار نسبی بر حسب تغییرات درصد کاهش سطح مقطع، ضریب اصطکاک، ضریب شکل و تعداد دندانه هاارائه شده اند. در نهایت این نتایج با نتایج تجربی و تئوری دیگر پژوهشگران مقایسه شده اند.

تئوری

فرایند اکستروژن معکوس برای تولید قطعات با شکل داخلی دلخواه از بیلت های دایره ای در شکلهای (۱) و(۲) مدل شده است. در شکل (۱) نمای بالا و درشکل (۲) مرحله میانی این فرایند نشان داده شده است. آنچه در پی می آید برای تحلیل مسائل در این تحقیق استفاده شده است.

در این تحلیل، از مختصات استوانه‌ای استفاده شده است. در این مختصات، مرکز محورها در مرکز سطح انتهایی ناحیه تغییر شکل قرار گرفته است و محور zها، همان محور مرکزی بیلت دایره‌ای میباشد. در این تحلیل، سمبه و محفظه قالب به صورت جسم صلب، ماده مورد آزمایش ایزوتروپیک، غیر قابل تراکم و دارای رفتار صلب پلاستیک تابع قانون جریان لوی - میزز فرض شده است.

فرآیند به این صورت انجام میشود که سمبه با شکل سطح مقطع دلخواه به سمت پایین و بطرف داخل بیلت با سرعت ثابت u_0 حرکت میکند و با انجام این کار، یک جسم توخالی که مقطع داخلی آن مطابق با سطح مقطع سمبه است تولید می شود که با سرعت u_{III} در جهت مخالف حرکت سمبه، اکسترود میشود. رفتار ناحیه III به صورت یک جسم صلب است ولی ماده در نواحی I و II متحمل تغییر شکل پلاستیک می‌شود و باید برای این دو ناحیه، میدانهای سرعت و نرخ کرنش موثر را به دست آوریم. ناحیه I شامل توده‌ای از ماده است که مستقیماً زیر سمبه قرار گرفته و ناحیه II شامل یک جسم توخالی استوانه‌ای است که ناحیه I را در بر گرفته است. مواد از ناحیه I با گذر از سطح انفصال سرعت s_7 وارد ناحیه II میشوند و با گذشتن از سطح انفصال سرعت s_4 از این ناحیه خارج می‌شوند. مشخص است که تمام موادی که توسط سمبه رانده میشوند باید از ناحیه II گذشته و به ناحیه III برسند. فرآیند هنگامی تمام میشود که ناحیه تغییر شکل به انتهای قالب برسد.

رابطه حد بالا

کاملترین رابطه‌ای که برای عبارت حد بالا وجود دارد، رابطه‌ای است منسوب به دروکر و پروویدنس که در آن کلیه پارامترهایی که در یک فرایند شکل دهی وجود دارد، درنظر گرفته شده است[۱۴]. رابطه مذکور بصورت زیر بیان می‌شود:

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \int_v (\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij})^{\frac{1}{2}} dv + \int_s K|\Delta v_i| ds + \int_{Sm} m K |\Delta v_i| ds - \int_{ST} T_i v_i ds \quad (۱)$$

در رابطه فوق J^* یک حد بالا برای توان مصرفی کل است. جمله اول توان تغییر شکل داخلی مربوط به میدان نرخ کرنش، جمله دوم توان برشی بر روی سطوح انفصال سرعت در ناحیه تغییر شکل، جمله سوم توان صرف شده برای غلبه بر اصطکاک بین مواد و ابزار در سطوح تماس و جمله چهارم توان مربوط به نیروهای خارجی اعمال شده بر ماده مورد آزمایش هستند.

در جمله اول $\bar{\sigma}_0$ تنش موثر برای ماده‌ای است که آزمایش روی آن انجام می شود و $\dot{\varepsilon}_{ij}$ نیز میدان نرخ کرنش میباشد که در مختصات استوانه‌ای بصورت زیر بیان می شود:

$$\dot{\varepsilon}_{rr} = \frac{\partial ur}{\partial r} \quad , \quad \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}$$

$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\dot{\varepsilon}_{r\theta} = \frac{1}{2}(\frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r})$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$\dot{\varepsilon}_{rz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}\right) \qquad \dot{\varepsilon}_{z\theta} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \theta}\right)$$

(۲)

در روابط فوق، u_r و u_θ و u_z مولفه‌های میدان سرعت در ناحیه تغییر شکل می باشند. انتگرال جمله اول، روی حجم V(حجم ناحیه تغییر شکل) گرفته می شود که میدان سرعت موردنظر درآن وجود دارد.

در جمله دوم، K تنش موثر برشی و $|\Delta v_i|$ انفصال سرعت می باشند. انتگرال جمله دوم، روی سطح S (سطح انفصال سرعت) گرفته میشود.

در جمله سوم، m ضریب اصطکاک، K تنش موثر برشی و $|\Delta v_i|$ اختلاف سرعت بین ماده و ابزار، در ناحیه تماس بین این دو می باشند. انتگرال جمله سوم، روی سطح S_m (سطح اصطکاکی) گرفته میشود.

در جمله چهارم، T_i تنش خارجی اعمال شده بر ماده مورد آزمایش و v_i سرعت ماده در محل اعمال تنش خارجی هستند. تنش خارجی اعمال شده میتواند به صورت کششی یا فشاری باشد. انتگرال جمله چهارم، روی سطح S_T (سطحی که تنش خارجی روی آن اعمال میگردد) گرفته میشود.

در یک فرآیند، ممکن است چند ناحیه تغییر شکل و چند سطح انفصال سرعت و چند سطح اصطکاکی وچند تنش خارجی مختلف داشته باشند که انتگرالهای مزبور برای تمامی موارد فوق جداگانه محاسبه میشوند.

تنها شرطی که برای استفاده از رابطه حد بالا وجود دارد، اینست که میدانهای سرعت در نظر گرفته شده باید از نظر سینماتیکی مجاز باشند یعنی اینکه در مرزها پیوسته باشند و در رابطه تراکم ناپذیری یا همان پیوستگی صدق کنند. با توجه به این موضوع، واضح است که مسائل شکل دهی که با استفاده از روش حد بالا حل میشوند، دیگر دارای یک حل واحد و منحصر به فرد نمی باشند و تعداد بیشماری میدان سرعت وجود دارد که از نظر سینماتیکی مجاز هستند و قابل استفاده در رابطه حد بالا می باشند. از بین این میدانهای سرعت مجاز، آن میدان سرعتی که رابطه حد بالا را کمینه کند، میدان سرعت مورد نظر است[۱۰].

به دست آوردن میدان سرعت برای ناحیه I تغییر شکل

مولفه محوری سرعت (u_z)، با در نظر گرفتن شرایط مرزی، به صورت رابطه زیر انتخاب می‌شود:

$$u_{zI} = -\frac{u_0 z}{T}$$

(۳)

در رابطه فوق، u_0 سرعت حرکت سمبه و T ضخامت ناحیه تغییر شکل می باشند. پارامتر T خود به عنوان یکی از پارامترهای بهینه سازی در تحلیل حد بالا مورد استفاده قرار میگیرد.

با در نظر گرفتن پیچیدگی هندسی سمبه و نیز در نظر گرفتن شرایط مرزی، مولفه مماسی سرعت (u_θ)، به شکل زیر بیان می‌شود:

$$u_{\theta I} = -N\frac{u_0 r}{T} R_i^p(\theta)$$

(۴)

در رابطه فوق، N و p، پارامترهای بهینه سازی می‌باشند که به منظور ارضای شرایط مرزی، در رابطه قرار گرفته‌اند. $R_i(\theta)$ هم، معادله سطح خارجی سمبه، در مختصات قطبی میباشد.

برای به دست آوردن مولفه شعاعی سرعت (u_r) از شرط تراکم ناپذیری استفاده می‌شود. با توجه به اینکه می‌دانیم معادله تراکم ناپذیری در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر بیان می‌شود[۷]:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

(۵)

با جایگزینی روابط (۳) و (۴) در رابطه(۵) و انتگرال گیری از این رابطه، مولفه شعاعی سرعت (u_r) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$ru_r = \frac{u_0 r^2}{2T}\left(1+Np\, R_i^{p-1}(\theta)\frac{dR_i(\theta)}{d\theta}\right) + f(\theta)$$

اگر شرایط مرزی در مرکز را در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$r = 0$ در $\rightarrow u_r = 0$

با توجه به شرط مرزی فوق، مقدار $f(\theta)$ برابر صفر به دست می‌آید و خواهیم داشت:

Archive of SID

www.SID.ir

$$u_{rI} = \frac{u_0 r}{2T}\ (1+ \mathrm{Np}\ R_i^{p-1}\ (\theta)\frac{dR_i(\theta)}{d\theta})$$

(۶)

بنابراین میدان سرعت درناحیه I به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_{rI} = \frac{u_0 r}{2T}\ (1 + \mathrm{Np}\ R_i^{p-1}\ (\theta)\frac{dR_i(\theta)}{d\theta})$$

$$u_{\theta I} = -\frac{u_0 r}{T}\mathrm{N}\ R_i^{p}\ (\theta)$$

$$u_{zI} = -\frac{u_0 z}{T}$$

(۷)

به دست آوردن میدانهای سرعت برای ناحیه II تغییر شکل

شرایط مرزی سرعت، در المان II به صورت زیر میباشد:

$$r = R_i \quad \text{در} \rightarrow \ u_r = v_b\cos\beta$$
$$r = R_0 \quad \text{در} \rightarrow \ u_r = 0$$
$$r = R_i \quad \text{در} \rightarrow \ u_\theta = -v_b\sin\beta$$

(۸)

در روابط فوق، v_b سرعت عمودی در نقطه‌ای از مرز برشی (DE) بین ناحیه I و II و β زاویه بین مماس بر مرز برشی در همان نقطه و جهت مولفه مماسی سرعت (u_θ) است. پارامترهای فوق در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. v_b و β به صورت زیر بیان می شوند:

$$v_b = u_{rI}\cos\beta - u_{\theta I}\sin\beta$$

(۹)

$$\beta = \psi - \frac{\pi}{2}$$

(۱۰)

که ψ زاویه بین مماس بر مرز برشی در نقطه P و جهت شعاعی (OP) میباشد و به صورت رابطه زیر بیان میشود:

$$\psi = \mathrm{tg}^{-1}\ (\mathrm{R_i}\ \frac{d\theta}{dR_i})$$

(۱۱)

حال باید میدانهای سرعت در ناحیه II را به گونه‌ای انتخاب کنیم تا شرایط مرزی روابط (۸) ارضا شود. برای این منظور u_{rII} و $u_{\theta II}$ به صورت زیر انتخاب می شوند:

$$u_{rII} = \frac{G}{r}\ (\frac{r-Ri}{Ro-Ri})\ (\frac{Ro-r}{Ro-Ri})\ (1+ \mathrm{M}\ \frac{dR_i^{\,q}(\theta)}{d\theta})\ + v_b\cos\beta(\frac{Ro-r}{Ro-Ri})$$

(۱۲)

$$u_{\theta II} = -\mathrm{M}(\frac{r-Ri}{Ro-Ri})\,R_i^q\,(\theta)\ - v_b\sin\beta(\frac{Ro-r}{Ro-Ri}\ )$$

(۱۳)

در روابط فوق، G، M و q پارامترهای بهینه سازی هستند و Ro شعاع داخلی قالب و در حقیقت، شعاع خارجی قطعه تولید شده میباشد. v_b وβ هم ازروابط(۹) تا (۱۱) به دست می‌آیند. حال برای به دست آوردن مولفه محوری سرعت (u_z) از رابطه (۵) که همان رابطه تراکم‌ناپذیری است استفاده می‌کنیم وبا جایگذاری روابط (۱۲) و (۱۳) در این رابطه و انتگرال‌گیری از آن، u_z را به صورت زیر بدست می‌آوریم:

$$u_{zII} = -(\dot{\varepsilon}_{rII} + \dot{\varepsilon}_{\theta II})\,z + g\,(r\,,\,\theta)$$

(۱۴)

در رابطه فوق، $\dot{\varepsilon}_\theta$ و $\dot{\varepsilon}_r$ به ترتیب نرخهای کرنش در جهات شعاعی و مماسی هستند و $g(r,\theta)$ از شرایط مرزی به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$z = 0 \quad \text{در} \rightarrow \ u_z = 0 \ \Rightarrow \quad g(r,\theta) = 0$$

بنابراین‌میدان‌سرعت‌برای ناحیه II، در نهایت به صورت زیر در خواهد آمد:

$$u_{rII} = \frac{G}{r}\ (\frac{r-Ri}{Ro-Ri})(\frac{Ro-r}{Ro-Ri})\ (1 + \mathrm{M}\ \frac{dR_i^{\,q}(\theta)}{d\theta})\ + v_b\cos\ \beta\,(\frac{Ro-r}{Ro-Ri})$$

$$u_{\theta I} = -\mathrm{M}(\frac{r-Ri}{Ro-Ri})\,R_i^q\ (\theta)\,-v_b\ \sin\beta\ (\frac{Ro-r}{Ro-Ri}\ )$$

$$u_{zII} = -(\dot{\varepsilon}_{rII} + \dot{\varepsilon}_{\theta II})z$$

(۱۵)

که نرخهای کرنش از میدانهای سرعت در نظر گرفته شده به دست می آیند.

Archive of SID

www.SID.ir

به آسانی مشاهده میشود که میدانهای سرعت برای ناحیه‌های I و II که در روابط (۷) و (۱۵) به دست آمده‌اند، شرایط تراکم ناپذیری و کلیه شرایط مرزی را ارضا می کنند. بنابراین، میدانهای سرعت مزبور از نظر سینماتیکی مجاز هستند و میتوانند برای تحلیل حد بالای فرایند اکستروژن معکوس لوله‌های با شکل داخلی دلخواه، از بیلت های دایره‌ای، مورد استفاده قرار گیرند.

به دست آوردن تنش های موثر

برای استفاده از رابطه حد بالا باید تنش‌های موثر محوری و برشی را نیز بدست آوریم. این تنش‌ها از روابط زیر بدست می آیند [۶] :

$$\overline{\sigma_0} = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_f} \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}$$

(۱۶)

که در رابطه فوق $\bar{\varepsilon}_f$، کرنش موثر میباشد و برای به دست آوردن آن از رابطه تقریبی زیر استفاده می کنیم:

$$\bar{\varepsilon}_f = \ln\left(\frac{l}{L}\right)$$

(۱۷)

در رابطه فوق، l ارتفاع نهایی محصول اکسترود شده و L، ارتفاع اولیه بیلت مورد استفاده میباشد.

برای بدست آوردن K هم طبق معیار ون میزز از رابطه زیر استفاده می شود[۱۰]:

$$K = \frac{\overline{\sigma_0}}{\sqrt{3}}$$

(۱۸)

به دست آوردن بار اکستروژن

پس از اینکه عبارت حد بالا به دست آمد، باید نسبت به پارامترهای بهینه سازی، کمینه شودو این کار با مشتق گیری از عبارت مزبور نسبت به پارامترهای بهینه‌سازی و مساوی صفرقرار دادن آن انجام می‌گیرد. پس از اینکه مقدار کمینه عبارت حد بالا به دست آمد، بار اکستروژن از رابطه زیر به دست می‌آید:

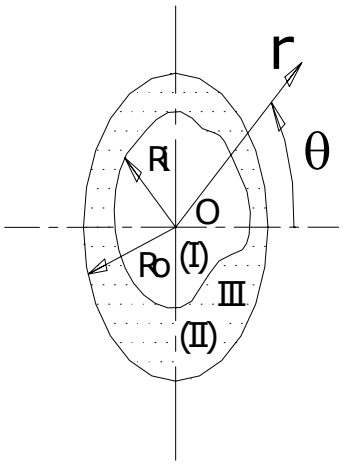
$$F = \frac{J^*_{opt}}{u_o}$$

(۱۹)

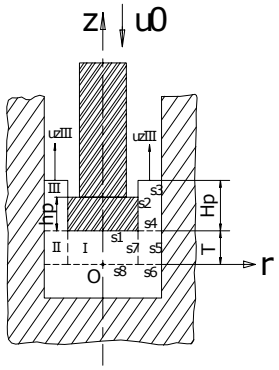
در رابطه فوق J^*_{opt}، مقدار کمینه عبارت حد بالا میباشد. فشار نسبی اکستروژن هم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P = \frac{F}{A_i \overline{\sigma_0}}$$

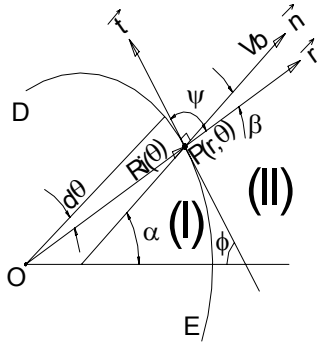
(۲۰)



شکل ۱ : تصویر شماتیک فرایند اکستروژن معکوس از نمای بالا .



شکل ۲ : تصویر شماتیک از مرحله میانی فرایند.



شکل ۳ : مرز برشی بین ناحیه های تغییر شکل.

Archive of SID

www.SID.ir

برنامه کامپیوتری

از آنجائی که، عبارت حد بالای مورد استفاده دراین تحلیل، بسیار طولانی و دارای جملات بسیاری است، حل تحلیلی این رابطه امکانپذیر نیست و بنابراین، باید از حل عددی استفاده کرد. برای این منظور، برنامه کامپیوتری به زبان MATLAB، نوشته شد تا بتواند عبارت حد بالا را محاسبه کند و مقدار کمینه آن را بدست آورد. این برنامه، متغیرهای ورودی معرف مقطع و جنس ماده و سرعت آزمایش را دریافت کرده و مقدار کمینه مربوط به هر حالت را به عنوان خروجی، ارائه می کند. برای بدست آوردن انتگرالهای سه گانه و دو گانه موجود در عبارت حد بالا، ازروش انتگرال گیری عددی گوس، استفاده شده است وبرای کمینه کردن این عبارت، از قابلیت خود نرم افزار، استفاده شده است.

نتایج تئوری برای مقطع چرخندهای

معادله مقطع چرخندهای در مختصات قطبی به صورت زیر بیان می شود:

$$R_i(\theta) = \frac{1}{2}\left[(a+b) - (a-b)\cos(n\theta)\right] \quad (۲۱)$$

در رابطه فوق، a شعاع سر دندانه، b شعاع ته دندانه و n تعداد دندانهها است.

ماده مورد استفاده در این تحلیل، آلومینیوم است که رابطه تنش ـ کرنش آن به صورت زیر می باشد[۶]:

$$\bar{\sigma} = 292.77\ \bar{\varepsilon}^{0.15} \quad (۲۲)$$

مقادیر سرعت حرکت سمبه به پایین و شعاع خارجی قطعه تولید شده و یا همان شعاع داخلی قالب به صورت زیر در نظر گرفته میشوند[۶]:

$$u_0 = 1\frac{mm}{s} \quad , \quad Ro = 12.5\ mm$$

براساس پارامترهای ثابت فوق، نمودارهای بار اکستروژن و فشار نسبی اکستروژن در مراحل آغاز و پایان فرآیند، براساس تغییرات درصد کاهش سطح مقطع (r٪)، ضریب شکل $(\frac{a}{b})$ ، ضریب اصطکاک (m) و تعداد دندانهها (n) به دست آمدهاند. این نمودارهادر شکلهای(۴) تا (۸) ارائه شدهاند.

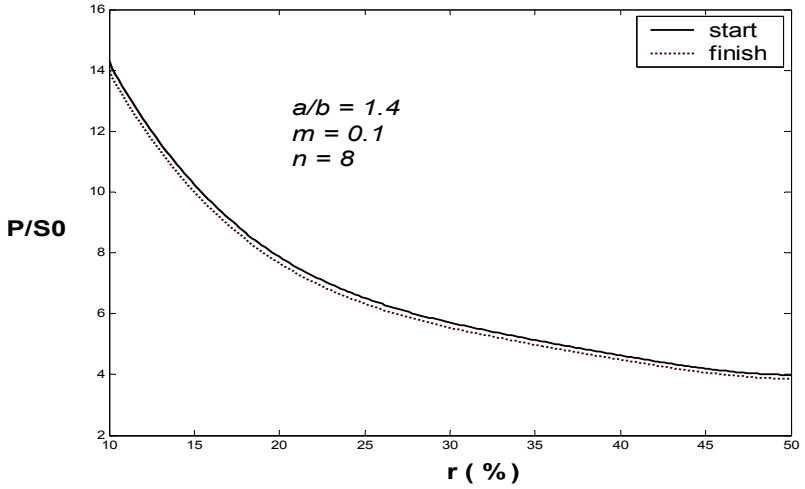
شکل (۴) نمودار فشار نسبی اکستروژن براساس درصد کاهش سطح مقطعهای مختلف برای ضریب اصطکاک، ضریب شکل و تعداد دندانههای ثابت است. در این حالت، $\frac{a}{b}$ = ۱/۴ ، m = 0.1 و n =8 انتخاب شدهاند. همانگونه که از نمودار شکل (۴) مشخص است، فشار نسبی اکستروژن با افزایش درصد کاهش سطح مقطع کاهش می یابد. این موضوع از ویژگیهای فرآیند اکستروژن معکوس می باشد و در اکستروژن مستقیم، فشار نسبی با افزایش درصد کاهش سطح مقطع افزایش می یابد. دلیل این امر آنست که در هر دو مورد اکستروژن، با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، نیروی لازم برای انجام فرآیند افزایش می یابد و در اکستروژن مستقیم با ثابت ماندن سطح فشار، فشار نسبی افزایش می یابد ولی در اکستروژن معکوس با افزایش درصد کاهش سطح مقطع سطح فشار نیز افزایش می یابد و اثر این افزایش بیشتر از اثر افزایش نیرو است و به همین دلیل فشار نسبی کاهش می یابد. با افزایش r شیب منحنی فشار نسبی کاهش می یابد. فشار نسبی انتهای فرآیند کمتر از ابتدای فرآیند است و دلیل آن این است که در انتهای فرآیند، سطوح انفصال سرعت S_6 و S_8 به انتهای قالب برخورد کرده و تبدیل به سطوح اصطکاکی می شوند. این امر در مورد نیروی اکستروژن برای تمامی موارد صادق است و در تمامی نمودارهای بعدی این موضوع به چشم میخورد و آزمایشهای تجربی هم این مورد راتایید میکنند. [۱۵]

نمودار بار اکستروژن برحسب تغییرات درصد کاهش سطح مقطع برای ضریب اصطکاک، ضریب شکل و تعداد دندانههای ثابت در شکل (۵)نشان داده است. همانطور که ذکر شد با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، نیروی لازم برای انجام فرآیند، افزایش می یابد ولی نیروی انتهای فرآیند کمتر از نیروی آغاز فرآیند است.

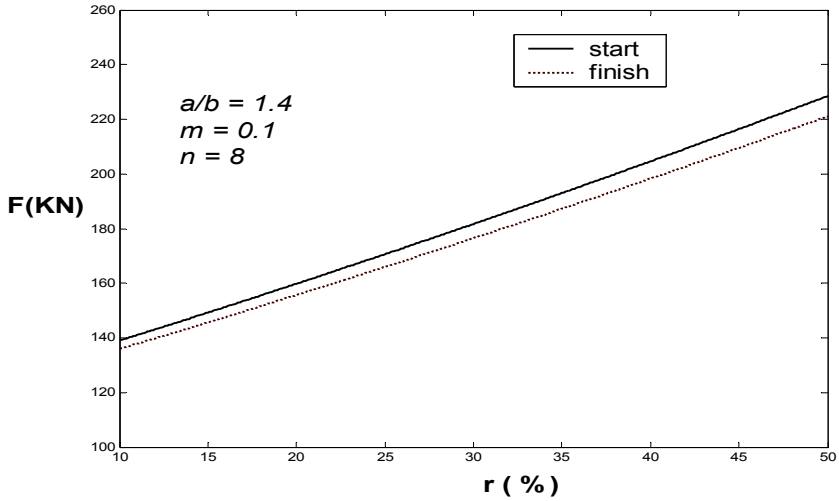
درشکل (۶) نمودار تغییرات بار اکستروژن براساس تغییرات ضریب شکل برای ضریب اصطکاک، درصد کاهش سطح مقطع و تعداد دندانههای ثابت آورده شده است. در این حالت r = ۵۰٪ ، m=0.1 وn=8 انتخاب شدهاند. با افزایش مقدار $\frac{a}{b}$، مقدار نیرو افزایش می یابد و در مقادیر بالای $\frac{a}{b}$ تاثیر این افزایش روی تغییرات نیرو کمتر است.

Archive of SID

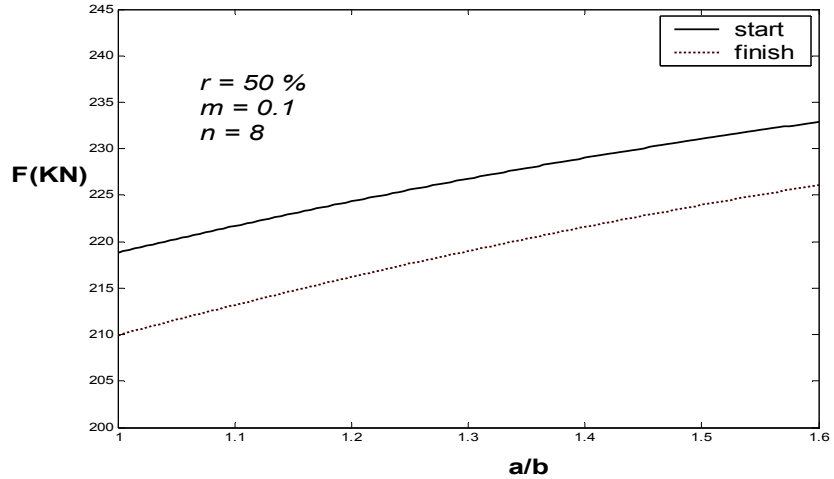
www.SID.ir



شکل ۴ : نمودارتغییرات فشار نسبی با تغییر درصد کاهش برای مقطع چرخدنده ای.



شکل ۵ : نمودارتغییرات بار اکستروژن با تغییر درصد کاهش برای مقطع چرخدنده ای.



شکل ۶ : نمودارتغییرات باراکستروژن با تغییر ضریب شکل برای مقطع چرخدنده ای.

www.SID.ir

دلیل افزایش مقدار نیرو با افزایش $\frac{a}{b}$ اینست که پیچیده تر شدن شکل باعث مشکل تر شدن جریان مواد می گردد و سهم کار خنثی بیشتر شده و نیاز به نیروی بیشتری است.

نمودار تغییرات بار اکستروژن براساس تغییرات ضریب اصطکاک را برای درصد کاهش سطح مقطع، ضریب شکل و تعداد دندانه‌های ثابت در شکل (۷) می توان مشاهده نمود. در این حالت r = ۵۰٪ ، $\frac{a}{b}$ = ۱/۴ و n = ۸ انتخاب شده‌اند. با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی لازم برای انجام فرآیند افزایش می یابد و این موضوع کاملاً طبیعی است، زیرا افزایش اصطکاک اثری روی جمله اول و دوم عبارت حد بالا ندارد ولی روی جمله سوم تاثیر دارد و با این جمله نسبت مستقیم دارد و با افزایش ضریب اصطکاک، این مقدار افزایش می یابد و در مجموع باعث افزایش مقدارکل عبارت می شود.

در شکل (۸) نمودار تغییرات بار اکستروژن برحسب تغییرات تعداد دندانه‌ها، برای درصد کاهش سطح مقطع، ضریب اصطکاک و ضریب شکل نشان داده شده است. در این حالت r = ۵۰٪، $\frac{a}{b}$ = ۱/۴ و m = ۰/۱ انتخاب شده‌اند. با افزایش تعداد دندانه‌ها، نیروی لازم برای انجام فرآیند افزایش می یابد و این به دلیل آنست که با افزایش تعداد دندانه‌ها، شکل پیچیده‌تر شده و جریان مواد سخت‌تر صورت می گیرد و نیاز به نیروی بیشتری است.

مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای مقطع چرخدنده‌ای

در این قسمت به بررسی و مقایسه نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج تئوری و تجربی ارائه شده توسط بائه و یانگ [۶] پرداخته شده است.

در شکل (۹) نمودار تغییرات بار اکستروژن برحسب تغییرات درصد کاهش سطح مقطع برای ضریب شکل، ضریب اصطکاک و تعداد دندانه‌های ثابت نشان داده شده است. با مقایسه موارد مختلف در این نمودار، ملاحظه می شود که برای درصدهای کاهش پایین، تئوری ارائه شده توسط بائه و یانگ از دقت بسیار خوبی برخوردار است ولی برای درصدهای کاهش بالا، منحنی تئوری مرجع [۶] بتدریج از منحنی بدست آمده ازنتایج تجربی دور می شود.

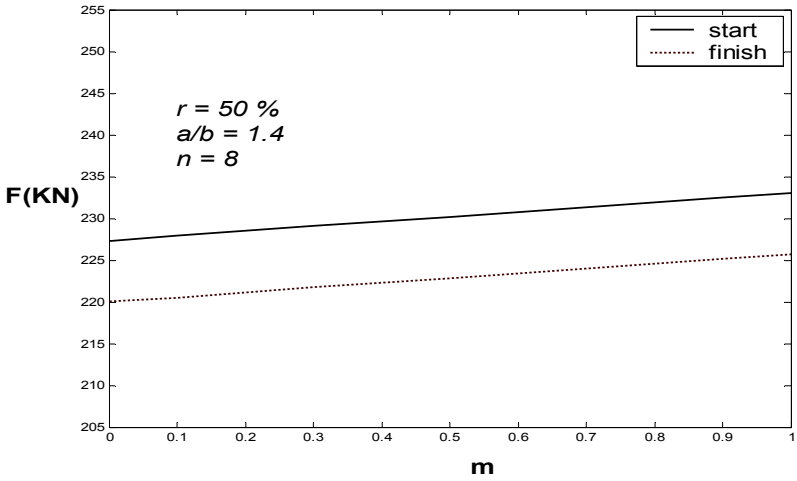
منحنی حاصل از نتایج ارائه شده در این مقاله برای مقادیر درصد کاهش سطح مقطع کم اختلاف زیادی با نتایج تجربی و تئوری مرجع[۶] دارد اما برای مقادیر کاهش سطح مقطع ۴۵ درصد به بالا نتایج ارائه شده در این پژوهش نسبت به نتایج مرجع [۶] تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده در مرجع [۶] تنها تا مرز ۵۰ درصد کاهش سطح مقطع ارائه شده اند زیرا بالاتر از آن عدم تطابق نتایج تئوری و تجربی کاملاً مشهود خواهد بود. همچنین باید توجه نمود که در بسیاری از فرآیند های اکستروژن معکوس در صنعت درصدهای کاهش سطح مقطع بالا استفاده می شوند. بنابراین تئوری ارائه شده در این مقاله برای چنین مواردی جوابهای بهتری می دهد. علاوه براین نکته بسیار حائز اهمیت تفاوت عمده بین تئوری مرجع [۶] و این پژوهش است. این تفاوت در میدان سرعت استفاده شده در این دو روش نهفته است که در تئوری مرجع [۶] از سری‌های فوریه استفاده شده است که تحلیل را بسیار پیچیده و زمان بر و متکی برانتخاب پارامترهای دلخواه نموده است. ولی در این مقاله از یک تابع بسیار ساده بهره گرفته شده که در نتیجه استفاده از این تئوری را ساده نموده و زمان کمتری برای تحلیل نیاز دارد. بهر تقدیر تئوری ارائه شده برای درصدهای کاهش سطح مقطع بزرگ (بالاتر از ۴۵ درصد) که در صنعت نیز کاربرد دارد جوابهای بهتری می دهد که در نمودار (۹) بخاطر عدم وجود داده های مرجع[۶] مقایسه نتایج در مقادیر بالا برای درصد کاهش سطح مقطع انجام نشده است.

بنابراین از تئوری ارائه شده در این مقاله می‌توان برای مواردی که درصد کاهش سطح مقطع بالا است، با دقت خوبی استفاده کرد و برای درصدهای کاهش پایین می توان از تئوری‌های دیگر استفاده کرد

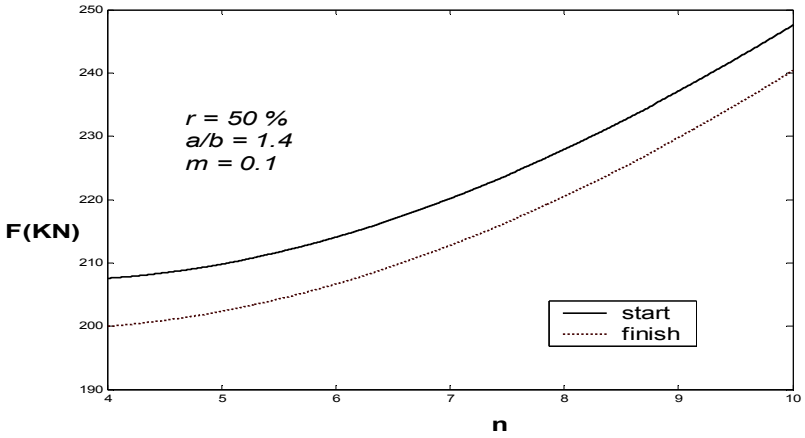
در شکل (۱۰) نمودار تغییرات بار اکستروژن برحسب تغییرات تعداد دندانه‌ها برای درصد کاهش سطح مقطع، ضریب شکل و ضریب اصطکاک ثابت نشان داده شده است. در این نمودار نیز همان روندی که در شکل (۹) برای درصد های سطح مقطع مختلف مشاهده شد تکرار گردیده است. البته در اینجا در محور افقی تعداد دندانه چرخدنده رسم شده است. نکته مهم اینست که چرخدنده ها معمولاً

Archive of SID

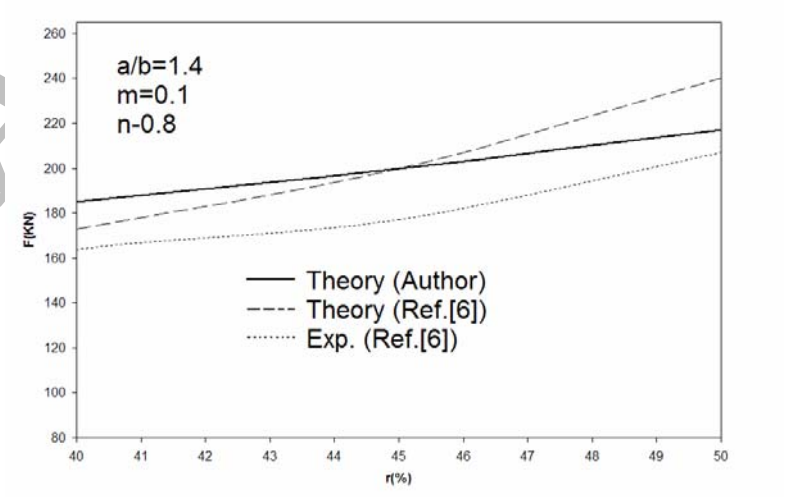
www.SID.ir



شکل ۷ : نمودارتغییرات بار اکستروژن با تغییر ضریب اصطکاک برای مقطع چرخدنده ای.



شکل ۸ : نمودارتغییرات بار اکستروژن با تغییر تعداد دندانه ها برای مقطع چرخدنده ای.



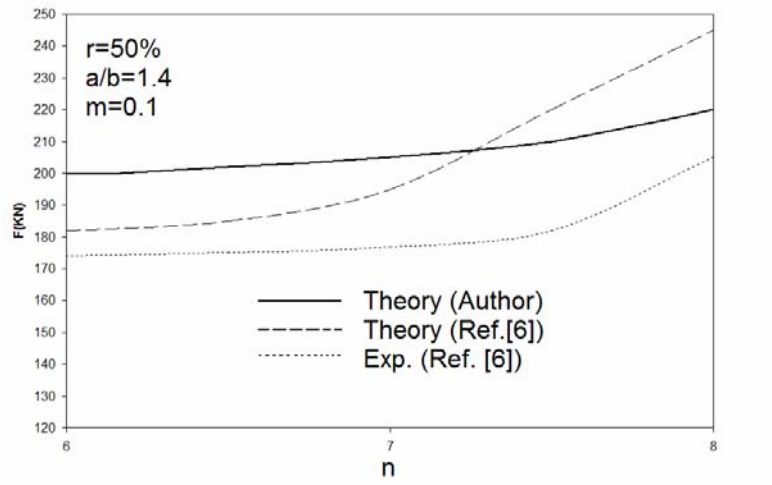
شکل ۹ : مقایسه تغییرات بار تئوری و تجربی براساس تغییر درصد کاهش سطح مقطع برای مقطع چرخدنده ای.

www.SID.ir

دارای تعداد دندانه بالا هستند که در نتیجه تئوری موجود برای چنین حالت هایی جوابهای بهتری می دهد.

نتیجه گیری

با مقایسه نتایج حاصل از تئوری ارائه شده در این مقاله با نتایج تجربی و نیز نتایج تئوری های ارائه شده توسط دیگر پژوهشگران می توان نتیجه گرفت که تحلیل حد بالای انجام شده روی فرآیند اکستروژن معکوس برای تولید قطعات با شکل داخلی دلخواه از بلیت‌های دایره‌ای، برای درصدهای کاهش سطح مقطع بیشتر از ٪۴۵ دارای دقت خوبی بوده و برای بررسی و به دست آوردن بار و فشارلازم برای انجام این فرآیند قابل استفاده است اما برای مقادیر درصد کاهش سطح مقطع کمتر از ۴۵ نتایج بدست آمده اختلاف قابل توجهی با نتایج تجربی دارند. مزیت دیگری که این تحلیل دارد، این است که میدانهای سرعت معرفی شده در این تحلیل، در مقایسه با میدانهای سرعت ارائه شده توسط دیگر پژوهشگران (از جمله میدانهای سرعت معرفی شده توسط بائه و یانگ [۶] که مقایسه نتایج با آن صورت گرفته است) از پیچیدگی کمتری برخوردار است و این امر سبب سهولت انجام محاسبات، استفاده راحتر برای کاربر و نیز کوتاه‌تر شدن زمان صرف شده توسط کامپیوتر برای انجام محاسبات در مقایسه بادیگرتحلیل هامی‌باشد.



شکل ۱۰ : مقایسه تغییرات بار تئوری و تجربی براساس تغییر تعداد دندانه ها برای مقطع چرخدنده ای.

مراجع

1 - Kudo, H. (1961). “Some analytical and experimental studies of axisymmetric cold forging and exterusion.” *International Journal Of Mechanical Sciences,* Vol. 3 , No. 91 .

2 - Avitzur, B., Bishop, E. D. and Hahn, W. C. (1972). “Impact extrusion, upper bound analysis of the early stage.” *Journal of Engineering for Industrial , Transaction of ASME ,* Vol. 64 , PP. 1079 – 1086.

3 - Luo, Z. J. and Avitzur, B. (1982). “Limitations of the impact extrusion process.” *Int . J . Mach . Tool Design and Res ,* Vol. 22, PP. 41-56 .

4 - Bae, W. B. (1992). “An upper bound analysis of the backward exterusion of internally elliptic-shaped tubes from round billets.” *Journal of Materials Processing Technology ,* Vol. 30 , PP. 13-30.

5 - Yang, D. Y., Kim, Y. U. and Lee, C. M. (1992). “Analysis of center-shifted backward extrusion of eccentric tubes using round punches.” *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 33, PP. 289-298.

6 - Bae, W. B. and Yang, D. Y. (1993). “An upper bound analysis of the backward extrusion of tubes of complicated internal shapes from round billets.” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 36, PP. 157-173 .

Archive of SID

www.SID.ir

7 - Bae, W. B. and Yang, D. Y. (1993). “An analysis of backward extrusion of internally circular-shaped tubes from arbitrarily-shaped billets by the upper bound method.” *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 36, PP. 175-185.

8 - Shean, L. R. and Tarn, K. C. (1996). “A modified analysis of the backward extrusion of internally circular-shaped tubes from arbitrarily shaped billets by the upper bound elemental technique.” *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 59, PP. 351-358.

9 - Moshksar, M. M. and Ebrahimi, R. (1998). “An analytical approach for backward extrusion forging of regular polygonal hollow components.” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 40, PP. 1247-1263.

۱۰ - ابری نیا. ک. و علمائی، م. ج. "بررسی مسائل اکستروژن معکوس و انجام برخی آزمایشها." کنفرانس دانشجوئی مهندسی مکانیک، انجمن مهندسان مکانیک ایران ، (۱۳۷۹).

11 - Guo, Y. M., Yokouchi, Y. and Nakanishi, K. (2000). “Hot backward extrusion comparative analysis by a combined finite element method.” *International Journal of Mechanical Sciences,* Vol. 42, PP. 1867-1885 .

12 - Lee, H. I., Hwang, B.C. and Bae, W. B. (2001). “A UBET analysis of non-axisymmetric forward and backward extrusion.” *Journal of Materials Processing Technology* , Vol. 113, PP. 103-108 .

13 - Cho, H.Y., Min, G. S., Jo, C. Y. and Kim, M. H. (2003). “Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion.” *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 135, PP. 375-381 .

14 - Drucker, D. C. and Providence, R. I. (1954). “Coluomb friction, plasticity and limit loads.” *Journal of Applied Mechanics,* Vol. 21, PP. 71-74.

۱۵ - علمائی، م. ج. "تحلیل فرایند اکستروژن معکوس با روش حد بالا و انجام آزمایش." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران ، (۱۳۷۹).

Archive of SID

www.SID.ir