

شبیه سازی اجزای محدود و مطالعه تجربی تولید سه راهی آلومینیومی به روش هیدروفرمینگ لوله

حسین کاشانی زاده^۱ و محمود موسوی مشهدی^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲ آستاد دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۴/۶/۲۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۵/۲، تاریخ تصویب ۸۵/۷/۸)

چکیده

فرآیند تیوب هیدروفرمینگ بعنوان یکی از روش های نو در شکل دهی فلزات مورد توجه بسیاری از صنایع بخصوص صنایع خودرو سازی قرار گرفته است. در این مقاله ابتدا به مدلسازی اجزاء محدود بمنظور تولید سه راهی به روش هیدروفرمینگ لوله با استفاده از نرم افزار ABAQUS 6.3-1 پرداخته شده و تاثیر پارامترهای کلیدی چون ضریب اصطکاک، ضریب کرنش سختی و شعاع فیلت روی پارامترهای ارتفاع برآمدگی، توزیع ضخامت و نیروی پرس بررسی شده است. همچنین رابطه بین جابجایی محوری با نیروی محوری که کاربرد زیادی برای مهندس طراح جهت تعیین ظرفیت پیستون های جانبی دارد ارائه گردید. با استفاده از این نمودار و نمودار نیروی پرس می توان به مشخصات جک های اعمال کننده جابجایی محوری و دستگاه پرس دست یافت. سپس با انجام فرآیند به صورت آزمایشگاهی و بررسی و مقایسه نتایج عملی و مدلسازی نشان داده شد که نتایج مدلسازی اجزاء محدود و نتایج عملی دارای نزدیکی مناسبی هستند. بنابراین می توان از روش اجزاء محدود با دقت مناسبی برای طراحی این فرآیند و تولید قطعات پیچیده استفاده نموده و تعداد سعی و خطاهای تجربی که هزینه زیادی به دنبال دارند را به مقدار زیادی کاهش داد. همچنین در این مقاله به تحلیل پارامترهای موثر در فرآیند آزمایشگاهی از جمله سرعت پیستون های جانبی، صافی سطح و موقعیت و فشار کوشن پرداخته شده است.

واژه های کلیدی: هیدروفرمینگ لوله - روش اجزای محدود - سه راهی آلومینیومی - جابجایی محوری - فشار کالیبراسیون

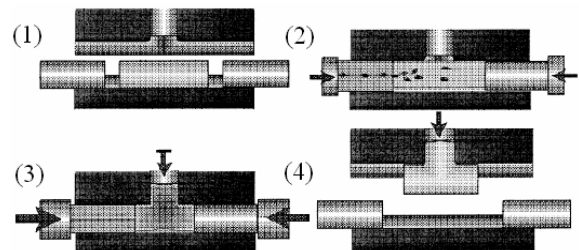
مقدمه

ناحیه انبساطی جهت جلوگیری از نازک شدگی اعمال می گردند [۱].

فرآیند تیوب هیدروفرمینگ در صنایع خودرو، هواپیما، کشتی و صنایع بهداشتی کاربردهای فراوانی دارد. از مزایای این روش قابلیت تولید اشکال پیچیده هندسی، کاهش تعداد قطعات در سیستم با حذف اتصالات و تولید قطعات یکپارچه، کاهش وزن قطعات، افزایش صافی سطح و افزایش مقاومت قطعه می باشد. از جمله قطعات تولید شده به روش تیوب هیدروفرمینگ میتوان به محفظه دیفرانسیل، نگهدارنده موتور و رادیاتور، اکسل عقب و قطعات فریم (در صنعت خودرو)، سه راهی های T شکل و Y شکل (در صنایع نفت و گاز) و شیرآلات بهداشتی اشاره کرد [۲].

در این فرآیند، قطعه می تواند در معرض خرابی هایی چون کمانش، چروکیدگی و ترکیدگی قرار گیرد. از آنجایی که طراحی فرآیند مناسب بطوریکه خرابی اتفاق نیفتد، از

فرآیند تیوب هیدروفرمینگ یکی از روش های نو و دقیق در شکل دهی فلزات می باشد. در این روش با اعمال فشار داخلی هیدرولیکی و نیروی محوری، تیوب تغییر فرم داده و به شکل سطح داخلی قالب در می آید. شکل (۱) بطور شماتیک مراحل مختلف فرآیند را معرفی می کند [۱].



شکل ۱: مراحل مختلف فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۱].

همانگونه که در شکل (۱) ملاحظه می شود، پس از قرار گرفتن لوله خام در قالب پایینی و بسته شدن قالب، نیروهای محوری برای آب بندی و همچنین راندن مواد به

استفاده از این مقادیر به مدلسازی اجزاء محدود بمنظور تولید سه راهی آلومینیومی به روش تیوب هیدروفرمینگ با نرم افزار 1-6.3 ABAQUS/EXPLICIT پرداخته شده و اثر ضریب کرنش سختی، ضریب اصطکاک و شعاع فیلت بر ارتفاع برآمدگی و همچنین اثر ضریب اصطکاک بر نیروی پرس و توزیع ضخامت مورد بحث قرار گرفته است. در همین راستا رابطه بین جابجایی محوری و نیروی محوری که از مهمترین ابزارهای مهندس طراح در تعیین تجهیزات مربوط به سیستم اعمال جابجایی محوری می باشد ارائه گردیده است. همچنین با استفاده از نمودار نیروی پرس، مهندس طراح قادر به تعیین ظرفیت پرس لازم برای انجام فرآیند می باشد. در انتهای مقاله و در بحث تولید قطعه سه راهی آلومینیومی که بصورت عملی برای اولین بار در کشور تولید گردیده است، به بررسی پارامترهای عملی و تجربی مختلف فرآیند از جمله موقعیت و فشار کوشن، صافی سطح، سرعت جابجایی های محوری، فشار داخلی و تحلیل حالات مختلف خرابی پرداخته شده است. در مدلسازی اجزاء محدود به علت مشکلات همگرایی در روش حل ضمنی^۱، از روش حل صریح^۲ استفاده گردید.

مبانی تئوری کاربردی در طراحی قطعات هیدروفرم [۱۴]

انبساط محیطی در قطعات تیوب هیدروفرم بسیار متداول می باشد. با افزایش قطر تیوب اولیه، ضخامت تیوب بطور طبیعی کم خواهد شد، لذا بمنظور یکنواخت نگاهداشتن ضخامت قطعه تولیدی باید مواد را در جهت طول بحرکت در آورده و به ناحیه در حال انبساط هدایت نمود. در طول این فرآیند فقط حد معینی از مواد میتواند و باید به منطقه در حال انبساط در قالب هدایت شود، این مقدار مواد با کاهش طول اولیه تیوب جبران می شود. بنابراین باید بتوان مقدار کاهش طول در ناحیه هدایتی را (که در آن معمولاً شعاع ثابت است) محاسبه کرد.

در آغاز جریان مواد، لحظه ای وجود دارد که در آن نیروی فشاری هدایت کننده مواد به داخل محفظه انبساطی (شکل ۲) مساوی نیروی اصطکاک می گردد. (اگر نیروی فشاری بیش از این حد گردد در تیوب کمانش ایجاد خواهد شد). لذا نیاز است طولی از تیوب که باید به محفظه انبساطی در داخل قالب بتدریج بلغزد را محاسبه نمائیم. بدین منظور پارامترهای زیر را تعریف می کنیم:

طریق تجربی نیازمند آزمون و خطای زیاد بوده و هزینه زیادی به دنبال دارد، مدلسازی اجزای محدود قطعات، اهمیت زیادی پیدا کرده است. مدلسازی با روش اجزای محدود، امکان برقراری ارتباط بین پارامترهای طراحی، بارگذاری ها و خواص ماده با کیفیت محصول و ظرفیت تجهیزات را ایجاد کرده و هزینه ها را به مقدار زیادی کاهش می دهد. همچنین می توان بطور نامحدود پارامترها را تغییر داده و رفتار قطعه را در برابر این تغییرات مشاهده نمود [۳].

فرآیند تیوب هیدروفرمینگ، گاهی پس از یک پیش فرم انجام می شود، تا اندکی از تغییر شکل طی عملیات پیش فرم ایجاد شده و با اعمال فشار داخلی کمتر، کالیبراسیون به راحتی صورت پذیرد. با انجام عمل پیش فرم، ظرفیت پرس و فشار داخلی، کاهش یافته و توزیع ضخامت بهتری نیز بدست می آید. پیش فرم در بسیاری مقالات مثل [۸،۷،۶،۵،۴] بررسی شده است.

اعمال صحیح جابجایی محوری و فشار داخلی عامل مهمی در تولید یک محصول مناسب بوده و مطالعات زیادی در این زمینه انجام گرفته است. یکی از روش های بدست آوردن منحنی بارگذاری که مقادیر جابجایی محوری و فشار داخلی را در طی فرآیند مشخص می کند، مدلسازی تطبیقی است. در این مدلسازی، چروکیدگی و ترکیدگی توسط معیارهایی در طول مدلسازی پیش بینی می شوند و براساس پیش بینی انجام شده فشار داخلی و جابجایی محوری دائماً طوری تنظیم می شوند تا قطعه دچار خرابی نگردد. علاوه بر این سعی می شود، در مدلسازی تطبیقی حداکثر فشار داخلی کمینه شده و حداکثر جابجایی محوری بیشینه شود. زیرا هر چه جابجایی محوری بیشتر شود، نازک شدگی کمتر می گردد [۱۰،۹]. همچنین مطالعات بسیاری در زمینه بهینه سازی منحنی بارگذاری با استفاده از روش های مختلف صورت گرفته است [۱۳،۱۲،۱۱].

قطعه T شکل از قطعات مهمی است که مطالعات بسیاری در مورد آن انجام شده و از کاربردهای آن تولید سه راهی و سیستم آگزوز خودرو می باشد.

در مقاله حاضر، در قسمت تئوری، فرمول هایی کاربردی جهت تخمین اولیه مقادیر پارامترهایی که در مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته اند مثل طول لوله اولیه، جابجایی محوری و فشار کالیبراسیون، ارائه شده است. سپس با

طول (L) در رابطه شماره (۳)، حد نهائی طول می‌باشد که در مرحله شکل دهی می‌تواند بطرف محفظه قالب تغذیه گردد. اگر این مقدار (L) به ناحیه انبساطی در قالب تزریق گردد، قطعه در حال شکل گیری پدیده نازک شدن در ضخامت را در بر نخواهد داشت.

با نگهداری فشار داخلی (P_i) در حداقل معینی می‌توان مانع پدید آمدن چروکیدگی و ضخیم شدن قطعه در زمانیکه مواد در حال حرکت بطرف محفظه انبساطی قالب است گردید. فشار داخلی برای یک مقطع مدور به صورت تقریبی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$P_i = \frac{(2 \times 0.85 \sigma_{ut})(t)}{(D - 2t)} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، اگر ضریب 0.85 وجود نداشت، (P_i) حداکثر فشاری بود که این استوانه تحت فشار داخلی می‌توانست تحمل نماید. ضریب 0.85 تقریبی است که به رابطه تحمیل شده و فشار را از حد ناپایداری و ترکیدگی تیوب کاهش داده است.

برای نسبت بزرگ $\frac{D}{t}$ ، مقدار $(D - 2t)$ تقریباً مساوی (D) و در نتیجه نسبت $\frac{(1 - t/D)}{(1 - 2t/D)}$ در رابطه (۳)، تقریباً مساوی یک می‌شود. لذا با استفاده از رابطه (۳) و (۴)، رابطه ساده‌ای برای طول (L) به صورت زیر حاصل می‌گردد.

$$L = \frac{D}{\mu(1.7)} \quad (۵)$$

برای مثال اگر ضریب اصطکاک بترتیب $\mu = 0.05$ ، $\mu = 0.1$ باشد، ماکزیمم طولی که می‌تواند به داخل محفظه انبساطی تغذیه گردد، عبارتست از:

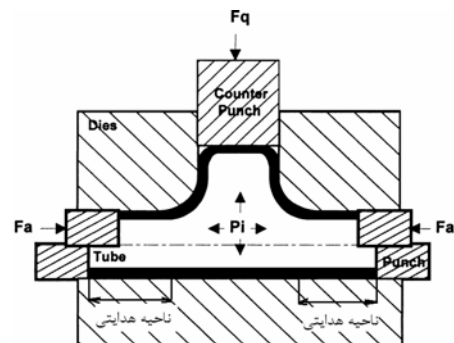
$$L = 12D \quad \text{برای } \mu = 0.05$$

$$L = 6D \quad \text{برای } \mu = 0.1$$

(L) در روابط بالا حداکثر طولی می‌باشد که در ناحیه هدایتی قالب قرار می‌گیرد، اما الزاماً کل این طول به ناحیه انبساطی قالب هدایت نمی‌گردد.

بمنظور محاسبه مقدار مواد لازم جهت تغذیه به ناحیه انبساطی در قالب می‌توان با استفاده از ایده حجم ثابت، این مقدار مواد را محاسبه نمود. برای این منظور حجم قطعه هیدروفرم شده را مساوی حجم تیوب اولیه قرار داده و از این طریق می‌توان مقدار طولی که باید به داخل

نیروی فشاری محوری (F_a) نیروی مقابل این نیرو یعنی نیروی اصطکاک (F_f)، ضریب اصطکاک بین جداره خارجی تیوب و سطح داخلی قالب (μ) و طول مورد نیاز (L)



شکل ۲: انبساط موضعی در فرآیند تیوب هیدروفرمینگ [۱].

برای یک لوله به قطر خارجی (D) و ضخامت (t) و تنش نهایی σ_{ut} (تنش حد نهایی برای حالت کشش و فشار، مساوی در نظر گرفته شده است)، ماکزیمم نیروی فشاری عبارتست از:

$$F_a = \pi(D - t)t(\sigma_{ut}) \quad (۱)$$

(F_a) ماکزیمم نیروی محوری است که می‌تواند اعمال شود.

(F_a) برآیند نیروئی می‌باشد که در جهت محور تیوب بر جداره تیوب وارد می‌گردد. نیروی اصطکاک (F_f) مقاومت لوله در برابر نیروی محوری بوده و به فشار داخلی، سطح تماس و ضریب اصطکاک بستگی دارد.

$$F_f = \pi(D)(L)(\mu)(P_i) \quad (۲)$$

F_f در هر لحظه از فرآیند با تغییر P_i و L تغییر میکند. در رابطه (۲)، طول (L) مقداری از طول اولیه تیوب می‌باشد که مستقیماً با بدنه قالب در تماس بوده و می‌تواند به ناحیه انبساطی در داخل قالب حرکت نماید.

P_i ، فشار تزریق شده به داخل لوله تعریف شده است.

با مساوی قرار دادن روابط (۱) و (۲)، طول تیوب (L) که می‌تواند به طرف محفظه قالب هدایت گردد، حاصل می‌گردد.

$$L = \frac{(D - t)t(\sigma_{ut})}{(D - 2t)\mu(P_i)} = \frac{(1 - t/D)t(\sigma_{ut})}{(1 - 2t/D)\mu(P_i)} \quad (۳)$$

زده می‌شود :

$$P_i)_b = \sigma_{ut} \frac{4t}{(D-t)} \quad (9)$$

که در آن $p_i)_b$ فشار ترکیبگی^۵، σ_{ut} تنش نهایی مواد می‌باشد. فشار کالیبراسیون^۶، فشار داخلی می‌باشد که برای هدایت مواد به گوشه‌های قالب (فشاری که در قادر است تیوب را بشکل قالب درآورد) لازم می‌باشد. این فشار را میتوان از رابطه زیر تخمین زد [۱۴]:

$$P_i)_{\max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_f \left[\ln \frac{r_b}{(r_b - t)} \right] \quad (10)$$

که در آن $p_i)_{\max}$ مساوی فشار کالیبراسیون بوده، σ_f تنش جریان، r_b شعاع گوشه قالب و t ضخامت تیوب می‌باشد.

با دانستن این سه مقدار فشار داخلی طراح قادر خواهد بود فشار اولیه کار را برای پروسه هیدروفورم قطعه Y شکل تخمین زده و سپس با اتصال خطی این فشارها به یکدیگر منحنی افزایش فشار را بطور بهینه بدست آورد. با استفاده از روش اجزاء محدود^۷ طراح میتواند منحنی فشار را بطور بهینه بدست آورد. باید یادآوری کرد که در زمانیکه نیروی کانتر وجود دارد فشار ترکیبگی انتظار می‌رود بزرگتر باشد.

نیروی سنبه مقابل (کوشن)

نیروی وارد بر سنبه مقابل بصورت تحلیلی از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} F_q &= F_p - F_f - F_u \\ F_p &= \pi(R_{pi} - t_{pi})^2 P_i \\ F_f &= 2\pi R_{pi} (l)(\mu)(P_i) \\ F_u &= 2\pi(R_{pi} - \frac{t_{pi}}{2})t_{pi}(\sigma_z) \\ F_q &= [\pi(R_{pi} - t_{pi})^2 P_i] - [2\pi(R_{pi})(l)\mu(P_i)] - [\pi(2R_{pi} - t_{pi})t_{pi}(\sigma_z)] \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن نیروهای F_u و F_f ، F_p بترتیب نیروهای وارد از طرف فشار داخلی، اصطکاک و کشش ماده می‌باشند که در شکل (۳) نشان داده شده اند. σ_z تنش جریان در ماده می‌باشد که بصورت تحلیلی قابل محاسبه نبوده و پیشنهاد می‌شود که طراح با استفاده از روش اجزاء محدود^۷ منحنی نیروی کانتر در مقابل جابجائی را بدست آورد.

محفظه هدایت شود را بطور تقریب حساب نمود. برای اشکال ساده میتوان حجم قطعه را بسادگی بطور دستی با ماشین حساب محاسبه نمود. برای اشکال پیچیده حجم قطعات را با استفاده از سیستم CAD میتوان مدل کرده و با دقت خوبی اندازه‌گیری نمائیم. در فرآیند محاسبه، پروفیل ضخامت، ثابت فرض می‌گردد. محاسبات انجام شده از این طریق، برای طول تزریق، کمی محتاطانه می‌باشد، اما بعنوان نقطه شروع بسیار خوب است. این مقدار میتواند در طول نمونه سازی^۳ بهینه گردد.

برای تیوبی که قطر آن (D) ، ضخامت آن (t) و طول تیوب (Bl) باشد و قطعه‌ای با حجم (V_c) و طول (Cl) از آن تولید شده باشد، مقدار طول قابل تغذیه (F_d) به ناحیه انبساطی قالب بصورت زیر محاسبه می‌گردد.

حجم ثابت

$$\begin{aligned} \pi(D)(t)(Bl) &= V_c \\ Bl &= \frac{V_c}{\pi(D)(t)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$F_d = Bl - Cl \quad (7)$$

برای بدست آوردن طول اولیه لوله کفایت تا طولی که باید تغذیه شود با طول قطعه نهایی جمع گردد. برای مقاطع Y و T شکل، حداکثر ارتفاع برآمدگی (نافی) و قطر برآمدگی عبارتند از:

$$\begin{aligned} Hb &= (1.0)(Dt) \\ Db &= (0.75t \text{ to } 1.0)(Dt) \end{aligned}$$

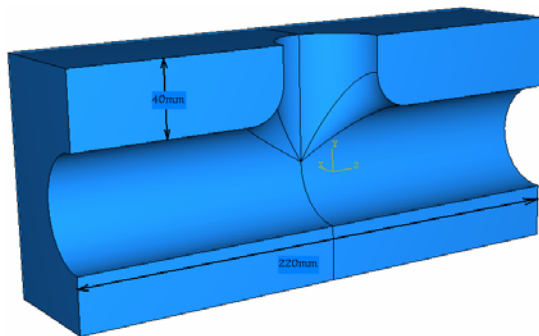
فشار داخلی [۱۴]

فشار تسلیم حداقل فشاری است که باید به تیوب وارد شود تا تیوب شروع به تغییر شکل نماید. مدل‌های تحلیلی که فشار تسلیم را ارائه می‌کنند برای یک تیوب با تقارن محوری و انتهای ثابت بر اساس تست بالچینگ^۴ حاصل می‌شوند. بر این پایه تخمین اولیه بسیار مناسبی در اختیار طراح قرار می‌گیرد.

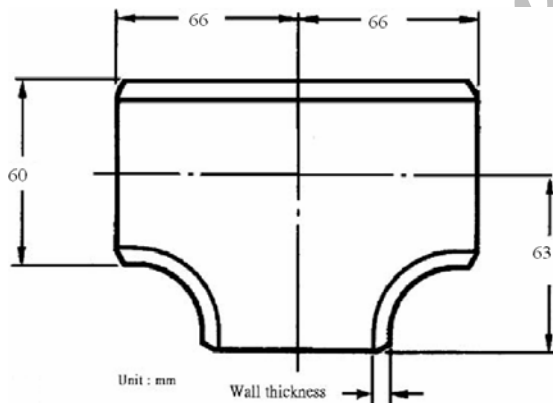
$$P_i)_y = S_y \frac{2t}{(D-t)} \quad (8)$$

در آن $p_i)_y$ فشار تسلیم، S_y تنش تسلیم مواد، t ضخامت اولیه تیوب و D قطر تیوب می‌باشد فشار ترکیبگی که در واقع ماکزیمم فشاری است که یک تیوب قبل از ترکیبگی می‌تواند تحمل کند از رابطه زیر تخمین

بعلت پیچیدگی، مدل هندسی قالب، در نرم افزار CATIA Dassault systems v5.R10 شبیه سازی شده و سپس در نرم افزار ABAQUS وارد^۹ گردیده و مورد استفاده قرار گرفت که ابعاد آن در شکل (۴) ارائه گردیده است. بدلیل تقارن قطعه و قالب نسبت به صفحات XY و ZY تنها ۱/۴ مدل سازی انجام شد. در مدل سازی اثر سنبه مقابل (کوشن) در نظر گرفته نشد. ابعاد قطعه نهایی در شکل (۵) ارائه شده است.

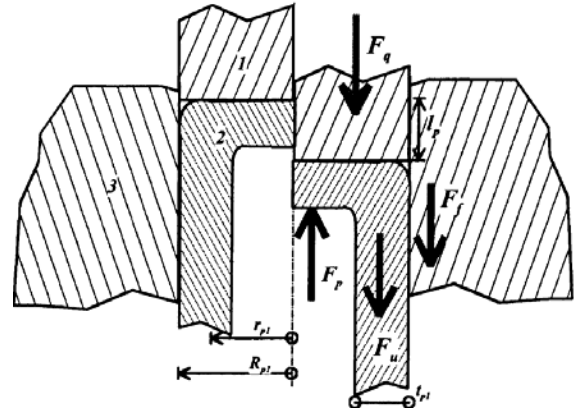


شکل ۴: نیمی از قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله برای تولید سه راهی.



شکل ۵: ابعاد قطعه نهایی.

برای مش بندی، از سه المان در ضخامت تیوب استفاده شد تا نتایج حاصله دقت لازم را داشته باشند. از المان ۸ گرهی C3D8R برای مش بندی تیوب و از المان صلب R3D4 برای مش بندی قالب استفاده گردید. مراحل مختلف شکل گیری قطعه در فشارهای داخلی و جابجایی های محوری در شکل (۶) مشاهده می شود.



شکل ۳: نمودار نیروهای اثر گذار بر سنبه مقابل.

با داشتن منحنی جابجایی سنبه مقابل^۸ تا زمانی که قطعه Y شکل، فرم نهایی خود را پیدا می کند، طراح قادر خواهد شد نیروی سنبه مقابل را از نیروی تماس سنبه مقابل با قسمتی از قطعه که در تماس می باشد با دقت خوبی محاسبه نماید.

مدلسازی

مدلسازی اجزاء محدود توسط نرم افزار ABAQUS/EXPLICIT 6.3-1 انجام شد. ابعاد لوله اولیه (قطر خارجی، قطر داخلی، ضخامت و طول اولیه)، خواص الاستیک (مدول الاستیک و ضریب پواسون)، خواص پلاستیک آلومینیوم AIMgSi05 که با قانون توانی Voce بصورت $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ بیان شده است و ضریب اصطکاک در جدول مشاهده می شود [۱۵]. طول اولیه لوله با مدلسازی ها و حل های مکرر بدست آمده و در تخمین اولیه آن از فرمول (۳) که در بخش مبانی تئوری ارائه شده استفاده گردیده است. با یک محاسبه ساده می توان فهمید که طول اولیه لوله از حداکثر مقدار مجاز که در بخش تئوری ارائه شده بود کمتر بوده و بنابراین قابل قبول می باشد.

جدول ۱: ابعاد لوله اولیه، خواص الاستیک و پلاستیک مواد و ضریب اصطکاک (ابعاد به میلی متر می باشند).

D_i	D_o	L_0	t	$E(\text{GPa})$	ν	$K(\text{MPa})$	n	μ
50	60	220	5	70	.3	300	.33	.1

در فرآیند هیدروفرمینگ لوله معمولاً ضریب اصطکاک در حضور روانسازها بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ در نظر گرفته می شوند [۱۶].

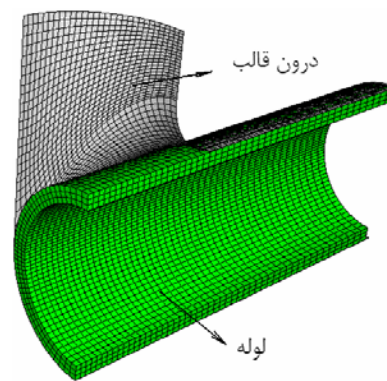
هدف از مدلسازی، تخمین بارگذاری ها یعنی فشار داخلی و جابجایی محوری است بطوریکه منجر به بدست آوردن محصولی باشد که دارای شرایط استاندارد است.

بر طبق استاندارد تولید سه راهی به روش هیدروفورمینگ لوله حداکثر نازک شدگی مجاز $12/5\%$ و حداقل ارتفاع برآمدگی مجاز بمنظور صحت برش سر نافی $0/63D$ می باشد ($PH > 0.63D$)، که در آن D قطر خارجی لوله است [۱۱]. طی حل های مکرر و کنترل کردن ابعاد محصول بدست آمده با استاندارد، منحنی بارگذاری مطابق شکل (۷) بدست آمد.

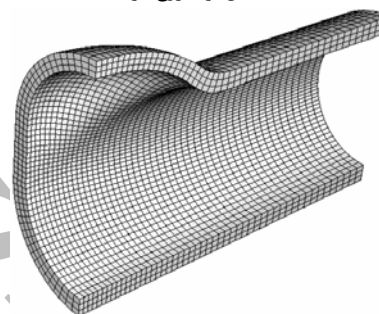
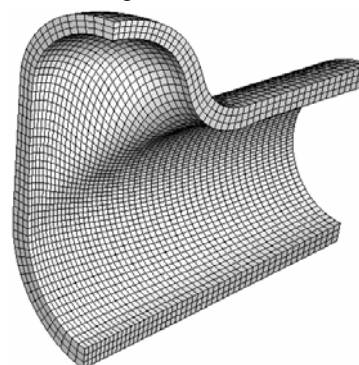
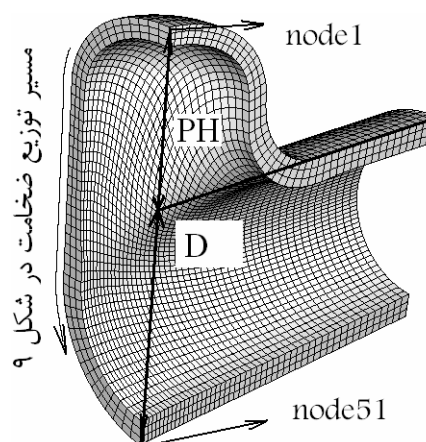
همانطور که در منحنی بارگذاری مشاهده می شود، در نیمه ابتدایی فرآیند، فشار داخلی بصورت خطی تا مقدار نهایی افزایش یافته و در نیمه دوم فرآیند فشار داخلی ثابت مانده و تنها جابجایی محوری اعمال می گردد. این منحنی بارگذاری در اکثر مقالات منتشر شده که به مدلسازی سه راهی پرداخته اند [۱۷،۹] مورد استفاده قرار گرفته است. بعلاوه در ضمن فرآیند تولید بصورت تجربی بطور واضح مشاهده گردید که با اعمال جابجایی محوری با سرعتی ثابت در ابتدای فرآیند، فشار داخلی با سرعت ثابتی افزایش یافته و در انتهای فرآیند گنج فشار مقدار ثابتی را نشان می داد که این پدیده نشان از صحت بارگذاری در مدل اجزاء محدود دارد.

سیال مورد استفاده در فرآیند هیدروفورمینگ لوله آب است که سیالی غیر قابل تراکم محسوب می شود. با اعمال جابجایی محوری در طول فرآیند، حجم داخلی قطعه اندکی کم می شود، بنابراین لازم است مقداری از آب از درون قطعه خارج شود. برای این منظور از یک شیر فشار شکن استفاده می شود تا فشار داخلی از مقدار خاصی تجاوز نکرده منجر به ترکیدگی نشود. به همین دلیل در منحنی بارگذاری فشار داخلی در انتهای فرآیند ثابت در نظر گرفته می شود.

همانطور که مشاهده می شود، فشار بدست آمده ۴۵ مگاپاسکال بین فشار تسلیم و فشار ترکیدگی که در فرمول های (۸) و (۹) در بخش میانی تئوری ارائه شده است قرار دارد. این دو فرمول می تواند محدوده ای تقریبی به مهندس طراح جهت مدلسازی و بهینه سازی نهایی فرآیند ارائه کند.



الف- قبل از شروع فرآیند

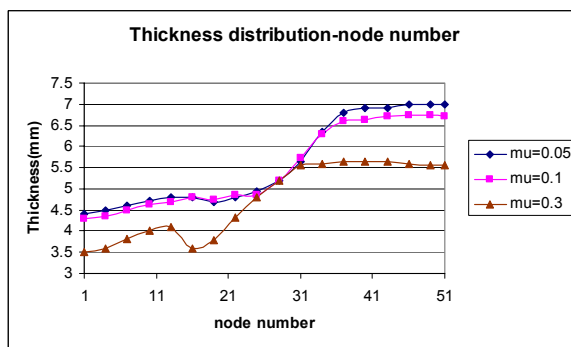
ب- $P=30\text{Mpa}$, $\text{feed}=15\text{mm}$ ج- $P=45\text{Mpa}$, $\text{feed}=30\text{mm}$ د- $P=45\text{Mpa}$, $\text{feed}=44\text{mm}$

شکل ۶: مراحل مختلف شکل گیری قطعه در طی فرآیند.

علاوه بر آن همانطور که در شکل (۸) مشاهده می شود با اعمال جابجایی محوری که در طول فرآیند با سرعتی ثابت اعمال می گردد، ارتفاع برآمدگی نیز بطور خطی افزایش می یابد. در صورتیکه اصولاً نباید تا فشار داخلی حدود ۲۰ مگاپاسکال که هنوز تنش در جداره لوله به حد تسلیم نرسیده است، تغییر شکل پلاستیک در قطعه اتفاق بیفتد. علت این پدیده اعمال جابجایی محوری می باشد که مواد را به قسمت میانی لوله می راند. اگر فشار داخلی اعمال نمی شد، با اعمال جابجایی محوری، لوله در قسمت وسط دچار چروک می شد، اما با اعمال فشار داخلی این چروک ها از بین رفته و در بالای لوله باعث برآمدگی و در قسمت پایین لوله باعث ضخیم شدگی می شوند.

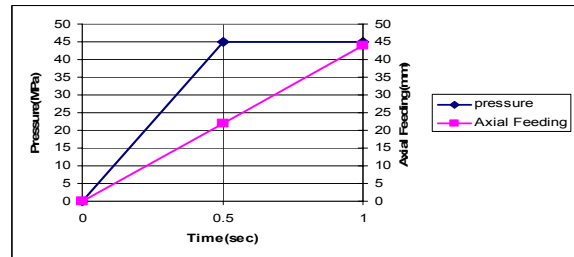
اثرات ضریب اصطکاک

در شکل (۹) مشاهده می شود که اصطکاک تاثیر منفی زیادی بر توزیع ضخامت محصول دارد (شماره گره ها در شکل ۶-۵) نشان داده شده است..



شکل ۹: اثر ضریب اصطکاک بر توزیع ضخامت.

برای ضریب اصطکاک ۰/۳ کلیه گره های مشخص شده دارای ضخامت کمتری نسبت به ضرایب اصطکاک کمتر از ۰/۳ هستند و این نشان می دهد که با افزایش ضریب اصطکاک، مواد قادر به حرکت به قسمت های میانی لوله نبوده و جابجایی محوری کارایی خود را از دست می دهد. بنابراین با انبساط خالص لوله در قسمت میانی توسط فشار داخلی، جداره دچار نازک شدگی شدیدی می شود. همچنین در قسمت برآمدگی نیروی اصطکاک زیاد مانع لغزش آسان سطح خارجی برآمدگی روی سطح داخلی قالب شده و در نتیجه ارتفاع برآمدگی مطابق شکل (۱۰) کاهش می یابد.



شکل ۷: منحنی بارگذاری.

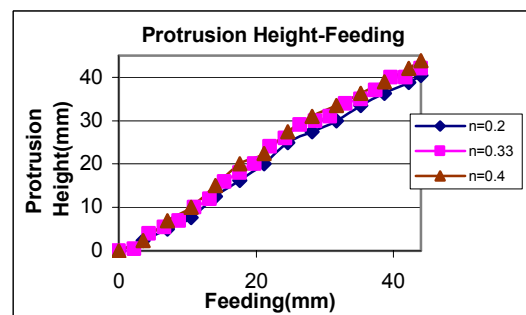
برای حفظ کیفیت مش بندی با وجود تغییر شکل های بزرگ در طول فرآیند، از تکنیک مش بندی تطبیقی^{۱۰} به روش ALE^{۱۱} استفاده گردید. در این روش پس از تعدادی تقسیم زمانی مشخص، مش بندی از نو^{۱۲} انجام می شود، تا از اعوجاج بیش از حد المان ها جلوگیری شود و سپس مقادیر متغیرها طی فرآیندی بنام ادوگشن^{۱۳} به گره های جدید اختصاص داده می شوند [۱۸].

تحلیل پارامترهای کلیدی فرآیند

در این قسمت به بررسی چند پارامتر مهم پرداخته میشود. تمام بررسی ها بر اساس منحنی بارگذاری ارائه شده در شکل (۷) و مشخصات جدول (۱) انجام شده است.

اثر ضریب کرنش سختی

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می گردد، با افزایش ضریب کرنش سختی n ، ارتفاع برآمدگی افزایش می یابد، که علت آن نرم شدن ماده و شکل پذیری بیشتر آن می باشد. بنابراین باید سعی نمود تا جایی ممکن از مواد نرم در این فرآیند استفاده نمود که آلومینیوم های سری 6xxx از این دسته بوده و کاربردهای زیادی در این فرآیند دارند.

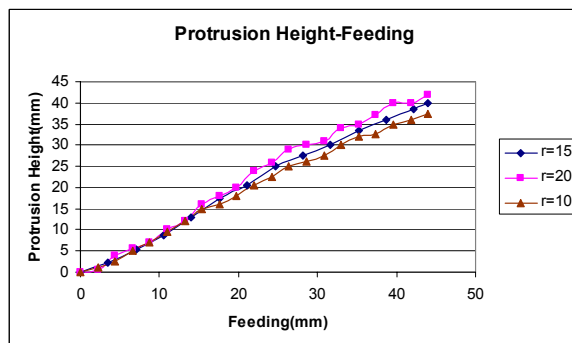


شکل ۸: ارتفاع برآمدگی در طول فرآیند با تغییرات ضریب کرنش سختی.

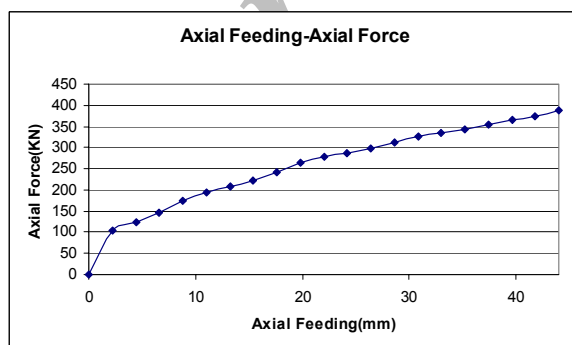
نیروی پرس افزایش می یابد. علت این پدیده این است که با افزایش ضریب اصطکاک، نیرویی که سطح خارجی برآمدگی به سطح حفره قالب به سمت بالا وارد می کند زیاد شده و نیروی پرس بیشتری برای ثابت نگهداشتن قالب لازم است.

اثر شعاع فیلت

همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می شود، با کاهش شعاع فیلت، ارتفاع برآمدگی کاهش می یابد. زیرا ماده برای داخل شدن به حفره درون قالب ناچار است تغییر جهت شدیدی داده و نمی تواند به راحتی جریان پیدا کند. بنابراین حتی الامکان باید سعی نمود تا از تغییر مسیرهای ناگهانی در جریان ماده خودداری نمود. شکل (۱۳) نیروی محوری را برای جابجایی های محوری مختلف نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در طول فرآیند نیروی محوری همواره برای راندن مواد به سمت قسمت برآمدگی افزایش می یابد. این نمودار برای تعیین مشخصات جک های جانبی کاربرد بسیار دارد.



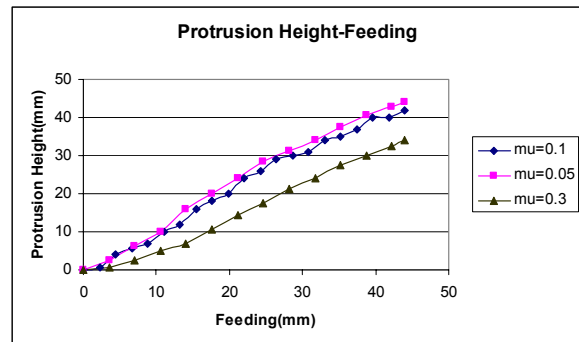
شکل ۱۲: ارتفاع برآمدگی در طول فرآیند برای شعاع های فیلت مختلف.



شکل ۱۳ - جابجایی محوری نسبت به نیروی محوری.

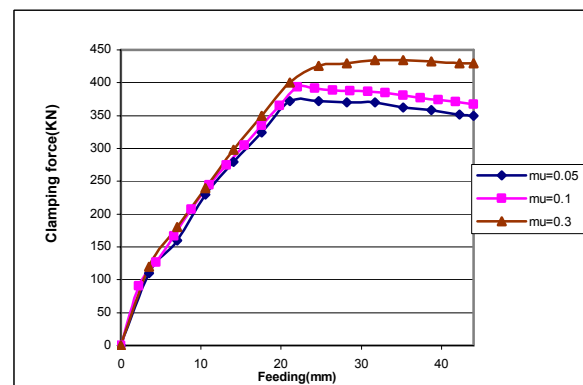
تولید چند نمونه آزمایشگاهی

با استفاده از مدلسازی اجزاء محدود، اثر پارامترهای مختلف فرآیند از جمله فشار کالیبراسیون، جابجایی



شکل ۱۰: تغییرات ارتفاع برآمدگی در طول فرآیند نسبت به ضریب اصطکاک.

بنابراین از پارامترهای مهم تاثیر گذار در فرآیند هیدروفرمینگ لوله ضریب اصطکاک است که باید با بکارگیری روانکار مناسب به حداقل برسد. یکی از نمودارهای کاربردی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله نمودار نشان داده شده در شکل (۱۱) است که مقدار نیروی پرس را مشخص می سازد. این نمودار به مهندس طراح در تعیین ظرفیت پرس کمک بسیار می کند. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، در نیمه اولیه فرآیند که فشار داخلی و جابجایی محوری بصورت خطی نسبت به زمان افزایش می یابد،



شکل ۱۱: نیروی پرس در طول فرآیند نسبت به ضرایب اصطکاک مختلف.

نیروی پرس نیز که حاصل ضرب فشار داخلی در سطح عمودی می باشد به صورت خطی افزایش می یابد. اما در نیمه دوم فرآیند با ثابت ماندن فشار و کاهش تدریجی سطح مقطع بر اثر اعمال جابجایی محوری، نیروی پرس با شیب کمی کاهش می یابد. نکته دیگری که از شکل (۱۱) می توان به آن پی برد این است که در نیمه اول فرآیند، برای تمامی ضرایب اصطکاک نیروی پرس تقریباً یکسان است، اما در نیمه دوم فرآیند با افزایش ضریب اصطکاک،

روانکار که یک صفحه نازک پلاستیکی می باشد روی قالب پایینی قرار داده می شود. سپس لوله مطابق شکل (۱۴)، درون قالب پایینی گذاشته می شود بطوریکه روانکار بین سطح داخلی قالب و سطح خارجی تیوب در حالیکه پیستون های جانبی ادامه برای آب بندی تیوب در حالیکه پیستون های جانبی به دو سر تیوب نیرو وارد می کنند، آب صابون که همان سیال فرآیند است به درون لوله تزریق می شود تا لوله از آن پر گردد. باید سعی شود تا پیستون های جانبی تا حدی لوله را بفشارند که آب بندی بطور کامل صورت گرفته و آب صابون از دو سر لوله به بیرون نپاشد. اگر آب بندی بطور کامل صورت نگیرد، در طول فرآیند وقتی فشار سیال بالا می رود نشتی زیادی رخ داده و قطعه بدلیل کاهش شدید فشار داخلی چروک می گردد. پس از این مرحله قالب بالایی روی قالب پایینی قرار گرفته (شکل ۱۵) و پیستون های جانبی شروع به حرکت کرده و فشار داخلی افزایش می یابد تا قطعه به شکل نهایی درآید. با اعمال ۴۴ میلیمتر جابجایی محوری بر اساس تحلیل اجزاء محدود، فشار داخلی لازم در آزمایش برای تولید محصولی با شرایط استاندارد ۵۰ مگاپاسکال بدست آمد، که نشان دهنده یک خطای ۱۰ درصدی بین نتایج اجزاء محدود و آزمایش می باشد. دو نمونه از قطعات نهایی در شکل (۱۶) نشان داده شده اند. توزیع ضخامت در محصول پس از بریده شدن سر برآمدگی در شکل (۱۷) برای دو حالت تجربی و اجزاء محدود نشان داده شده است. مشاهده می شود که حداکثر درصد خطای روش اجزاء محدود نسبت به تجربه در محل بریده شدن برآمدگی (نقطه ۱) بوده و برابر با ۶ درصد می باشد. همچنین حداکثر نازک شدگی در تجربه ۵/۵ درصد است که بنابر استاندارد ذکر شده در محدوده قابل قبول قرار دارد. روش اجزاء محدود این مقدار را ۱۲ درصد پیش بینی می کند.

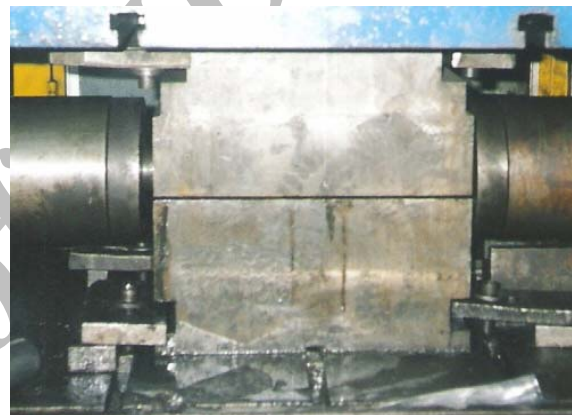
حالات مختلف خرابی

همانطور که در مقدمه اشاره شد سه حالت مختلف خرابی در فرآیند تیوب هیدروفورمینگ عبارتند از: کمانش، چروکیدگی و ترکیدگی. در قطعه T شکل کمانش اتفاق نمی افتد زیرا لوله بطور کامل توسط دو قالب بالایی و پایینی نگه داشته شده و فضایی برای کمانش وجود ندارد. چروکیدگی وقتی اتفاق می افتد که جابجایی محوری زیاد

محوری، ضریب اصطکاک، شعاع فیلت و ضریب کرنش سختی بررسی شد. سپس برای تولید نمونه و ارزیابی نتایج مدلسازی، فرآیند تولید بشرح زیر انجام گردید.



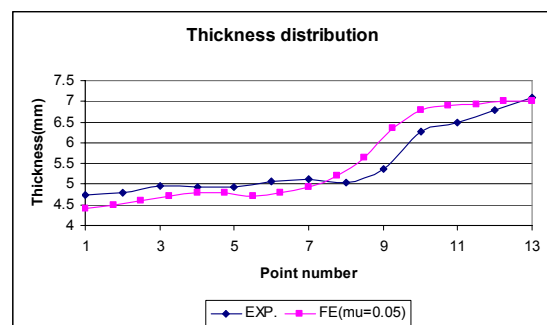
شکل ۱۴: موقعیت قالب و لوله و تعدادی از قالب های تغییر شکل نیافته.



شکل ۱۵: قالب ها در حالت بسته.



شکل ۱۶: دو نمونه از قطعات نهایی تولید شده به همراه لوله اولیه.



شکل ۱۷: مقایسه توزیع ضخامت در حالت تجربی و اجزاء محدود (مسیر در شکل ۶-۵ نشان داده شده است).

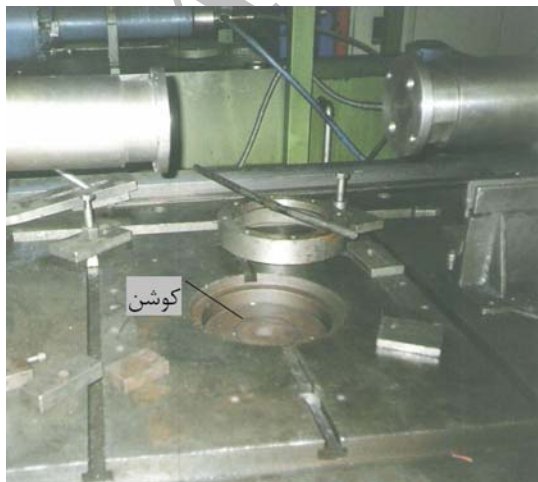
در انتهای برآمدگی بعلت نازک شدگی و در راستای محوری لوله رخ می دهد (شکل ۱۸-ب). نمونه دیگری از ترک ها در شکل (۱۹) نشان داده شده اند. این ترک ها در طرفین قطعه و در مسیری است که بیشترین جریان مواد وجود داشته و کرنش های پلاستیک حداکثر مقدار خود را دارند (شکل ۱۹-ب). در کانتور کرنش معادل فون میسر مشاهده می شود که بیشترین کرنش پلاستیک معادل در طرفین قطعه اتفاق می افتد. در این منطقه قطعه تحت تنش فشاری محوری و تنش کششی محیطی قرار دارد که تنش های اصلی هستند. از شکل (۱۹-الف) مشاهده می گردد که جهت ترک خوردگی تقریباً در راستای حداکثر تنش برشی می باشد.

صافی سطح

در طی فرآیند تیوب هیدروفرمینگ، لوله همواره تحت فشار داخلی قرار داشته و در جهت محیطی انبساط می یابد. بنابراین کوچکترین خراش موجود روی سطوح خارجی یا داخلی لوله که در طی فرآیند تولید لوله بوجود می آید می تواند باز شده و منشا ایجاد ترک باشند. بنابراین کیفیت لوله اولیه بکار رفته در فرآیند تیوب هیدروفرمینگ از اهمیت بالایی برخوردار است.

سنجه مقابل (کوشن)

برای کنترل ارتفاع برآمدگی و بمنظور جلوگیری از ترکیدگی صفحه ای دایره ای در مسیر برآمدگی (نافی) قرار داده می شود که کوشن نام دارد (شکل ۲۰). این صفحه از پشت به جکی هیدرولیکی متصل بوده و موقعیت اولیه و فشار پشت آن قابل تنظیم می باشد.



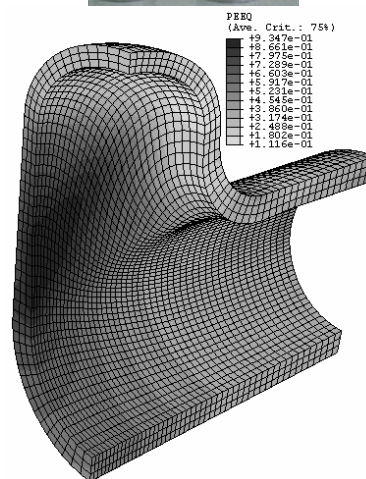
شکل ۲۰: کوشن در حالی که قالب پایینی برداشته شده است.

و فشار داخلی کم باشد. در عمل این حالت زمانی پیش می آید که آب بندی بدرستی و بطور کامل انجام نشده باشد. زیرا در اینصورت با افزایش فشار داخلی، سیال به بیرون نشت کرده و باعث کم شدن فشار می گردد و این پدیده باعث بوجود آمدن چروکیدگی می شود (شکل ۱۸-الف).



شکل ۱۸ الف: قطعات چروک خورده.

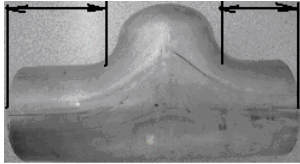
ب- قطعات ترکیده.



شکل ۱۹ الف: ترکیدگی در جانب قطعه.

ب- کانتور کرنش معادل فون میسر.

خرابی قطعات هیدروفرم عمدتاً از نوع ترکیدگی است. ترکیدگی بر اثر افزایش بیش از حد فشار داخلی رخ داده و باعث ایجاد ترک در قطعه می گردد. ترک ایجاد شده اکثراً



شکل ۲۲: نمونه یک قطعه بر اثر عدم هماهنگی پیستون های جانبی تناسب خود را از دست داده است.

نتیجه گیری

نتیجه حاصل از مدل سازی اجزاء محدود این بود که فشار داخلی لازم برای تولید قطعه برابر ۴۵ مگاپاسکال است که این مقدار در واقعیت حدود ۵۰ مگاپاسکال بوده و این امر نشان می دهد که نتایج مدل سازی می تواند بعنوان یک تقریب مناسب با خطای ده درصد از پارامترهای فرآیند مورد اطمینان باشد.

می توان از روش اجزاء محدود بعنوان شیوه ای مناسب و قدرتمند برای تحلیل تغییر شکل های بزرگ و مسایل پیچیده جریان مواد در شکل دهی فلزات بهره گرفت. با این روش می توان کل فرآیند تولید را مدل سازی کرده و اثر تغییر هر پارامتر را در طراحی و بهبود کیفیت محصول ملاحظه کرد. روش اجزاء محدود هزینه و زمان تولید یک محصول را بطور چشمگیری کاهش می دهد. در این تحقیق، قبل از ساخت نمونه سه راهی آلومینیومی برای اولین بار در ایران به روش تیوب هیدروفورمینگ، پارامترهای مهم طراحی مانند جابجایی محوری، منحنی بارگذاری، فشار کالیبراسیون، اصطکاک و توزیع ضخامت محصول بررسی و جواب های حاصله از مدل سازی با مقادیر تجربی مورد مقایسه، دقت و ارزیابی قرار گرفت. همانگونه که اشاره شد نتایج تجربی و مدل سازی انطباق بسیار خوبی داشته و فشار کالیبراسیون حدود ۱۰ درصد تفاوت داشت. نتایج بدست آمده از مدل سازی اجزاء محدود به اختصار به شرح زیر می باشند

- هرچه ضریب کرنش سختی n بیشتر باشد، ارتفاع برآمدگی نیز بیشتر خواهد بود، اما این تاثیر نسبت به اصطکاک کمتر می باشد.
- هرچه ضریب اصطکاک بیشتر باشد، ارتفاع برآمدگی کمتر، توزیع ضخامت غیر یکنواخت تر و نیروی پرس بیشتر خواهد بود. با افزایش ضریب اصطکاک، محل ضخامت مینیمم بجای بالای برآمدگی در طرفین قطعه اتفاق می افتد (شکل ۹). زیرا در مواردی که اصطکاک

هر چه موقعیت اولیه کوشن به لوله نزدیک تر باشد، برآمدگی زودتر به کوشن برخورد کرده و هر چه فشار جک هیدرولیکی کوشن بالا تر تنظیم شود، نیروی مقاوم در برابر افزایش ارتفاع نافای زیاد تر می شود و منجر به تخت شدن سر نافای می گردد (شکل ۲۱).



شکل ۲۱: اثر کوشن.

روانکار

همانطور که در بخش مدل سازی نشان داده شد، روانکار از مهمترین پارامترهای موثر در فرآیند می باشد. برای کم کردن اصطکاک بین سطح داخلی قالب و سطح خارجی لوله در این آزمایش از صفحه نازک پلاستیکی بعنوان روانکار استفاده شد که بسیار ارزان و در دسترس می باشد. این روانکار از نوع روانکار جامد در فرآیند تیوب هیدروفورمینگ محسوب شده و تاثیر خوبی در بهبود کیفیت محصول و تمیز نمودن نهایی آن دارد.

سرعت پیستون های جانبی

سرعت جابجایی محوری تاثیر زیادی روی فرآیند تیوب هیدروفورمینگ دارد. اگر سرعت اعمال جابجایی محوری بسیار کم باشد ممکن است نشستی اتفاق افتاده و اگر سرعت جابجایی محوری بسیار زیاد باشد رفتار ماده بعلت سرعت بالای تغییر شکل اندکی ترد تر شده و امکان ترکیدگی بالا می رود. سرعت مناسب برای بدست آوردن محصول قابل قبول در این آزمایش ۶ میلیمتر بر ثانیه بدست آمد.

از نکات تجربی و با اهمیت دیگر در طی فرآیند تولید، هماهنگ کردن حرکت پیستون های جانبی است. اگر سرعت پیستون های کناری با هم برابر نباشد، قطعه حاصله تناسب لازم را از لحاظ ابعادی نخواهد داشت (شکل ۲۲).

• در صورت وجود فشار شکن در دستگاه پرس، باید به درستی تنظیم گردد.

امروزه تمام حرکات دستگاه های پرس قابل کنترل دقیق بوده و می توان با داشتن دانش مدلسازی، به سادگی و با اطمینان خاطر قطعات متنوع و پیچیده ای را تولید کرد. نتایج حاصل از مدلسازی، هماهنگی بسیار مناسبی با قطعاتی داشت که در این فرآیند تولید شدند.

بعنوان پیشنهاد برای مطالعات بعدی، می توان به بهینه کردن فرآیند هیدروفرمینگ لوله از روش های مختلف بهینه سازی به همراه روش اجزای محدود، و همچنین مدلسازی تطبیقی^{۱۴} برای بدست آوردن منحنی بارگذاری مناسب برای رسیدن به محصول مطلوب تر اشاره کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران که در قالب طرح های SBDC این پروژه تحقیقاتی را حمایت نمود تشکر می نمایند. همچنین از مجموعه ستاد طرح های SBDC، حوزه معاونت پژوهشی پردیس دانشکده های فنی و شرکت توس پیوند که امکانات خود را جهت تولید سه راهی در اختیار گذاشت تشکر بعمل می آید.

زیاد می باشد، فشار داخلی که از زیر به برآمدگی وارد می شود، باعث کشش بیش از حد در طرفین قطعه می گردد. اما در مواردی که ضریب اصطکاک کم است از آنجایی که مقاومت کمی در برابر جریان مواد از پایین به بالا وجود دارد، مواد به راحتی به قسمت برآمدگی جریان پیدا می کنند.

• هرچه شعاع فیلت بیشتر باشد، مواد راحت تر جریان پیدا کرده و ارتفاع برآمدگی افزایش خواهد یافت.

همچنین در بخش مدلسازی دو نمودار کاربردی جهت طراحی فرآیند که تعیین کننده ظرفیت پیستون های کناری و پرس هستند ارائه گردید.

همچنین در فرآیند تولید سه راهی آلومینیومی به روش تیوب هیدروفرمینگ تجربیات مفیدی بدست آمد که بطور خلاصه به آنها اشاره می شود.

• صافی سطح لوله در کاهش ضایعات بسیار تاثیر گذار است.

• تنظیم موقعیت اولیه کوشن و فشار جک آن در تولید محصولات مناسب با اهمیت می باشد.

• سرعت پیستون ها باید تنظیم شده و از حرکت نا متناسب آنها جلوگیری شود.

مراجع

- 1 - M. Ahmetoglu, T. Altan, (2000). "Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends." *Journal of Materials processing Technology*, Vol. 98, PP. 25-33.
- 2 - Mousavi Mashhadi, M. (2005). *Final report of SBDC project on production of parts with use of tube hydroforming*, University of Tehran (In Farsi).
- 3 - Kashani-Zadeh, H. and Mousavi Mashhadi, M. (2005). "F. E. Analysis of hydro forming parameters for different cross-section." *International Congress on Manufacturing*, Tehran, Iran (In Farsi).
- 4 - Yeong-Maw Hwang, Taylan Altan, (2002). "Finite element analysis of tube hydroforming processes in a rectangular die." *Finite elements in analysis and design*, Vol. 39, PP. 1071-1082.
- 5 - Yeong-Maw Hwang, Taylan Altan, (2002). "FE simulation of the crushing of circular tubes into triangular cross-sections." *Journal of Materials processing Technology*, Vol. 125-126, PP. 833-838.
- 6 - H.L. Xing, A. Makinouchi, (2001). "Numerical analysis and design for tubular hydroforming." *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 43, PP. 1009-1026.
- 7 - Kristofer Trana, (2002). "Finite element simulation of the tube hydroforming process-bending, preforming and hydroforming." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, PP. 401-408.
- 8 - H. Kashani Zadeh, M. Mosavi Mashhadi, (2005). "Investigation of the effects of a crushing process on tube hydroforming of an automobile part." *Submitted to The Journal of materials processing technology*.

- 9 - P. Ray., B.J. Mac Donald, (2004). "Determination of the optimal load path for tube hydroforming processes using a fuzzy load control algorithm and finite element analysis." *Finite elements in analysis and design*, Vol. xxx, PP. xxx-xxx.
- 10 - A. Aydemir a., J.H.P. de Vree a, W.A.M. Brekelmans a, M.G.D. Geers a, W.H. Sillekens b, R.J. Werkhoven, (2004). "An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, PP. 303-310.
- 11 - F.C.Lin, C.T.Kwan, (2004). "Application of abductive network and FEM to predict an acceptable product on T-shape tube hydroforming process." *Computers and structures*, Vol. 82, PP. 1189-1200.
- 12 - Jae-Bong Yang, Byung-Hee Jeon, Soo-IK Oh, (2001). "Design sensitivity analysis and optimization of the hydroforming process." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, PP. 666-672.
- 13 - Yingyot Aue-U-Lan, Gracious Ngaile, Taylan Altan, (2004). "Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, PP. 137-143.
- 14 - Suwat Jirathearanat, Christoph Hartl, Taylan Altan, (2004). "Hydroforming of Y shapes-product and process design using FEA simulation and experiment" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, PP. 124-129.
- 15 - Kashani-Zadeh, H. (2005). *F. E. Modeling in tube hydro forming*, M.S Thesis, University of Tehran (In Farsi).
- 16 - Safari, A. (2005). *Friction in tube hydro forming processes*, B.S project, University of Tehran (In Farsi).
- 17 - M.Koc, Ted Swat, Jira Theranat, Taylan Altan, (2000). "The use of FEA and design of experiments to establish design guidelines for simple hydroformed parts." *Machine tools and manufacture*, Vol. 40, PP. 2249-2266.
- 18 - Abaqus 6.3-1 User's Manual, 2000.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 1 - Implicit | 2 - Explicit | 3- Prototype |
| 4 - Bulging | 5 - Bursting Pressure | 6 - Calibrating pressure |
| 7 - FEA | 8 - Counterpunch | 9 - Import |
| 10 - Daptive Simulation | 11- Arbitrary Eulerian Lagrangian | 12 - Remeshing |
| 13 - Advection | 14 - Adaptive Simulation | |