ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

10.22034/IJME.2023.417115.1830

بررسی شبیه‌سازی تأثیر زوایای کانال و انحنای مختلف بر کرنش مؤثر و نیروی فرآیند در فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با استفاده از مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل

امیر آقابابائی[۱]، محمد هنرپیشه[۲*]

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: honarpishe@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۳۰ شهریور ۱۴۰۲

پذیرش: ۱ آبان ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای

مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل

روش اجزا محدود

زوایای کانال و انحنا

کرنش موثر

چکیده

فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای یکی از روش‌های جدید جهت تولید لوله‌های با خواص مکانیکی و ریزساختاری بسیار خوب می‌باشد. مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل در این فرآیند، به دلیل همگنی در کرنش بالا و نیروی کم مورد نیاز، نسبت به مقطع کانال‌های دیگر ترجیح داده می‌شود. در این تحقیق، فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل با استفاده از زوایای کانال و انحنای مختلف در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد و سپس یک پاس فرآیند بر روی نمونه‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده اعمال گردید. پس از آن تاثیر این زوایا بر کرنش موثر و همچنین نیروی فرآیند نشان داده شد. به منظور اعتبارسنجی نیز نتایج حاصل از روش اجزای محدود با نتایج مدل تحلیلی مقایسه و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از نمونه‌های تحت فرآیند قرار گرفته شده نشان داد که با کاهش زوایای کانال و انحنای قالب، کرنش موثر اعمالی افزایش یافته است. با افزایش زاویه‌ی انحنا، همگنی در کرنش بیش‌تر شده و در نتیجه همگنی در سختی و ریزساختار افزایش یافته است. نیروی فرآیند نیز با افزایش زوایای کانال و انحنا، کاهش یافته است. هم‌چنین میان نتایج حاصل از روش اجزای محدود با نتایج مدل تحلیلی توافق خوبی برقرار بوده است.

Simulation study of the effect of different channel and curvature angles on the effective strain and process load in the tubular channel angular pressing (TCAP) process using a trapezoidal channel cross-section

Amir Aghababaei[1], Mohammad Honarpisheh[2*]

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

* Corresponding Author's Email: honarpishe@kashanu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 21 September 2023

Accepted: 23 October 2023

Keywords:

Tubular Channel Angular Pressing

Trapezoidal Channel Cross-section

Finite Element Method

Channel and Curvature Angles

Effective Strain

Abstract

Tubular channel angular pressing (TCAP) process is one of the new methods to produce tubes with very good mechanical and microstructural properties. The trapezoidal channel cross-section is preferred in this process due to its high strain homogeneity and low required load compared to other channel cross-sections. In this research, the TCAP process with a trapezoidal channel cross-section was modeled using different channel and curvature angles in Abaqus software and then one pass of the process was applied to annealed aluminum 6061 samples. After that, the effect of these angles on the effective strain as well as process load was shown. For validation, the results of the finite element method (FEM) were compared and analyzed with the analytical model. The results of the processed samples showed that reducing the channel and curvature angles increases the applied effective strain. By increasing the curvature angle, the strain homogeneity has increased, and as a result, the hardness and microstructure homogeneity have increased. The process load has also decreased with the increase of channel and curvature angles. Also, there was a good agreement between the FEM results and the analytical model.

Please cite this article using:

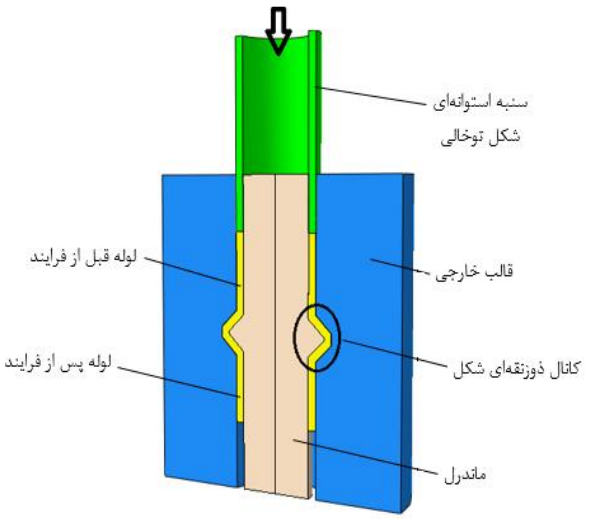
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Aghababaei A, Honarpisheh M. Simulation study of the effect of different channel and curvature angles on the effective strain and process load in the tubular channel angular pressing (TCAP) process using a trapezoidal channel cross-section. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 March 21;10(1):30-37. doi: 10.22034/IJME.2023.417115.1830 [In Persian]

۱– مقدمه

روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید[1]، به عنوان ابزاری قدرتمند، در جهت تولید مواد فوق ریزدانه شناخته شده‌اند [۱-۴]. استحکام این مواد ۲ تا ۴ برابر بیش‌تر از مواد با اندازه‌ی دانه‌ی معمولی است، بنابراین مقاومت فشاری بالاتری دارند. با استفاده از این روش‌ها می‌توان لوله‌های با استحکام بالا در صنایع‌هوایی، خودروسازی، پزشکی و ... تولید کرد. استفاده از نسبت استحکام بر وزن بالا باعث کاهش وزن قطعات و هم‌چنین کاهش مصرف انرژی می‌شود.

با توجه به سازگاری سودمند فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار مساوی[2]، روشی کارآمد به نام فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای[3]، برای اولین بار به منظور تولید لوله‌های با کرنش زیاد توسط فرجی و همکاران پیشنهاد داده شد. در این فرآیند از مقطع کانال مثلثی جهت فوق ریزدانه کردن لوله‌های منیزیمی استفاده شده است [۵]. فرجی و همکاران، هم‌چنین از مقطع کانال‌های مثلثی و نیم‌دایره‌ای در فرآیند مذکور جهت فوق ریزدانه کردن لوله‌های منیزیمی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که همگنی کرنش در راستای ضخامت نمونه‌ی مقطع نیم‌دایره‌ای بهتر از مثلثی بوده و نیروی کم‌تری نیز احتیاج دارد. همگنی بالای کرنش در راستای طول نیز برای هر دو مقطع کانال دیده شد [۶]. از آن‌جا که نیروی فرآیند و همگنی در کرنش، دو پارامتر بسیار مهم در فرآیندهای شکل‌دهی به شمار می‌روند، استفاده از مقطع قالبی که با کاهش نیروی فرآیند باعث کاهش مصرف انرژی و با افزایش همگنی در کرنش، باعث افزایش استحکام لوله‌ها شود، مورد مطلوب می‌باشد. مطابق با تحقیقات انجام شده حاصل از روش اجزای محدود در فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای، نیروی فرآیند در مقطع کانال ذوزنقه‌ای، بسیار کم‌تر از مقطع کانال مثلثی و تقریباً برابر با کانال نیم‌دایره‌ای است. هم‌چنین همگنی کرنش در این مقطع کانال نسبت به مقطع کانال نیم‌دایره‌ای و مثلثی و فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی[4] نیز بیش‌تر می‌باشد [۷]. در تحقیقات انجام شده در فرآیند مذکور با مقطع کانال ذوزنقه‌ای، نشان داده شد که این مقطع می‌تواند ریزساختار نمونه‌های تحت فرآیند قرار گرفته شده را به طور چشم‌گیری کاهش دهد. هم‌چنین استحکام‌های تسلیم، نهایی و سختی نیز افزایش یابد [۸]. شکل ۱، اصول فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل را نشان می‌دهد.



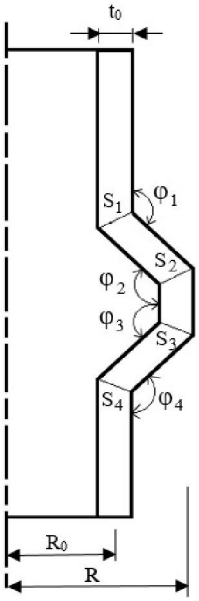
شکل ۱ شماتیکی از فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل [۸]

لوله میان قالب‌های داخلی و خارجی به وسیله یک سنبه‌ی استوانه‌ای توخالی در کانال زاویه‌دار لوله‌ای تحت فشار قرار گرفته و در نتیجه مواد لوله در قسمتی که چهار صفحه‌ی برشی S_1، S_2، S_3 و S_4 به وجود می‌آیند، تحت فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای قرار خواهند گرفت. سطح مقطع لوله تحت فرآیند قرار گرفته شده در پایان فرآیند بدون تغییر باقی می‌ماند. کرنش موثر ($\bar{\varepsilon}$) به‌دست آمده از فرآیند

[1] Severe Plastic Deformation (SPD)
[2] Equal Channel Angular Pressing (ECAP)
[3] Tubular Channel Angular Pressing (TCAP)
[4] Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP)

فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل توسط فرجی و همکاران با استفاده از روابط پلاستیسیته مهندسی به دست آمده است [۵]. رابطه‌ی مربوطه برای مقطع کانال نشان داده شده در شکل ۲ با چهار زاویه کانال (φ_i (i = 1-4)، چهار صفحه برشی ($S_1 ... S_4$) و زوایای انحنا (ψ_i (i = 1-4) توسط رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\bar{\varepsilon}_t = \sum_{i=1}^{4} \left[\frac{2\cot(\varphi_i/2 + \psi_i/2) + \psi_i \operatorname{cosec}(\varphi_i/2 + \psi_i/2)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{4}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{R_0} \quad (۱)$$



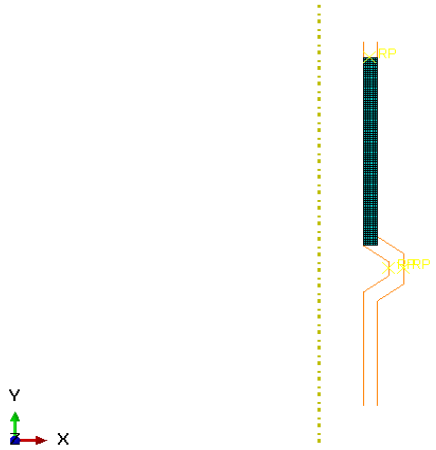
شکل ۲ پارامترهای فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل [۸]

در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، بهینه‌سازی پارامترهای قالب در طراحی آن‌ها به منظور تولید قطعات فوق ریزدانه و نانو ساختار بسیار حائز اهمیت است. استفاده از مقطع کانال ذوزنقه‌ای در فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای، می‌تواند به طور موثری باعث افزایش همگنی کرنش و کاهش نیرو در تولید نمونه‌های لوله‌ای شود. لذا استفاده از زوایای کانال و انحنای مختلف نیز اثرات موثری بر کرنش همگنی نمونه‌ها و تغییر در نیروی فرآیند می‌تواند داشته باشد.

از آن‌جا که تا به حال بررسی پارامترهای قالب فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای مورد مطالعه قرار نگرفته است، لذا در این تحقیق به منظور بررسی کرنش موثر و نیروی فرآیند در این روش با مقطع کانال مذکور از زوایای کانال و انحنای مختلف استفاده گردیده است. بدین منظور در نرم‌افزار آباکوس، فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای مدل‌سازی شد و سپس یک‌پاس فرآیند بر روی قطعات لوله‌ای از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده انجام‌گرفت. برای اعتبارسنجی نیز نتایج حاصل از روش اجزای محدود برای پارامتر کرنش پلاستیک معادل با مدل تحلیلی مقایسه گردید.

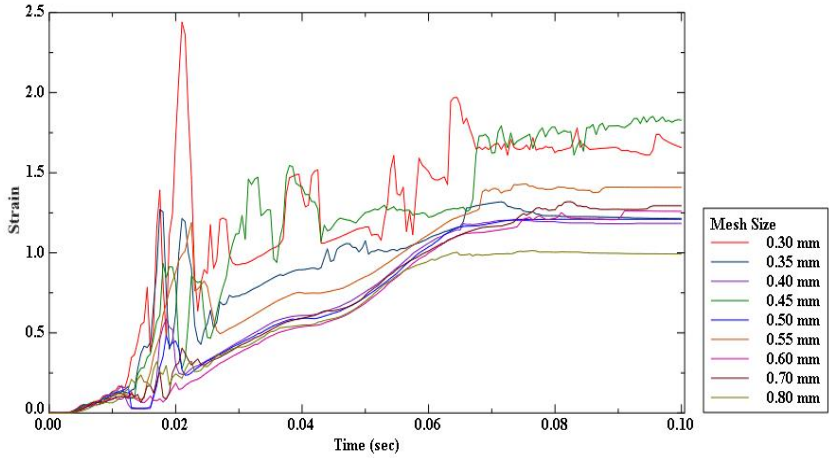
۲– روش تحقیق

شکل ۳ نمونه‌ای از مدل ساخته شده در محیط مش را نشان می‌دهد. جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. نمونه‌ی لوله‌ای با قطر خارجی ۲۰، ضخامت ۲/۵ و طول ۳۵ میلی‌متر به صورت تقارن محوری مدل‌سازی و از المان‌های چهار گره‌ای جهت مش‌بندی لوله استفاده گردیده است. به دلیل تغییر شکل‌های هم‌محور، در روند بارگذاری قید حرکتی برای سنبه در نظر گرفته شده است که در جهت محور قائم اعمال می‌شود. زمان فرآیند ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شده که برای مدل‌سازی یک فرآیند شبه استاتیکی به اندازه کافی بزرگ است. لوله از نوع تغییر شکل‌پذیر و قالب خارجی، ماندرل و سنبه استوانه‌ای توخالی به صورت صلب تحلیلی فرض شده‌اند. ماندرل و قالب با اعمال قید ثابت شده و پیشروی به سنبه استوانه‌ای تو خالی اعمال می‌شود.



شکل ۳ نمونه‌ای از مدل تقارن محوری ساخته‌شده در محیط مش نرم‌افزار

اصطکاک بین لوله و قالب‌ها، اصطکاک کولمبی و روش پنالتی، ضریب اصطکاک ۰/۰۵ [۹] و اندازه‌ی المان‌ها پس از بررسی حساسیت در برابر تغییر مش برابر ۰/۴ میلی‌متر فرض شده‌اند. شکل ۴، نمودار حساسیت در برابر تغییر مش را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر بالای کرنش‌ها و تغییر شکل‌های زیاد در حین شبیه‌سازی فرآیند، برای تسهیل همگرایی از روش مش‌بندی تطبیقی یا مش‌بندی مجدد اتوماتیک استفاده گردید. برای کاهش زمان حل، از مقیاس‌دهی جرمی استفاده شد و نسبت انرژی درونی به انرژی جنبشی برای حفظ شبه استاتیک بودن فرآیند، کنترل شد. لوله‌ها از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده در نظر گرفته شدند. جدول ۱ خواص الاستیک و پلاستیک آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده را نشان می‌دهد.



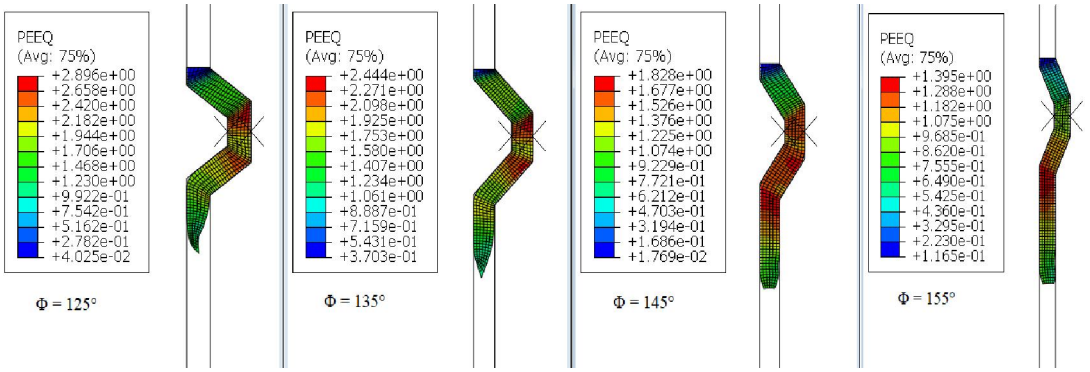
شکل ۴ نمودار حساسیت در برابر تغییر مش برای پارامتر کرنش موثر در فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل

جدول ۱ خواص الاستیک و پلاستیک آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل‌شده [۱۰]

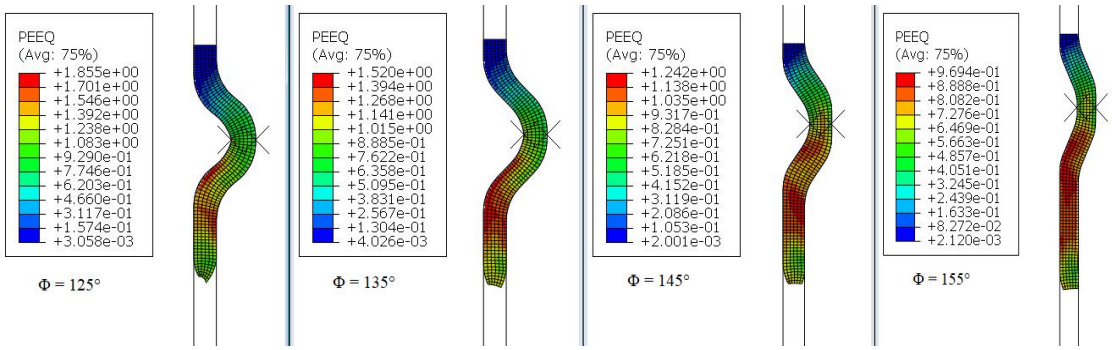
پارامتر	مقدار
ضریب پواسون	۰/۳۳
مدول الاستیسیته (GPa)	۶۸/۹
چگالی (Kg/m^3)	۲۷۰۰
تنش تسلیم (MPa)	۵۵/۲
تنش نهایی (MPa)	۱۲۴

۳- نتایج و بحث

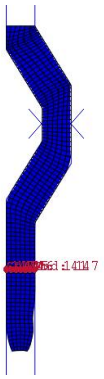
شکل ۵ و ۶، کانتورهای کرنش موثر به‌دست آمده برای لوله‌ی آلومینیومی در فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای برای چهار زاویه‌ی کانال ۱۵۵° و ۱۴۵°،۱۳۵°،۱۲۵°= Φ_i در دو زاویه‌ی انحنای صفر و پنج درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زاویه انحنای صفر درجه با افزایش زاویه‌ی کانال، کرنش موثر اعمالی بر نمونه کاهش یافته است. هم‌چنین در زاویه انحنای ۵° نیز کاهش زاویه‌ی کانال قالب باعث افزایش کرنش موثر اعمالی شده است. در شکل ۷، مسیری در طول ضخامت نمونه‌ی تحت فرآیند در نظر گرفته شده است و نمودار کرنش موثر در طول این مسیر از سطح داخلی به خارجی لوله برای هر زاویه کانال و انحنای قالب در شکل ۸ ترسیم گردیده است.



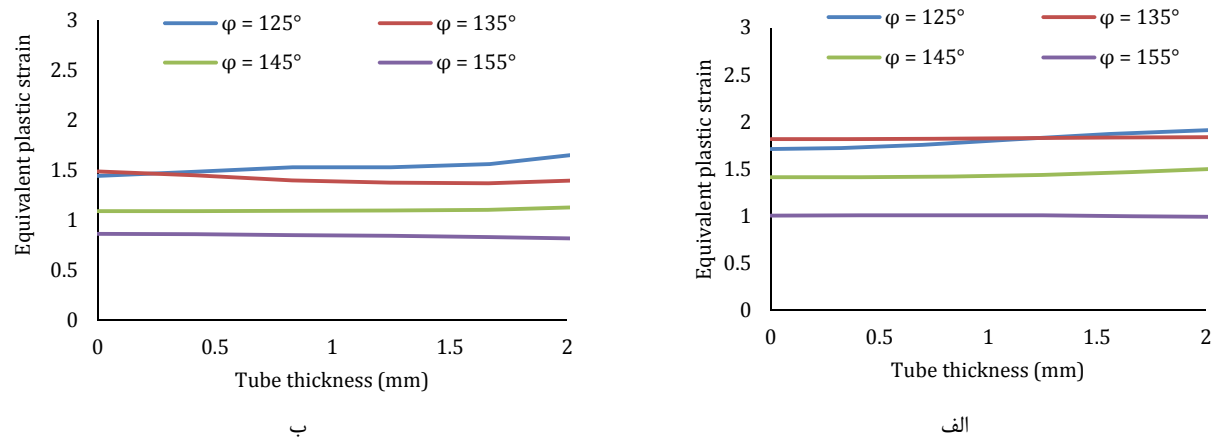
شکل ۵ نمونه‌های آلومینیومی تحت فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل و کانتورهای کرنش موثر آن‌ها در زاویه‌ی انحنای صفر درجه



شکل ۶ نمونه‌های آلومینیومی تحت فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل و کانتورهای کرنش موثر آن‌ها در زاویه‌ی انحنای پنج درجه



شکل ۷ مسیر در نظر گرفته‌شده در طول ضخامت نمونه‌ی تحت فرآیند

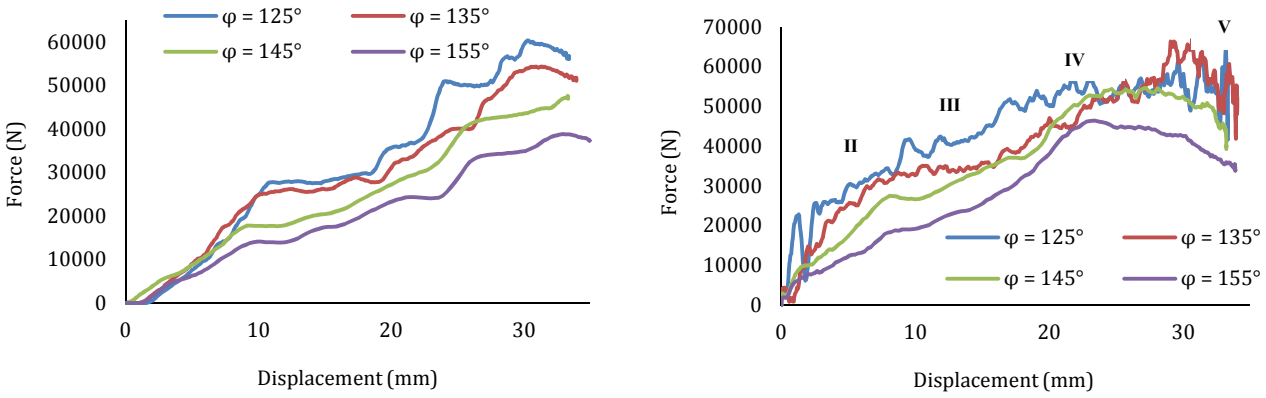


الف ب

شکل ۸ نمودار کرنش موثر نمونه تحت فرآیند قرار گرفته شده در راستای ضخامت آن به ترتیب برای زوایای انحنای الف) صفر درجه، ب) پنج درجه

از نمودارها نیز این نتیجه حاصل می‌شود که افزایش کرنش موثر در نمونه‌های آلومینیومی ناشی از کاهش زوایای کانال قالب می‌باشد. زاویه انحنای صفر درجه نسبت به 5° توانایی بیش‌تری در افزایش کرنش موثر داشته است. هم‌چنین همگنی کرنش نیز در این زاویه کم‌تر از 5° شده و در نتیجه همگنی در سختی و ریزساختار نیز کم‌تر است [۱۱، ۱۲]. با توجه به تصاویر، طول نمونه‌ی تغییر شکل داده با افزایش زوایای کانال، بیش‌تر شده و با افزایش زاویه‌ی انحنا، کم‌تر شده است. از آن‌جا که در این فرآیند تنش‌های کششی قبل از ناحیه برشی S_2 و تنش‌های فشاری پس از ناحیه S_3 به وجود می‌آیند، با افزایش زاویه‌ی کانال و کاهش زاویه‌ی انحنا، این تنش‌ها کم‌تر شده و در نتیجه نمونه بهتر می‌تواند افزایش طول بدهد.

شکل ۹ نمودار نیرو در برابر جابجایی در فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای را برای چهار زاویه‌ی کانال در دو زاویه انحنای ذکر شده برای قالب نشان می‌دهد. به طور کلی، نمودار نیرو-جابجایی، اطلاعات ارزشمندی از مواد و نحوه انجام فرآیند به ما می‌دهد [۱۳]. طبق نمودار، دریافت می‌شود که تغییر شکل در فرآیند مذکور با چنین مقطعی از کانال در پنج مرحله اتفاق می‌افتد. در مرحله اول، نمونه گوشه‌ی قالب مربوط به منطقه S_1 را پر می‌کند که نیروی مورد نیاز فرآیند در این مرحله افزایش پیدا کرده است. در مرحله دوم، مواد لوله گوشه‌ی قالب مربوط به منطقه S_2 را پر کرده و لوله از این منطقه عبور می‌کند. در مرحله سوم، نیرو یکنواخت و تقریباً ثابت بوده، در حالی که جابجایی سنبه نیز ادامه دارد. این منطقه مربوط به ناحیه بین صفحات برشی S_2 و S_3 می‌شود. در مرحله‌ی چهارم، نیرو به صورت تدریجی افزایش یافته تا به نقطه اوج و ماکزیمم خود برسد و در این مرحله انتهای لوله، آخرین صفحه برشی S_4 را پر می‌کند. بازگشت الاستیکی در این مرحله اتفاق می‌افتد، چون نیرو همزمان با پیشرفت فرآیند به صورت تدریجی کاهش پیدا می‌کند [۱۴]. کاهش نیرو در این مرحله می‌تواند مربوط به نیروهای اصطکاک و همگرا شدن نمودار نیرو-جابجایی به یک مقدار ثابت باشد. پس از عبور مواد لوله از آخرین صفحه برشی S_4، نیروی مورد نیاز فرآیند تقریباً یکنواخت و ثابت می‌شود. همگرا شدن نمودار به یک مقدار ثابت پس از جابجایی ۳۰ میلی‌متری، ویژگی بی‌نظیری است که در این نمودار مشاهده می‌شود. این مورد می‌تواند به نیروی اصطکاک که از ضرب نیروی عمودی در ضریب اصطکاک در مدل اصطکاک کولمبی به دست می‌آید، مربوط شود [۵]. در حقیقت لوله در حین فرآیند به دو قسمت قبل و بعد از آخرین ناحیه برشی تقسیم می‌شود. فشار هیدرواستاتیکی در مناطق قبل از آخرین ناحیه‌ی برشی بیش‌تر از مناطق بعد از آن است. این به معنای آن است که نیروی عمودی در مناطق قبل از آخرین ناحیه‌ی برشی بزرگ‌تر بوده، در حالی که در مناطق بعد از آخرین ناحیه‌ی برشی به صفر نزدیک می‌شود. هنگامی که فرآیند پیش می‌رود، طول لوله قبل از آخرین ناحیه برشی کاهش و بعد از آخرین ناحیه‌ی برشی افزایش می‌یابد و به همین خاطر نیروی کل در پایان فرآیند به مقداری ثابت همگرا می‌شود. با توجه به این نمودارها دریافت می‌شود که با افزایش زوایای کانال و انحنای قالب در یک زاویه کانال ثابت، نیروی فرآیند کاهش می‌یابد که نتایج حاصله تغییرات کرنش موثر در زوایای مختلف برای کانال و انحنای قالب را تایید می‌کند.



شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی در فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با مقطع کانال ذوزنقه‌ای شکل به ترتیب برای زوایای انحنای الف) صفر درجه، ب) پنج درجه

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش اجزا محدود، نتایج این روش با روش مدل تحلیلی در رابطه (۱) برای زاویه قالب ۱۴۵° و زاویه انحنای صفر درجه در جدول ۲ مقایسه گردیده است که میزان خطای حاصل ۲/۵۹ درصد می‌باشد و در نتیجه توافق خیلی خوبی میان نتایج حاصل از این دو روش وجود داشته است.

جدول ۲ کرنش پلاستیک معادل به دست آمده از مدل تحلیلی و روش اجزا محدود

پارامتر	مقدار
کرنش پلاستیک معادل (مدل تحلیلی)	۱/۶۲۵
کرنش پلاستیک معادل (روش اجزا محدود)	۱/۵۸۴
اختلاف	۲/۵۹ ٪

۴- نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی پارامترهای قالب در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، جهت تولید قطعات فوق ریزدانه و با انرژی مصرفی کم بسیار مورد مطلوب صنعت می‌باشد. یکی از روش‌های جدید جهت فوق ریزدانه کردن قطعات لوله‌ای، فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای می‌باشد. در تحقیق حاضر اثرات زوایای کانال و انحنای مختلف در این فرآیند با مقطع کانال ذوزنقه‌ای بر روی دو پارامتر مهم در فرآیندهای شکل‌دهی یعنی کرنش موثر و نیروی فرآیند، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از کانتورهای کرنش موثر و نمودارهای مربوطه نشان داد که با کاهش زوایای کانال و انحنای قالب، کرنش موثر اعمالی بر نمونه‌های تحت فرآیند قرار گرفته شده، افزایش می‌یابد. همگنی کرنش نیز با افزایش زاویه‌ی انحنا، افزایش یافته و با بزرگ شدن زاویه‌ی کانال، طول نمونه‌ها زیاد شده است. این افزایش طول در زاویه‌ی انحنای بزرگ‌تر، تغییرات کم‌تری داشته است. این پدیده به دلیل کم شدن تنش‌های وارده بر نمونه‌ی فرآیند شده با افزایش زوایای کانال و انحنا می‌باشد. از نتایج نمودارهای نیروی فرآیند دریافت شد که با افزایش زاویه کانال و زاویه انحنا، نیروی مصرفی فرآیند کاهش می‌یابد. هم‌چنین میان نتایج شبیه‌سازی به روش اجزای محدود و مدل تحلیلی ارتباط بسیار خوبی برقرار بوده است.

References

[1] Bagherpour E, Pardis N, Reihanian M, Ebrahimi R. An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology: 2019 Feb 19; 100:1647-94. doi: 10.1007/s00170-018-2652-z

[2] Honarpisheh M, Dehghani M, Haghighat E. Investigation of mechanical properties of al/cu strip produced by equal channel angular rolling. Procedia materials science: 2015 Jan 1; 11:1-5. doi: 10.1016/j.mspro.2015.11.002

[3] Nazari F, Honarpisheh M. Analytical and experimental investigation of deformation in constrained groove pressing process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science: 2019 Jun; 233: 3751-9. doi: 10.1177/0954406218809738

[4] Aghababaei A, Honarpisheh M. Experimental and numerical investigation of residual stress distribution in Al-6061 tubes under using tubular channel angular pressing process by new trapezoidal channel. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design: 2023 May; 58: 332-42. doi: 10.1177/03093247221113229

[5] Faraji G, Mashhadi MM, Kim HS. Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. Materials Letters: 2011 Oct; 65(19-20):3009-12. doi: 10.1016/j.matlet.2011.06.039

[6] Faraji G, Mashhadi MM, Kim HS. Deformation behavior in tubular channel angular pressing (TCAP) using triangular and semicircular channels. Materials transactions: 2012 Jan;53(1):8-12. doi: 10.2320/matertrans.MD201107

[7] Faraji G, Reshadi F, Baniasadia M. A new approach for achieving excellent strain homogeneity in tubular channel angular pressing (TCAP) process. Journal of Advanced Materials and Processing: 2014 Feb;2(1): 3-12. [In Persian]

[8] Aghababaei A, Honarpisheh M. Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Al-6061 Tubes Processed by Tubular Channel Angular Pressing Process Having Trapezoidal Channel Geometry. Iranian Journal of Materials Forming: 2022 Apr; 9(2): 36-45. doi: 10.22099/ijmf.2022.42890.1214

[9] Shagwira H, Obiko JO, Mwema FM. Finite element method simulation of metal flow during Tubular Channel Angular Pressing (TCAP) of aluminium 7075. Advances in Materials and Processing Technologies: 2023 May; 24:1-23. doi: 10.1080/2374068X.2023.2216403

[10] Material Property Data (MatWeb). Aluminum 6061-O [Internet]. 2023 May [cited 2023 Sep 18] Available from: https://www.matweb.com

[11] Xu C, Furukawa M, Horita Z, Langdon TG. Using ECAP to achieve grain refinement, precipitate fragmentation and high strain rate super plasticity in a spray-cast Aluminum alloy. Acta materialia: 2003 Dec;51(20):6139-49. doi: 10.1016/S1359-6454(03)00433-6

[12] Xu C, Horita Z, Langdon TG. The evolution of homogeneity in processing by high-pressure torsion. Acta materialia: 2007 Jan; 55(1):203-12. doi: 10.1016/j.actamat.2006.07.029

[13] Nagasekhar AV, Yoon SC, Tick-Hon Y, Kim HS. An experimental verification of the finite element modelling of equal channel angular pressing. Computational materials science: 2009 Aug; 46(2): 347-51. doi: 10.1016/j.commatsci.2009.03.018

[14] Bok HH, Lee MG, Kim HD, Moon MB. Thermo-mechanical finite element analysis incorporating the temperature dependent stress-strain response of low alloy steel for practical application to the hot stamped part. Metals and Materials International: 2010 Apr; 16:185-95. doi: 10.1007/s12540-010-0405-0