



توسعه یک فرایند جدید برای تغییر شکل پلاستیک شدید آلومینیوم 1050 به منظور بهبود خواص مکانیکی

بهزاد اکبرزاده¹، حمیدگر جی^{2*}، محمد بخشی جویباری³، روح الله جماعتی⁴، محمد جواد میرنیا⁵

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

4- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

5- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

* بابل، صندوق پستی 484، hamidgorji@nit.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 مهر 1398

پذیرش: 7 آذر 1398

ارائه در سایت: تیر 1399

کلیدواژگان:

تغییر شکل پلاستیک شدید

خواص مکانیکی

نرخ کرنش

استحکام تسلیم

فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید به منظور تولید قطعات حجیم با خواص مکانیکی مناسب در طی دهه‌های گذشته توسعه فراوانی یافته‌اند. در این تحقیق، فرایند اکستروژن- فشار در کانال زاویه‌ای یکسان به عنوان یک فرایند جدید تغییر شکل پلاستیک شدید ارائه شده است. در این روش، به علت وجود دو ناحیه برشی پشت سر هم، قابلیت انجام تغییر شکل پلاستیک شدیدتری نسبت به برخی از فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید مانند پرس کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان وجود دارد. تولید یک نمونه استحکام بالا AA1050 در این فرایند به صورت تجربی و شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای مؤثر بر آن معرفی شده است. نشان داده شده است که با استفاده از این فرایند جدید، امکان تولید نمونه‌های با نرخ بزرگتر و توزیع همگن‌تر کرنش نسبت به فرایند رایج پرس کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان وجود دارد. به علاوه، محدودیت طول بلند نمونه که در فرایند رایج پرس کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان به علت اصطکاک شدید با دیواره قالب وجود دارد، به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. نمونه‌های تولیدی در طی یک مرحله از این فرایند، نسبت به نمونه آنیل شده، دارای افزایش 50 درصدی استحکام تسلیم است که این نشان از کارایی بالای این فرایند دارد.

Development of a new process for the severe plastic deformation of AA 1050 to improve the mechanical properties

Behzad Akbarzadeh¹, Hamid Gorji^{1*}, Mohammad Bakhshi-Jooybari¹, Rooholla Jamaati², Mohammad Javad Mirnia¹

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Department of Material Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 484, Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 29 September 2019
Accepted 28 November 2019
Available July 2020

Keywords:

Severe Plastic Deformation
Mechanic Properties
Strain Rate
Yield Stress

Abstract

Severe plastic deformation (SPD) processes have been extensively developed over the past decades for the fabrication of bulk materials with proper mechanical properties. In this paper, the Extrusion- Equal Channel Angular Pressing (Ex-ECAP) is proposed as a new process to apply severe plastic deformation. In this technique, due to the existence of two continuous shear regions, higher severe plastic deformation is possible, compared to some of the SPD processes such as Equal Channel Angular Pressing (ECAP). The fabrication of high strength AA1050 specimens have been investigated experimentally and numerically and the corresponding effective parameters have been introduced. It is shown that with using proposed process, it is possible to fabricate samples with higher strain rates and more homogeneous strain distribution compared with conventional ECAP. In addition, the limitation of the high length of the samples that exists in the conventional ECAP because of the high friction at the die/workpiece interface, is significantly reduced. The produced samples from one pass of this process has a 50% increase in the yield strength, compared to the annealed sample. This indicates the high efficiency of the proposed process

1- مقدمه

کانال‌های یکسان¹ را پیشنهاد نمود؛ روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید² به عنوان روش آماده سازی و تولید مواد به در دهه 1980 که سگال [1] روش پرس کاری زاویه‌ای در

¹ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

² Severe Plastic Deformation (SPD)

Please cite this article using:

Behzad Akbarzadeh¹, Hamid Gorji, Mohammad Bakhshi-Jooybari, Rooholla Jamaati, Mohammad Javad Mirnia, Development of a new process for the severe plastic deformation of AA 1050 to improve the mechanical properties, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 19- 29, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نقطه تمرکز تحقیقات در حوزه علوم مواد تبدیل شد. با وجود نزدیک به سه دهه پیشرفت و توسعه، به خصوص تحقیقات وسیع در دهه اخیر، این روش‌ها در حوزه‌های تهیه مواد، شبیه سازی‌های میکرو و ماکرو، ویژگی‌های ساختاری، تحلیل بافت، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و مانند آن‌ها ورود پیدا کرده‌اند [1، 3].

شهباز و همکاران [4] فرض نمودند که فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید تک پاس با تغییر ابعاد هندسی و شکل نمونه‌ها، بهتر از فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید چند پاس با شکل ثابت نمونه‌ها است. بنابراین، آن‌ها یک فرایند اکستروژن پیچشی خاص را به عنوان روش تغییر شکل پلاستیک شدید تک پاس به نام اکستروژن گردابی¹ پیشنهاد کردند. آنان با انجام شبیه‌سازی، مشخصه‌های تغییرشکل پلاستیک شامل نیروی شکل‌دهی، مقادیر کرنش و الگوهای جریان مواد برای زوایای گوناگون پیچ را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که کارایی این روش از اکستروژن معمولی بهتر است. طالبان پور و همکاران [5] اصول فرایند اکستروژن جانبی با دو کانال یکسان² را معرفی کردند و آن را با پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان مقایسه کردند. آنان به این نتیجه رسیدند که در آن قالب جدید، نسبت به پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان، شدت کرنش ایجاد شده به مراتب بیشتر و فشار سنبه کمتر می‌باشد. در عین حال، توزیع کرنش در پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان نسبت به قالب ارائه شده از سوی آنان بهتر بوده است. ونگ و همکاران [6] فرایند جدید اکستروژن با کانال یکسان و مقطع مارپیچ بیضی را به عنوان یک فرایند جدید تغییرشکل پلاستیک شدید برای تولید نمونه مسی فوق‌ریزدانه معرفی کردند. اساس این روش بر اعمال کرنش برشی در قطعه کار بدون تغییر سطح مقطع آن می‌باشد. برای بررسی مشخصه‌های شکل‌دهی و توانایی قالب در ایجاد ساختار فوق‌ریزدانه، آنان از بررسی‌های شبیه‌سازی و تجربی استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در مقطع عرضی قطعه کار، توزیع کرنش مؤثر از سطح محیطی به سمت مرکز قطعه کاهش می‌یابد و در انتهای محور بزرگ بیضی تغییر شکل برشی شدیدتری نسبت به انتهای محور کوچک بیضی ایجاد می‌شود. به علاوه، هر چه نسبت قطر بزرگ به کوچک بیضی بیشتر باشد، کرنش غیریکنواخت‌تری ایجاد می‌گردد. همچنین با بررسی نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که سختی نمونه نسبت به حالت آنیل

شده بهبود می‌یابد و مشاهدات متالوگرافی ریز شدن دانه‌ها را نشان داده است. بابایی و مشهدی [7] فرایند اکستروژن - فشار سیکی لوله³ را به عنوان یک فرایند جدید تغییرشکل پلاستیک شدید برای تولید لوله جدار نازک مسی فوق‌ریزدانه معرفی کردند. در این فرایند، لوله بین محفظه قالب و ماندل قرار می‌گیرد و از یک منطقه گلویی کوچک عبور داده می‌شود. با بررسی نتایج شبیه‌سازی، نشان داده شد که روش ارائه شده قابلیت اعمال کرنش‌های پلاستیک شدید را دارا می‌باشد، به طوری که در مرحله چهارم فرایند، میزان کرنش پلاستیک مؤثر بر روی دیواره لوله به حدود 7/9 رسید. با بررسی نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که نمونه دارای سختی با توزیع یکنواخت مناسب بوده و سختی نمونه نسبت به حالت آنیل شده بهبود پیدا نمود و از 55 به 102 ویکرز رسید. بابایی و مشهدی [8] ضمن معرفی فرایند جدید اکستروژن - فشار سیکی لوله، به تولید لوله جدار نازک آلومینیومی فوق‌ریزدانه پرداختند. آنان با انجام آزمایش و مشاهده تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری، نشان دادند که با این فرایند اندازه دانه‌های ریز قابل دستیابی است، به طوری که اندازه دانه اولیه بعد از دو مرحله از 45 میکرومتر به 550 نانومتر رسید. با بررسی نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که نمونه دارای سختی با توزیع یکنواخت مناسب بوده و سختی نمونه نسبت به حالت آنیل شده بهبود پیدا کرده، به طوری که از 29 به 49 ویکرز رسید. با بررسی بیشتر، همچنین مشخص شد که از مرحله دوم به بعد با وجود کرنش بیشتر، میزان افزایش سختی و کوچکتر شدن دانه‌ها به دلیل بازیابی دینامیکی کمتر می‌شود. فخمی درخشان و همکاران [9] به بررسی خواص مکانیکی و میکروساختاری آلومینیوم خالص که تحت عملیات تغییرشکل پلاستیک شدید پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان پیوسته قرار گرفته بود، پرداختند. آنان با انجام آزمایش و مشاهده تصاویر نشان دادند که تعداد دانه‌های فرعی و توزیع نابجایی‌های ناهمگن افزایش یافت، درحالی که اندازه دانه به طور محسوسی تغییر نکرد. آنان بیان کردند که این فرایند در افزایش میزان استحکام بسیار مؤثر است. محققان زیادی در سال‌های اخیر، با توجه به اهمیت و نیاز صنعت به تولید مواد با استحکام و چقرمگی بالا، تمرکز زیادی بر فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید نمودند. بسیاری تکرار مراحل فرایند را برای افزایش استحکام پیشنهاد داده‌اند و تعدادی دیگر با معرفی شکل‌های هندسی گوناگون قالب، سعی در ایجاد کرنش بیشتر و افزایش استحکام ماده داشته‌اند [10-10].

³ Tube Cyclic Extrusion- Compression (TCEC)¹ Vortex Extrusion (VE)² Dual Equal Channel Lateral Extrusion (DECLLE)

تشکیل شده است که توسط دو پین، موقعیت‌دهی می‌شوند و به کمک هفت پیچ آلن، محکم بسته می‌شوند.

همان‌طور که از شکل 1 پیداست، مجموعه قالب جدید، ترکیبی از دو فرایند اکستروژن و ECAP می‌باشد. قطعه در مرحله اول، اکستروژن و بلافاصله وارد کانال زاویه‌ای یکسان می‌شود. قطعه به دست آمده، محصول پاس اول است. برای انجام پاس بعدی، لازم است تا نمونه به قطر ورودی قالب EX-ECAP، یعنی 30 میلیمتر، رسانده شود. از این‌رو، از یک قالب آهنگری به عنوان قالب کمکی استفاده شد که شماتیک آن در شکل 2 آمده است.

جدول 1 مشخصات هندسی قالب جدید ارائه شده و قالب آهنگری را نشان می‌دهد. قالبی که با نسبت 30 به 10 در جدول آمده، صرفاً برای تحلیل شبیه‌سازی و به منظور تعمیم نتایج بوده است. برای انجام آزمایش‌های تجربی هر دو قالب، از یک سنبه به طول 80 و قطر 29/9 میلیمتر استفاده شد. جنس قالب‌ها و سنبه از فولاد گرم کار 1/2344 انتخاب شد و تحت عملیات حرارتی و سخت‌کاری قرار گرفت تا سختی آن به حدود 50HRC برسد.

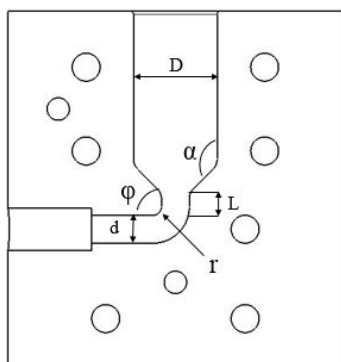


Fig. 1 Schematic of the die EX-ECAP

شکل 1 شماتیک قالب اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان

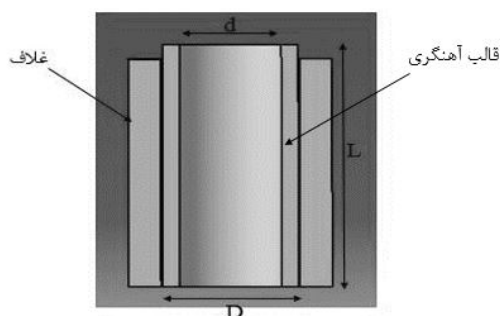


Fig. 2 A half of forging die-set

شکل 2 یک نیمه مجموعه قالب آهنگری

13]. مسئله مهم در این فرایندها آن است که با اعمال حداقل نیرو و تکرار مراحل و با صرف کمترین هزینه و وقت، به حداکثر کرنش و توزیع مناسب آن و افزایش استحکام و خواص مکانیکی دست یافت.

فرایند اکستروژن، توانایی محدودی برای تولید مواد با استحکام بالا دارد. در این فرایند، از آنجا که سطح مقطع نمونه پس از انجام فرایند کاهش می‌یابد، نمی‌تواند در پاس‌های متعدد انجام شود، مگر آن‌که با یک فرایند دیگر، به قطر اولیه برسد. در بیشتر پژوهش‌های انجام شده در فرایند پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان، نمونه‌ها دارای نسبت طول به قطر کم‌اند. این امر یک محدودیت بزرگ برای استفاده از این روش برای نمونه‌های با طول بلند محسوب می‌شود. دلیل این محدودیت آن است که با توجه به تماس سطح خارجی نمونه با قالب، نیروی اصطکاک زیاد است. در پژوهش رجب‌لو [14] در انجام فرایند پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان، نسبت طول به قطر حداکثر 8/5 گزارش شده است که افزایش این نسبت موجب توقف فرایند می‌گردد.

با توجه به اهمیت تولید نمونه‌های با طول زیاد، در این مقاله تولید آلومینیوم خالص با استحکام بالا با توسعه فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان¹ به عنوان یک فرایند جدید مورد مطالعه قرار گرفت. با این فرایند، ضمن کم کردن محدودیت ذکر شده‌ی دو روش اکستروژن و پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال یکسان، قابلیت انجام تغییر شکل پلاستیک شدید به علت وجود دو ناحیه برشی پشت سر هم با نرخ کرنش‌های بیشتر و توزیع کرنش همگن‌تر و در تعداد مرحله کمتر امکان پذیر شده است.

در این مقاله، ابتدا شبیه‌سازی اولیه به منظور امکان سنجی انجام آن و نیز شناسایی محدوده نیروی مورد نیاز انجام گردید. سپس قالب مورد نظر طراحی و ساخته شد و آزمایش‌های تجربی به عمل آمد. پس از تحلیل نتایج، به منظور تعمیم نتایج، یک مجموعه قالب دیگر با ابعاد متفاوت نیز مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و نتایج مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفتند.

2- مراحل آزمایشگاهی

شماتیک فرایند جدید اکستروژن-فشار در کانال زاویه‌ای یکسان، در شکل 1 نشان داده شده است که در آن، D قطر میله اولیه، α زاویه ناحیه اکستروژن، ϕ زاویه ناحیه خم، d قطر میله خروجی، r شعاع گوشه و L طول کانال است. مجموعه قالب، از دو نیمه

¹ Extrusion- Equal Channel Angular Pressing (EX-ECAP)

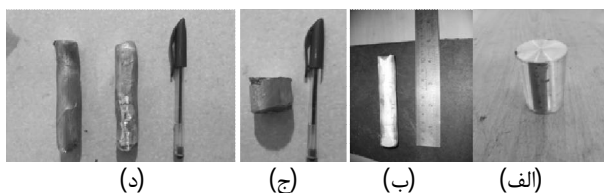


Fig. 4 a) Initial sample AL with length 50 mm b) sample after one pass c) Sample first pass after forging d) Sample after two pass

شکل 4 (الف) نمونه اولیه آلومینیومی به طول 50 میلی‌متر، (ب) نمونه پس از پاس اول، (ج) نمونه پاس اول پس از آهنگری، (د) نمونه پس از پاس دوم

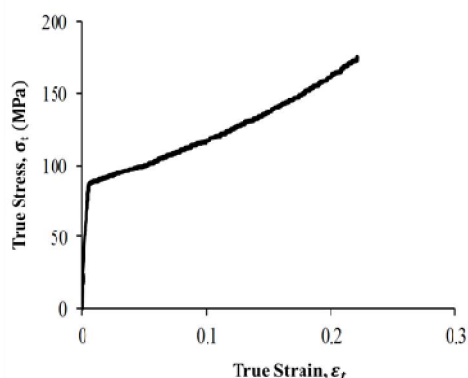


Fig. 5 True stress-strain curve of the material

شکل 5 نمودار تنش - کرنش حقیقی ماده آزمایش

3- مراحل شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی، از نرم‌افزار اجزای محدود دیفرم² نسخه 11 استفاده شده است. خواص مواد به‌دست آمده از آزمایش فشار به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار معرفی شد. مدل مجموعه قالب شامل 3 جزء است. میله از نوع تغییرشکل پذیر و قالب و سنبه، صلب فرض شده‌اند. قالب در تمام جهات مقید شده و پیشروی به سنبه اعمال شد. اصطکاک بین میله با قالب و سنبه در نظر گرفته شد. رفتار تغییرشکل پلاستیک مواد به صورت $\sigma = K\epsilon^n$ در نظر گرفته شد که در آن K ضریب استحکام و n نمادی کرنش سختی ماده بوده و به ترتیب برابر 274 مگاپاسکال و 0/35 به‌دست آمد. تعداد المان میله به کمک همگرا کردن المان‌ها برابر 32000 و به‌صورت 4 وجهی در نظر گرفته شد. شکل 6 نمونه‌ای از مدل شامل میله المان‌بندی شده را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر بالای کرنش‌ها و تغییرشکل‌های زیاد در حین شبیه‌سازی فرایند، برای تسهیل همگرایی از روش المان‌بندی مجدد اتوماتیک استفاده گردید.

برای یافتن ضریب اصطکاک مناسب برای شبیه‌سازی، خروجی منحنی نیرو-جابجایی تجربی در مرحله اول با خروجی مدل شبیه‌سازی³ در چند ضریب اصطکاک با هم مقایسه شده

جدول 1 مشخصات قالب‌های اکستروژن-فشار در کانال زاویه‌ای یکسان و آهنگری

Table 1 Characteristics of EX-ECAP and Forging dies

مشخصه	L (mm)	α (deg)	ψ (deg)	ϕ (deg)	D (mm)	D (mm)
قالب 30 به 20	3	60	90	90	30	20
قالب 30 به 10	3	60	90	90	30	10
قالب آهنگری	100	---	---	---	50	30

شکل 3 تصویر مجموعه قالب جدید و قالب آهنگری ساخته شده به همراه غلاف دور آن را نشان می‌دهد. در انجام آزمایش، از روغن هیدرولیک 10 برای روان‌کاری سطوح قالب‌ها استفاده شد. در انجام آزمایش‌ها از پنج نمونه آلومینیوم 1050 به قطر 30 و طول 50 میلی‌متر استفاده شده است. شکل 4 ماده اولیه آلومینیوم، نمونه پس از پاس اول، نمونه اول پس از آهنگری و نمونه پس از پاس دوم را نشان می‌دهد. نمونه‌ها آنیل شده‌اند، به‌گونه‌ای که در دمای 345 درجه سانتی‌گراد به مدت 45 دقیقه در کوره قرار گرفته و سپس در هوا سرد شدند.

برای انجام آزمایش از دستگاه آزمایش اونیورسال دی‌ام‌جی¹ با ظرفیت 600 کیلو نیوتن استفاده شده است. این دستگاه قابلیت نمایش و ثبت منحنی نیرو-جابجایی را داراست. سرعت کوبه دستگاه تا 200 میلی‌متر بر دقیقه قابل تنظیم است که در این مقاله سرعت 5 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری سختی، از آزمایش ویکرز و با استاندارد ASTM E384-99 استفاده شده است. در این روش، فرورونده یک هرم مربع القاعده الماسی است. زاویه سطوح جانبی این هرم 136 درجه است که نیروی عمودی 100 گرم و زمان فروروندگی 10 ثانیه می‌باشد.

برای تعیین خواص مواد از آزمون فشار مطابق استاندارد ASTM E9 استفاده شده است. شکل 5 نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش فشار را نشان می‌دهد.

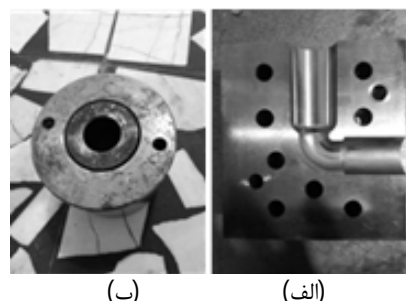


Fig. 3 a) A half set of EX-ECAP die with ratio 30 to 20 b) Forging die with cover

شکل 3 (الف) تصویر یک نیمه قالب اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان با نسبت قطر 30 به 20 (ب) قالب آهنگری به‌همراه غلاف

² Deform-2D/3D Ver. 11.0

³ Finite Element Method (FEM)

¹ Denison Mayes Group (DMG)

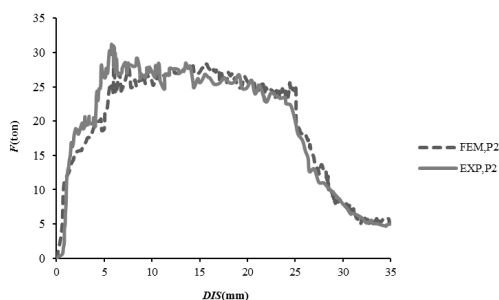


Fig. 8 Force-displacement diagram of the second pass

شکل 8 نمودار نیرو - جابجایی نمونه در پاس دوم

4- نتایج و بحث

4-1- بررسی خواص مکانیکی

4-1-1- سختی سنجی

میزان سختی مقطع نمونه در نقاط مختلف با توجه به توزیع کرنش متغیر، متفاوت خواهد بود. برای انجام آزمایش سختی، نمونه‌ها همانند شکل‌های 9 و 10 در دو مقطع طولی و عرضی برش زده شد و در نقاط مشخص شده آزمایش سختی گردید که نتایج در جدول‌های 2 و 3 آورده شده است. سختی نمونه آنیل شده 35 ویکرز می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که سراسر نمونه دارای سختی تقریباً یکسان است که این نشان از توزیع کرنش تقریباً یکسان در سراسر نمونه دارد. همچنین مطابق جدول 3، میزان انحراف استاندارد سختی مقطع عرضی در پاس اول برابر 1/2 محاسبه شده است که نشان از توزیع خوب سختی در نمونه دارد.

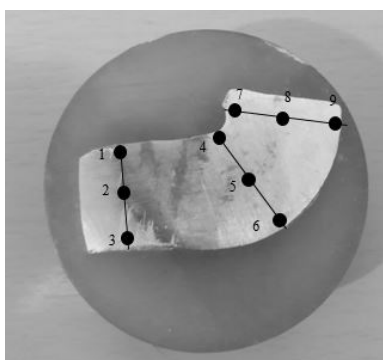


Fig. 9 Longitudinal cross-section sample with specified points for hardness measurement

شکل 9 نمونه مقطع طولی با نقاط مشخص برای اندازه‌گیری سختی

جدول 2 سختی ویکرز نقاط مختلف مقطع طولی نمونه یک پاس

Table 2 The hardness of the different longitudinal points of the one pass sample

نقطه	سختی	نقطه	سختی	نقطه	سختی
1	48	4	49	7	49/6
2	45/5	5	46/5	8	46
3	46/9	6	48/5	9	48/4

است. مطابق شکل 7، ضریب اصطکاک 0/12 با حالت تجربی¹ مطابقت خوبی دارد و حداکثر 7 درصد اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی مشاهده می‌شود. با توجه به تطابق مناسب، در ادامه مدل تنش برشی اصطکاکی با ضریب اصطکاک یکنواخت برای همه سطوح و برابر 0/12 در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که در مرجع [13] هم به آن استناد شد. برای مقایسه نیروی شکل‌دهی در حالت شبیه‌سازی و تجربی در پاس دوم، خروجی نیرو-جابجایی تجربی و شبیه‌سازی مطابق شکل 8 با هم مقایسه شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج دارای تطابق خوبی می‌باشند و اختلاف اندکی به میزان حداکثر 5 درصد مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که نمونه خروجی فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان که شامل هندسه و خواص ماده است، جهت انجام عملیات آهنگری وارد قالب آهنگری شد تا برای انجام پاس بعدی به قطر اولیه برسد. در واقع اثرات کارسختی حاصل از پاس اول و فرایند آهنگری در پاس دوم در حالت شبیه‌سازی همانند حالت تجربی دیده شده است.

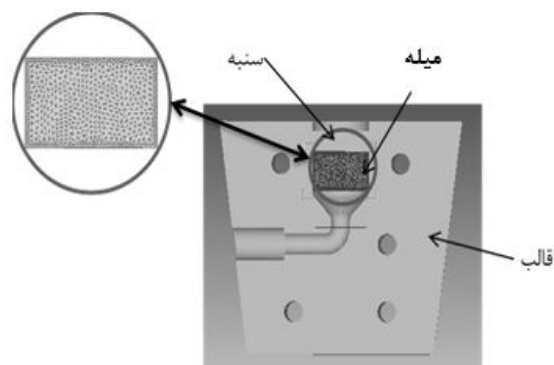


Fig. 6 Finite element model and rod meshed in the new process

شکل 6 مدل المان محدود و میله المان‌بندی شده در فرایند جدید ارائه شده

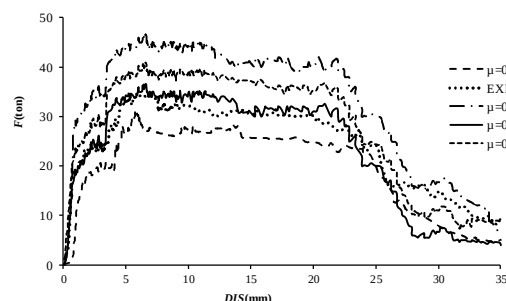


Fig. 7 Force - displacement diagram of the first pass sample in experimental and simulation at different friction coefficients

شکل 7 نمودار نیرو - جابجایی نمونه به دست آمده از پاس اول در حالت تجربی و شبیه‌سازی در ضرایب اصطکاک مختلف

¹ Experimental (EXP)

تحت فرایند جدید قرار گرفته است، به ترتیب دارای استحکام تسلیم و تنش نهایی 134 و 197 مگاپاسکال و ازدیاد طول 18 درصد می‌باشد که به ترتیب نشان از افزایش 50 و 42 درصدی استحکام تسلیم و تنش نهایی و کاهش 40 درصدی ازدیاد طول نسبت به نمونه آنیل شده می‌باشد.

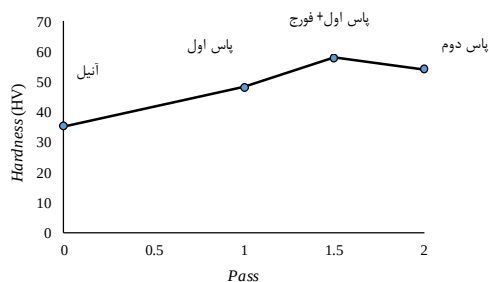


Fig. 11 Hardness of the specimen at different passes

شکل 11 سختی نمونه در پاس‌های مختلف

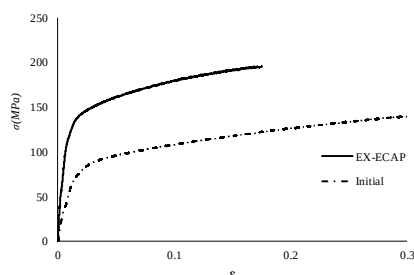


Fig. 12 True Stress-strain curves of the annealed and one pass samples

شکل 12 نمودار تنش - کرنش حقیقی نمونه آنیل شده و نمونه یک پاس

جدول 4 نتایج آزمایش کشش نمونه یک پاس و آنیل شده

Table 4 Tensile test results of the annealed and one pass samples

نمونه	قطر (mm)	مساحت (mm ²)	استحکام تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ازدیاد طول %	سختی (ویکرز)
آنیل	9/04	64/18	89	139	30	35
یک پاس	8/97	63/19	134	197	18	49/6

برای بررسی دقیق‌تر نمونه‌ها در پاس‌های مختلف، آزمایش فشار بر روی نمونه‌های پاس اول (P1)، نمونه پاس از دو پاس (P2) و نمونه پاس اول پس از آهنگری (P1+forging) شده و همچنین نمونه آنیل شده انجام گرفته و نتایج مطابق شکل 13 ارائه شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، با انجام فرایند جدید استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه کاهش استحکام نمونه پاس از دو پاس نسبت به نمونه پاس اول پس از آهنگری است که نشان می‌دهد در نمونه بازیابی دینامیکی رخ داده است و با نتایج سختی و خروجی نیرو-جابجایی مطابق شکل 14 مطابقت خوبی دارد.



Fig. 10 Cross-sectional sample with specified points for hardness measurement a) sample after pass two b) first pass sample after forging c) sample after pass one

شکل 10 نمونه مقطع عرضی برش زده شده به همراه نقاط مشخص جهت سختی سنجی (الف) نمونه پس از پاس دوم، (ب) نمونه پاس اول پس از آهنگری، (ج) نمونه پاس اول

جدول 3 سختی نقاط مختلف در مقطع عرضی نمونه‌ها

Table 3 Hardness of different points on the cross-sections of specimens

نقاط	1	2	3	4	5	میانگین
نمونه پاس اول	47	46	48	49	49	47/9
نمونه پاس اول پس از آهنگری	57	56	58/9	59	--	58
نمونه پاس از پاس دوم	53/3	52	53/3	55/8	53	54

سختی نمونه‌ها در پاس‌های مختلف در شکل 11 نشان داده شده است. مطابق شکل، متوسط سختی نمونه یک پاس حدود 48، نمونه پاس اول پس از آهنگری حدود 58 و نمونه پاس از دو پاس تقریباً برابر 54 ویکرز می‌باشد. نکته قابل توجه کاهش سختی در نمونه پاس از پاس دوم می‌باشد [15، 16] که بیانگر اعمال کرنش حداکثری به نمونه توسط این فرایند جدید در پاس‌های کمتر بوده و در واقع نمونه به حد اشباع سختی خود رسیده است. همچنین، برای این جنس از نمونه میزان افزایش سختی به دلیل بازیابی دینامیکی کمتر می‌شود و در نمونه کار گرم رخ می‌دهد و سختی نمونه افزایش نمی‌یابد. به عبارت دیگر، بازیابی دینامیکی مانع از ریز شدن دانه‌ها با نرخ ثابت می‌شود و نابجایی‌ها را از بین می‌برد. در ادامه فرایند و با افزایش تعداد پاس‌ها، کرنش اضافی نرخ بازیابی دینامیکی را افزایش می‌دهد که موجب کاهش نرخ ریز شدن دانه‌ها در کرنش‌های بزرگ‌تر می‌شود [8].

4-1-2- آزمون کشش و فشار

برای بررسی خواص مکانیکی، آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8 (M9) بر روی نمونه یک پاس با نسبت قطر 30 به 20 و نسبت اکستروژن 2/25 و نمونه آنیل شده انجام گرفت. نتایج در شکل 12 و جدول 4 نشان داده شده است. نمونه‌ای که

هم‌اندازه بودن طول نمونه خروجی - از نمونه‌هایی با طول کمتر در مقایسه با قالب پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان می‌توان بهره برد. با کاهش طول نمونه سطح تماس نمونه با دیواره قالب کاهش می‌یابد و این کاهش سطح تماس موجب کاهش نیروی اصطکاک می‌شود.

همان‌طور که مشاهده شد، فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید جدید، محدودیت طول بلند نمونه را که در فرایند پرس کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان به‌علت افزایش نیروی اصطکاک به دلیل افزایش طول بلند نمونه که مانع از انجام فرایند می‌شد، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و منجر به ریزش اندازه دانه نمونه‌های بلندتر و قابلیت تغییر شکل پلاستیک شدید به علت وجود دو ناحیه برشی پشت سر هم می‌شود. در این روش به‌علت اینکه ابتدا نمونه تحت اکستروژن قرار می‌گیرد، در واقع نسبت به فرایند پرس کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان راجع با توجه به نسبت اکستروژن دارای سطح تماس کمتر با قالب و سطح مقطع بیشتر درگیر با سنبه می‌باشد. سطح تماس کمتر با قالب موجب کم شدن اصطکاک و سطح تماس بیشتر نمونه با سنبه امکان توزیع بهتر کرنش و تنش را در محل تماس سنبه با نمونه فراهم می‌کند و از شکست نمونه جلوگیری می‌کند. با در نظر گرفتن حجم ثابت، در یک طول ثابت نمونه اولیه با تغییر نسبت اکستروژن، طول بلندتری از نمونه‌هایی که تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته‌اند، به دست می‌آید.

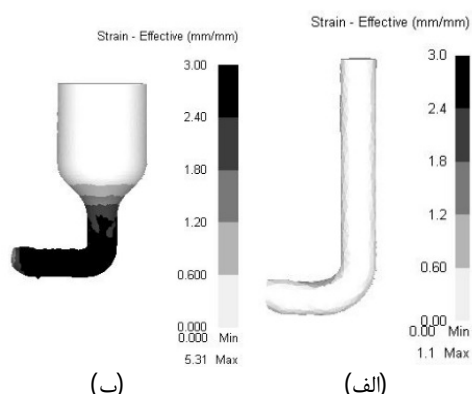


Fig. 15 Effective strain distribution: a) Equal channel angular pressing b) Extrusion-Equal channel angular pressing

شکل 15 توزیع کرنش مؤثر: (الف) فرایند پرس کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان (ب) فرایند اکستروژن - فشار در کانال‌های یکسان

4-3- مقایسه فرایند جدید اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان با فرایند جداگانه اکستروژن و پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان

برای بررسی تفاوت بین فرایند جدید ارائه شده و فرایند جداگانه

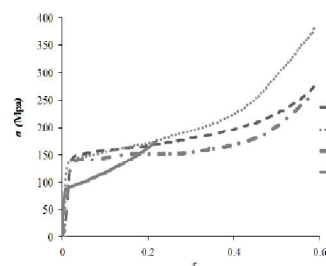


Fig. 13 True Stress-strain curve of the specimens

شکل 13 نمودار تنش - کرنش حقیقی حاصل از آزمایش فشار

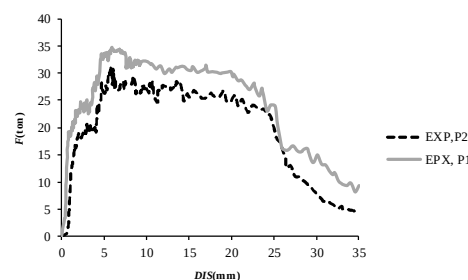


Fig. 14 Experimental force - displacement curve of the one and two pass sample

شکل 14 نمودار تجربی نیرو - جابجایی در نمونه یک پاس و نمونه پس از دو پاس

4-2- مقایسه فرایند پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان با فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان

برای مقایسه و نشان دادن کارایی قالب جدید ارائه شده نسبت به قالب پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان راجع در یک پاس، یک نمونه با نسبت قطر 30 به 10 (نسبت اکستروژن 9 به کمک نرم افزار شبیه‌سازی گردید، با توجه به ثابت بودن حجم، طول نمونه اولیه برای قالب جدید ارائه شده، تقریباً 7/5 میلی‌متر در نظر گرفته شد که پس از انجام فرایند به طول 67 میلی‌متر می‌رسد.

شکل 15- الف نمونه حاصل از فرایند پرس کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان با کرنش مؤثر ایجاد شده در یک مرحله را نشان می‌دهد. در این فرایند یک نمونه میله از یک مجرای زاویه‌ای که سبب ایجاد برش در منطقه تغییر مسیر می‌شود، عبور می‌کند. زمانی که نمونه به ناحیه خم وارد می‌شود، به‌علت سطح تماس زیاد نمونه با قالب، نیروی اصطکاک شدیداً افزایش می‌یابد و ناگهان تنش در محل تماس نمونه با سنبه زیاد شده و عملاً نمونه در قالب جریان پیدا نمی‌کند. شکل 15- ب نمونه حاصل از فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان را نشان می‌دهد. مطابق شکل به‌علت سطح تماس کم نمونه با قالب، نیروی اصطکاک کاهش می‌یابد و امکان انجام فرایند با این قالب جدید ارائه شده با حداکثر کرنش در حدود 3، امکان پذیر می‌شود. بنابراین از مزیت این قالب ارائه شده این است که با توجه به وجود فرایند اکستروژن در ورودی قالب - در شرایط

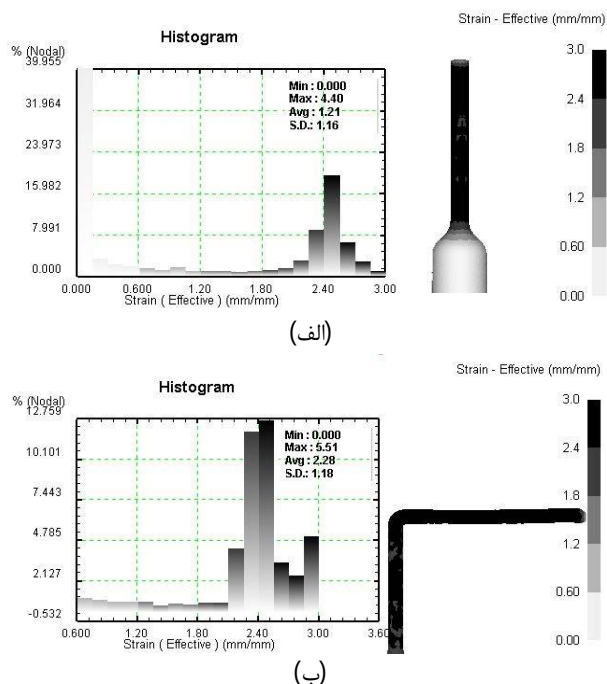


Fig. 16 Effective strain distribution: a) extrusion process b) Equal channel angular pressing after extrusion

شکل 16 توزیع کرنش مؤثر: (الف) فرایند اکستروژن (ب) فرایندهای جداگانه اکستروژن و پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان

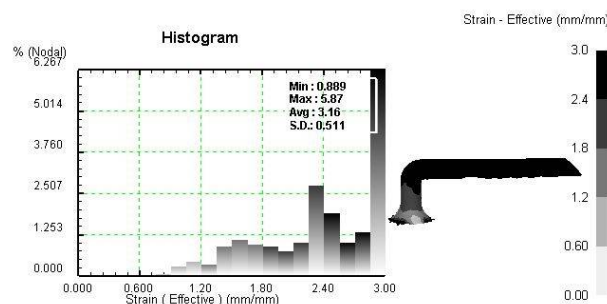


Fig. 17 Effective strain in Extrusion-Equal channel angular pressing
شکل 17 کرنش مؤثر در فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان

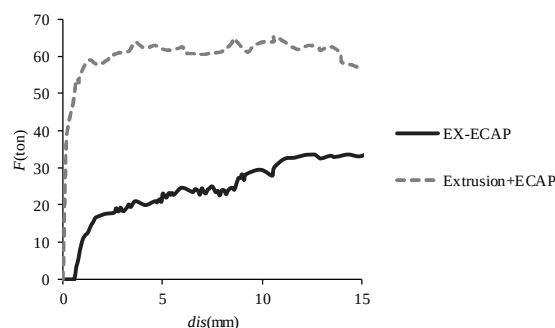


Fig. 18 Force – displacement diagram of the Extrusion-Equal channel angular pressing process and Equal channel angular pressing process after extrusion

شکل 18 نمودار نیرو- جابجایی فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان و فرایند پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان بعد از اکستروژن

اکستروژن و پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان در یک پاس، ابتدا یک نمونه با قطر 30 میلی‌متر از قالب اکستروژن عبور داده و سپس نمونه اکستروژن شده با فشار از درون یک کانال زاویه‌ای یکسان عبور داده می‌شود. همچنین یک نمونه جدید با قطر 30 میلی‌متر از قالب جدید گذرانده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی مطابق شکل‌های 16 و 17 نشان می‌دهد که مقدار و یکنواختی کرنش مؤثر در فرایند جدید ارائه شده نسبت به روش معمول فرایند جداگانه اکستروژن به همراه پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان به دلیل نحوه جریان مواد در قالب بیشتر می‌باشد. مطابق شکل‌های 16 و 17، شدت و یکنواختی کرنش در شبیه‌سازی به ترتیب با پارامترهای کرنش مؤثر¹ و انحراف از استاندارد² معرفی و مقایسه شده است. بدین ترتیب که هرچه مقدار کرنش مؤثر بیشتر باشد، نمونه ریز دانه‌تر و هر چه میزان انحراف از استاندارد در نمودار خروجی کمتر باشد و پراکندگی از کرنش مؤثر کمتر باشد، نشان از یکنواختی بیشتر کرنش مؤثر در سرتاسر نمونه می‌باشد. همان‌طور که در شکل 16 (ب) مشاهده می‌شود، نمونه‌ای که بعد از فرایند اکستروژن تحت فرایند پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان قرار می‌گیرد به ترتیب دارای کرنش مؤثر و انحراف از استاندارد 2/08 و 1/26 می‌باشد این در حالی است که نمونه حاصل از فرایند جدید به ترتیب دارای کرنش مؤثر و انحراف از استاندارد 3/14 و 0/522 می‌باشد که نشان از افزایش 51 درصدی کرنش متوسط و افزایش 58 درصدی یکنواختی کرنش مؤثر در نمونه حاصل از فرایند جدید نسبت به نمونه اکستروژن و پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان جداگانه بوده است. شکل 18، بیشینه نیروی شکل‌دهی در فرایند جدید را نسبت به فرایند جداگانه اکستروژن به همراه پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت کم بودن سطح تماس نمونه با دیواره قالب جدید در مقایسه با قالب پرس کاری زاویه‌ای در کانال یکسان رایج به نیرویی در حدود 50 درصد کمتر نیاز می‌باشد.

4-4- مقایسه بین فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان با فرایند اکستروژن جانبی

جهت مقایسه بین قالب جدید ارائه شده با نسبت قطر 30 به 20 (نسبت اکستروژن 2/25) با قالب اکستروژن جانبی³ یک ماده در شرایط یکسان و یک پاس مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

¹ Effective Strain (ϵ_{effect})

² Standard Deviation (SD)

³ Lateral Extrusion

بررسی قرار گرفت.

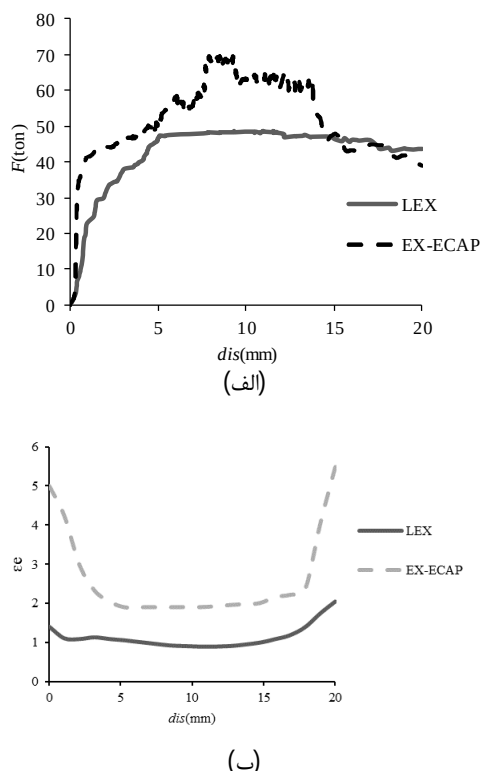


Fig. 21 Comparison of the Extrusion-Equal channel angular pressing process to lateral extrusion process (a) Force (b) Effective strain cross-section

شکل 21 مقایسه فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان با فرایند اکستروژن جانبی (الف) نیرو (ب) کرنش مؤثر مقطع عرضی

شعاع گوشه و نقاط مشخص شده بر روی قطعه جهت اندازه گیری کرنش مؤثر در مقطع عرضی در شکل 22 نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر شعاع گوشه، چهار شعاع گوشه صفر، پنج، ده و پانزده انتخاب شده که نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های 23 و 24 نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع گوشه به علت جریان راحت‌تر مواد در قالب، نیرو و کرنش مؤثر کاهش می‌یابند، به طوری که مطابق شکل 23 با افزایش شعاع گوشه از صفر به 15 کرنش مؤثر متوسط از 3/43 به 2/68 کاهش می‌یابد که بیانگر کاهش 22 درصدی کرنش مؤثر می‌باشد. همچنین مطابق شکل 24، در شعاع گوشه صفر بیشینه نیروی شکل‌دهی به 70 تن رسیده است این در حالی است که در شعاع بزرگ‌تر یعنی پانزده بیشینه نیروی شکل‌دهی 30 تن می‌باشد که نشان از کاهش 57 درصدی نیروی شکل‌دهی دارد. مطابق شکل‌های 23 و 24، شعاع گوشه بین بازه 5 تا 10 مناسب‌ترین شعاع گوشه از نظر تعادل بین نیروی لازم شکل‌دهی کم و کرنش مؤثر زیاد می‌باشد. شکل 25 تأثیر نسبت

همانطور که در شکل‌های 19 و 20 مشهود است و با توجه به نمودار 21- ب، میزان کرنش مؤثر در این قالب جدید نسبت به قالب اکستروژن جانبی 100 درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین میزان انحراف استاندارد کرنش مؤثر خروجی مطابق نمودار 21- ب برای اکستروژن جانبی و فرایند جدید معرفی شده به ترتیب برابر 0/29 و 1/1 محاسبه شده است، که میزان انحراف استاندارد کرنش مؤثر در یک پاس در این فرایند جدید مطابقت خوبی با انحراف استاندارد سختی مقطع عرضی محاسبه شده در بخش 1-1-4 دارد که نشان از صحت شبیه‌سازی دارد. البته نکته مهم این است که در فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید میزان کرنش حاصله از اهمیت بالایی برخوردار است که در فرایند جدید به طور چشم‌گیری افزایش پیدا کرده است.

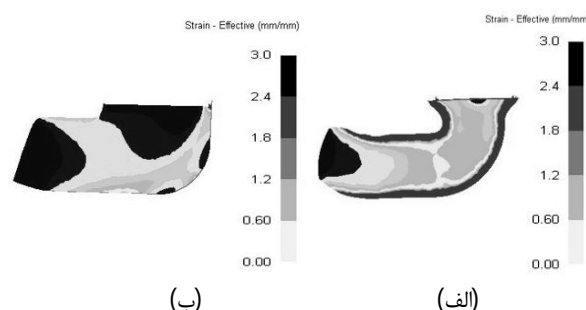


Fig. 19 Effective strain and strain distribution of the longitudinal section (a) the Extrusion-Equal channel angular pressing process (b) lateral extrusion

شکل 19 میزان کرنش و توزیع کرنش مؤثر مقطع طولی (الف) فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان (ب) اکستروژن جانبی

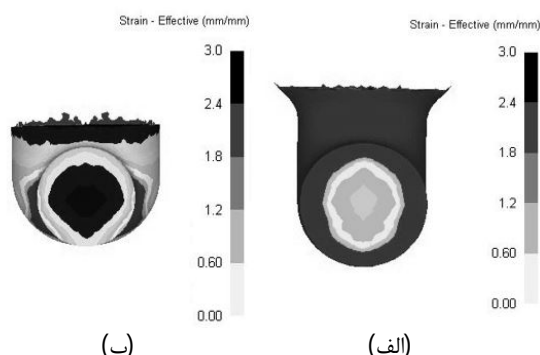


Fig. 20 Effective strain and strain distribution of the cross section (a) the Extrusion-Equal channel angular pressing process (b) lateral extrusion

شکل 20 میزان و توزیع کرنش مؤثر مقطع عرضی (الف) فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان (ب) اکستروژن جانبی

4-5- بررسی تأثیر شعاع گوشه قالب و نسبت اکستروژن

برای بررسی تأثیر شعاع گوشه قالب بر نیرو و کرنش مؤثر، قالب اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان با نسبت قطر 30 به 10 و نسبت اکستروژن 9 در یک پاس در حالت شبیه‌سازی مورد

اکستروژن بر نیروی شکل‌دهی را نشان می‌دهد.

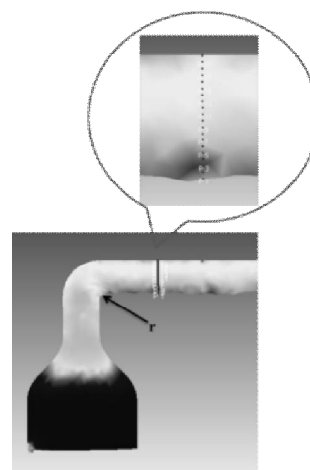


Fig. 22 The Die fillet radius parameter

شکل 22 پارامتر شعاع گوشه قالب

5- نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله، توسعه فرایند جدید اکستروژن-فشار در کانال زاویه‌ای یکسان می‌باشد که با اعمال کرنش‌های بالاتر و با توزیع بهتر موجب یکنواختی خواص مواد در قسمت‌های مختلف نمونه شده است. جهت بررسی دقیق‌تر، این فرایند با فرایندهای پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان و اکستروژن جانبی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این مقاله در زیر آورده شده است:

- امکان تولید نمونه‌های با نرخ کرنش بزرگتر و توزیع همگن‌تر در فرایند ارائه شده نسبت به فرایند رایج پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان و اکستروژن جانبی بوده و با استفاده از این فرایند محدودیت طول بلند نمونه در فرایند رایج پرس‌کاری زاویه‌ای در کانال‌های یکسان به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

- امکان ایجاد کرنش شدیدتر به همراه توزیع بهتر این فرایند جدید نسبت به فرایند اکستروژن جانبی به علت نحوه جریان مواد فراهم شده است.

- با افزایش شعاع گوشه جریان مواد در قالب راحت‌تر می‌باشد که منجر به کاهش کرنش در نمونه می‌شود.

- با انجام یک پاس از این فرایند، سختی و استحکام ماده افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج، سختی نمونه در گوشه‌ها به علت برخورد با دیواره قالب و افزایش اصطکاک افزایش بیشتری می‌یابد.

- نمونه‌ای که تحت فرایند جدید ارائه شده قرار گرفته است دارای افزایش 50 درصدی استحکام تسلیم نسبت به نمونه آنیل شده می‌باشد که این نشان از افزایش استحکام نمونه کار شده و

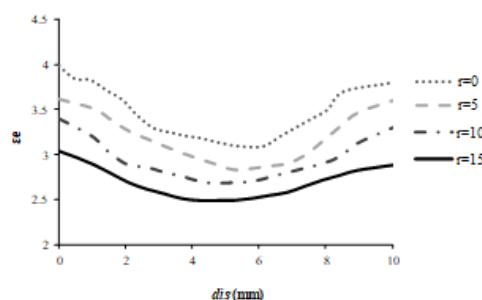


Fig. 23 Effect of die fillet radius on the amount and distribution of effective strain

شکل 23 اثر شعاع گوشه قالب بر روی مقدار و توزیع کرنش مؤثر

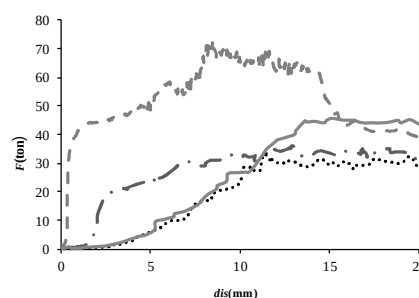


Fig. 24 Effect of die fillet radius on the forming force

شکل 24 اثر شعاع گوشه قالب بر روی نیروی شکل‌دهی

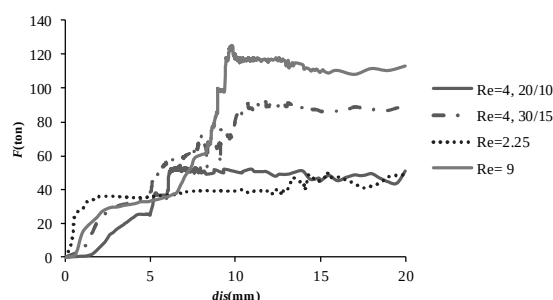


Fig. 25 Effect of Extrusion Ratio on Forming Force

شکل 25 اثر نسبت اکستروژن بر روی نیروی شکل‌دهی

deformation method for fabricating ultrafine grained pure copper, *Materials & Design*, 43, pp. 492-498, 2013.

- [7] Babaei, A. and M. Mashhadi, Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion-compression (TCEC) as a severe plastic deformation technique, *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(6), pp. 623-630, 2014.
- [8] Babaei, A. and M. Mashhadi, characterization of ultrafine-grained aluminum tubes processed by Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC), *Materials Characterization*, 2014.
- [9] J.Fakhimi Derakhshan, M.H.Parsa and H.R. Jafarian, Microstructure and mechanical properties variations of pure aluminum subjected to one pass of ECAP-Conform process, *Materials Science and Engineering: A*, 2019.(Authors Accepted Manuscript)
- [10] Djavanroodi, F. and M. Ebrahimi, Effect of die parameters and material properties in ECAP with parallel channels, *Materials Science and Engineering: A*, 527(29-30), pp. 7593-7599, 2010.
- [11] Ivanisenko, Y., Kulagin, R., Fedorov, V., Mazilkin, A., Scherer, T., Baretzky, B., Hahn, H., High pressure torsion extrusion as a new severe plastic deformation process, *Materials Science and Engineering: A*, 664, pp. 247-256, 2016.
- [12] Ebrahimi, M. and F. Djavanroodi, Experimental and numerical analyses of pure copper during ECAP process as a novel severe plastic deformation method, *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(1), pp. 68-74, 2014.
- [13] Mohamed Ibrahim Abd EL AAL, 3D FEM simulation and experimental validation of plastic deformation of pure aluminum deformed by ECAP and combination of ECAP and direct extrusion, *Journal of Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 27, pp.1338-1352, 2017.
- [14] The presentation of hydrostatic severe plastic deformation process ECAP for the production of ultra fine graind metals, A. Rajablo, M.S Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, 2014. (in Persian فارسی)
- [15] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing, *Acta materialia*, 45(11) 4733-4741, 1997.
- [16] M. Saravanan, R. Pillai, B. Pai, M. Brahmakumar, K. Ravi, Equal channel angular pressing of pure aluminium-an analysis, *Bulletin of Materials Science*, 29(7) , 2006.

کارایی بالای این فرایند دارد.

- کاهش استحکام نمونه دو پاس نسبت به نمونه پاس اول
پس از آهنگری نشان می‌دهد در نمونه بازیابی دینامیکی رخ داده است که این خود مطابقت خوبی با نتایج سختی سنجی دارد.

- با بررسی نیروی خروجی از دستگاه آزمایش اونیورسال، مشاهده شده است که تطابق خوبی بین نیروی لازم برای شکل‌دهی نمونه در حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین نیروی شکل‌دهی نمونه دو پاس نسبت به نمونه یک پاس کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد در نمونه بازیابی دینامیکی رخ داده است و با نتایج سختی و استحکام مطابقت خوبی دارد.

6- فهرست علائم

K ضریب استحکام (MPa)

N نماد کرنش سختی

علائم یونانی

σ تنش (MPa)

ε کرنش

7-مراجع

- [1] Segal, V., Materials processing by simple shear, *Materials Science and Engineering: A*, 197(2), pp. 157-164, 1995.
- [2] Ruslan Z. Valiev, Yuri Estrin, Zenji Horita, Terence G. Langdon, Michael J. Zechetbauer, Yuntian T. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 58(4), pp. 33-39, 2006.
- [3] Valiev, R., Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties, *Nature materials*, 3(8), pp. 511, 2004.
- [4] M. Shahbaz, N. Pardis, R. Ebrahimi, B. Talebanpour, A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, 530, pp. 469-472, 2011.
- [5] Talebanpour, B., R. Ebrahimi, and K. Janghorban, Microstructural and mechanical properties of commercially pure aluminum subjected to dual equal channel lateral extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, 527(1-2), pp. 141-145, 2009.
- [6] Chengpeng Wang, Fuguo Li, Qinghua Li, Jiang Li, Lei Wang, Junzhe Dong, A novel severe plastic