

فرآوری لوله‌های نازک مننیزی با استفاده از فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی (TCAP) با هندسه دوزنقه‌یی

محسن کامران ماسوله (دانشجوی کارشناسی ارشد)

احمد عاصم‌پور* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

مهندسی مکانیک شریف (تابش ۱۴۰۲)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۸۲-۷۵، (پژوهشی)

در این پژوهش، با طراحی بهینه پارامترهای هندسی کانال دوزنقه‌یی، نیروی فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی (TCAP) کاهش یافته و برای اولین بار لوله‌های مننیزی با ضخامت ۱ میلی‌متر با استفاده از این فرایند فرآوری شده‌اند. در ابتدای پژوهش، با استفاده از مدل المان محدود، فرایند در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و تأثیر پارامترهای هندسی بر روی نیروی فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد فرایند با پارامترهای هندسی بهینه، لوله‌های مننیزی با قطر خارجی ۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس طی سه پاس، فرآوری شده‌اند. نتایج حاصل از آزمون‌های متالوگرافی، میکروسختی و کشش نشان می‌دهد که فرایند TCAP با هندسه دوزنقه‌یی و پارامترهای هندسی بهینه، فرایند مناسبی برای اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی لوله‌های مننیزی با ضخامت یک میلی‌متر است. مقادیر استحکام تسلیم و استحکام نهایی در پاس دوم به ترتیب ۱/۶ و ۱/۲۶ برابر نمونه اولیه شده و به مقدار ۶۰ و ۹۲ مگاپاسکال رسیده‌اند.

واژگان کلیدی: تغییرشکل پلاستیک شدید، فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی، لوله‌های فوق ریزدانه نازک، مننیزم.

mohsenkamran7394@gmail.com
assem@sharif.edu

۱. مقدمه

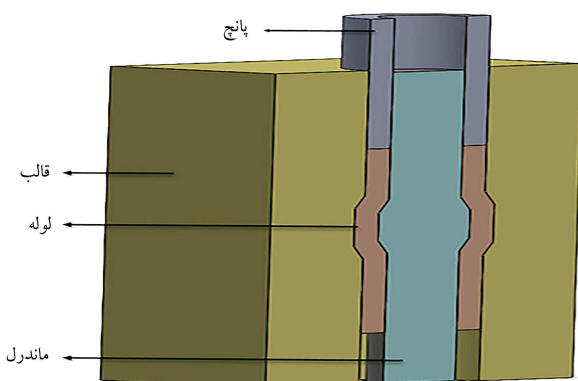
لوله‌های نازک نقش مهمی در محصولات فناوری‌های الکترونیکی، مهندسی پزشکی و میکرومیدل‌های حرارتی دارند. در همین راستا، فرایند شکل‌دهی و ساخت این محصولات از نظر کیفیت محصول تولیدی بسیار مهم است. به عنوان مثال، مننیزم به دلیل سازگاری مناسب با بدن برای ساخت استنت‌های زیست‌تخریب‌پذیر، ماده‌ی مناسب است، اما خواص مکانیکی آن برای کاربردهای استنت مطلوب نیست. به همین دلیل، در تحقیقات اخیر با استفاده از روش‌های مختلف از جمله فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)^۱ خواص مکانیکی و ریزساختار آن بهبود یافته است. در فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید در حضور فشار هیدرواستاتیک بالا، بدون اینکه تغییر محسوسی در ابعاد نمونه ایجاد گردد، کرنش شدیدی به ماده اعمال می‌شود. تاکنون روش‌های SPD گوناگونی برای فرآوری مواد توده‌یی، لوله‌ها و ورق‌ها ابداع شده است. فرایندهای فشار در کانال مساوی زاویه‌دار (ECAP)^۲ پیچش فشار بالا (HPT)^۳ اکستروژن متوالی فشار (CEC)^۴ و نورد اتصال‌ی تجمعی (ARB)^۵ از

* نویسنده مسئول

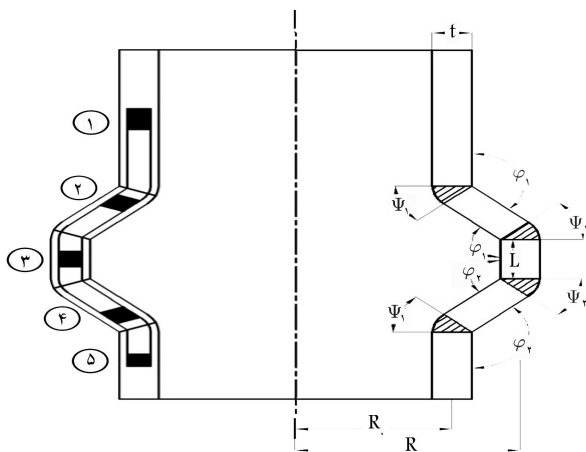
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۱، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

استاد به این مقاله:

ماسوله، محسن کامران و عاصم‌پور، احمد، ۱۴۰۲. فرآوری لوله‌های نازک مننیزی با استفاده از فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی (TCAP) با هندسه دوزنقه‌یی. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۸۲-۷۵. DOI:10.24200/J40.2023.61457.1660



شکل ۱. شماتیکی از فرایند TCAP دوزنقه‌یی و اجزای مربوطه.



شکل ۲. پارامترهای هندسی و نواحی مختلف TCAP دوزنقه‌یی.

و با عبور از منطقه تغییرشکل، کرنش پلاستیکی شدیدی به آن اعمال می‌شود. شکل ۲، پارامترهای هندسی قالب TCAP دوزنقه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، ماده با عبور از مناطقی ۱ تا ۵، چهار مرتبه تحت کرنش برشی، یک بار به صورت کششی و یک بار به صورت فشاری تحت کرنش شعاعی و محیطی قرار می‌گیرد.

۳. طراحی بهینه پارامترهای هندسی کانال دوزنقه‌یی

شکل فرایند TCAP

انتخاب مناسب هرکدام از پارامترهای هندسی قالب می‌تواند تأثیر بسزایی در نتایج خروجی فرایند داشته باشد. با توجه به شکل ۲، زوایای کانال (φ)، زوایای انحنای گوشه (ψ)، طول قاعده کوچک (L) و نسبت تغییر شکل (R) به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است. با استفاده از مدل المان محدود، فرایند شبیه‌سازی شده و تأثیر پارامترهای هندسی قالب بر نیرو فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از متغیرهای طراحی، مطابق جدول ۱، در سه سطح تنظیم شده‌اند. برای بررسی اثر تمامی متغیرهای طراحی به روش فاکتوریل کامل^{۱۴} به ۷۲۹ آزمایش نیاز داریم. اما با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوشی^{۱۵} این تعداد آزمایش به ۲۷ عدد کاهش می‌یابد. با استفاده از نرم‌افزار مینیتی^{۱۶} آرایه متعامد ($L_{27}(3^4)$) برای طراحی آزمایش انتخاب شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از حلگر دینامیک صریح^{۱۷} و به صورت تقارن محوری انجام شد. تمامی اجزای قالب

و پارگی لوله در راستای ضخامت همراه است. به همین دلیل، تاکنون روش‌های محدودی برای فرآوری لوله‌های نازک فوق‌ریزخانه ارائه شده است. در سال ۲۰۱۰، لاپوک و همکاران از فرایند HPTT برای فرآوری لوله‌هایی با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده کردند. در این تحقیق، عدم یکنواختی در خواص مکانیکی در راستای ضخامت لوله به دلیل عدم یکنواختی کرنش‌های اعمالی گزارش شده است.^[۱۰]

در سال ۲۰۱۵، گروهی از پژوهشگران با قرار دادن یک لاستیک از جنس پلی‌اورتان در داخل لوله، تغییرشکل پلاستیک شدید را با استفاده از فرایند ECAP به لوله نازک مسی اعمال کردند. در این تحقیق، تئرانس ابعادی ضخامت لوله بعد از فرآوری از دقت زیادی برخوردار نبوده است.^[۱۱] فرجی و همکاران، روش‌های افزایش و کاهش تناوبی قطر (CFS)^{۱۱} و استحکام‌دهی لوله توسط لاستیک (RPTS)^{۱۲} را برای تولید لوله‌های فوق‌ریزخانه نازک بلند ابداع نمودند. در این فرایندها، در هر پاس، کرنش کمی به ماده وارد می‌شود. به همین دلیل، برای رسیدن به ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب، نمونه باید تحت تعداد پاس‌های فراوانی قرار گیرد.^[۱۳-۱۲]

در برخی از تحقیقات برای فرآوری لوله‌های نازک فوق‌ریزخانه، ابتدا لوله ضخیم تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرد، سپس با استفاده از فرایند میکرواکستروژن ضخامت لوله کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، عبدالوند و همکاران ابتدا با استفاده از فرایند PTCAP، لوله‌ای با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر را فرآوری کردند، سپس با استفاده از فرایند اکستروژن معکوس لوله (TBE)^{۱۳} ضخامت آن را به ۰/۷۵ میلی‌متر کاهش دادند و از این طریق موفق به تولید لوله نازک فوق‌ریزخانه شدند.^[۱۴]

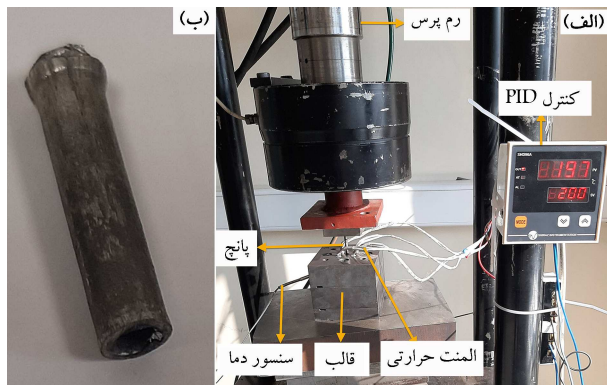
در فرایند TCAP که یکی از مؤثرترین فرایندهای فرآوری لوله‌های ضخیم است، سطح مقطع لوله و سنبه یکسان است، به همین دلیل با کاهش ضخامت لوله، ظرفیت تحمل بار سنبه به شدت کاهش می‌یابد و امکان فرآوری لوله‌های نازک با استفاده از این فرایند ممکن نمی‌شود. برای فرآوری لوله‌های نازک با استفاده از این فرایند، باید نیروی فرایند به میرانی کاهش یابد که سنبه در زمان انجام فرایند دچار تسلیم و کمانش نشود. کانال شکل‌دهی در این فرایند می‌تواند اشکال مثلثی، نیم‌دایره و دوزنقه‌یی داشته باشد. هندسه دوزنقه‌یی از لحاظ همگن بودن کرنش‌های اعمالی در راستای ضخامت و نیروی فرایند در وضعیت مناسبی قرار دارد.^[۱۵]

در پژوهش حاضر، با طراحی بهینه پارامترهای هندسی کانال دوزنقه‌یی، امکان فرآوری لوله‌هایی با ضخامت یک میلی‌متر با استفاده از فرایند TCAP فراهم شده است. برای بررسی عملکرد این فرایند در فرآوری لوله‌های نازک، یک لوله منیزیمی با قطر خارجی ۵ و ضخامت ۱ میلی‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس تحت سه پاس با استفاده از این فرایند فرآوری شده و ریزساختار و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. اساس فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی با هندسه

دوزنقه‌یی

اساس فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی با هندسه دوزنقه‌یی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این فرایند ابتدا لوله در داخل قالب با برآمدگی دوزنقه‌یی شکل قرار می‌گیرد و از سمت دیواره‌های قالب به آن فشار هیدرواستاتیک وارد می‌شود. سپس با استفاده از یک سنبه توخالی، لوله به کانال زاویه‌دار اکستروژد می‌شود



شکل ۴. الف) تجهیزات انجام فرایند TCAP ذوزنقه‌بی (ب) نمونه فرآوری شده.

رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید. [۱۶]

$$\varepsilon_{eq} = N$$

$$\left[\sum_{i=1}^4 \left[\frac{2 \cot \left(\frac{\phi_i}{\gamma} + \frac{\psi_i}{\gamma} \right) + \psi_i \operatorname{cosec} \left(\frac{\phi_i}{\gamma} + \frac{\psi_i}{\gamma} \right)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{4}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_1}{R_0} \right] \quad (1)$$

با جایگذاری پارامترهای هندسی قالب در رابطه‌ی ۱، مقدار کرنش معادل در پاس اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۱/۶۴، ۳/۲۸ و ۴/۹۲ بدست می‌آید.

۴. آزمایش‌های تجربی

در این پژوهش، لوله‌های منبزم خالص با قطر خارجی ۵ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۲۵ میلی‌متر و در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، با استفاده از فرایند TCAP ذوزنقه‌بی طی سه پاس فرآوری شدند.

۴.۱. نحوه انجام فرایند

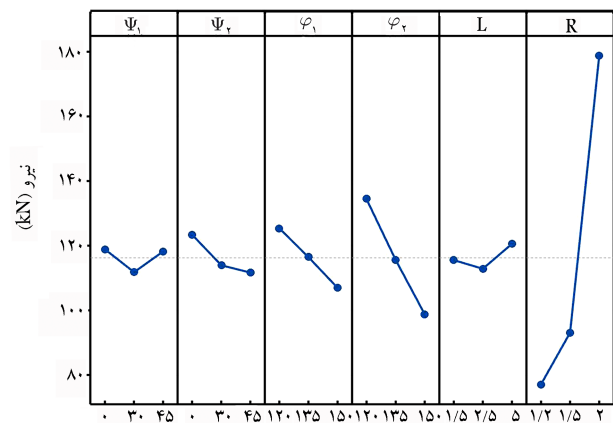
تجهیزات انجام فرایند و نمونه فرآوری شده در شکل ۴ نشان داده شده است. برای انجام فرایند، از دستگاه پرس SANTAM با سرعت متوسط ۷۰ میلی‌متر در دقیقه استفاده شد. دمای قالب با استفاده از چهار عدد المنت حرارتی از نوع فشنگی با ابعاد ۴۰ در ۱۰ میلی‌متر مربع و توان ۳۵ وات افزایش یافت و برای تنظیم دما از کنترل‌کننده PID استفاده شد. در فرایندهای اکستروژن از پودر MOS_۲ به عنوان روان‌کننده استفاده می‌شود که در این تحقیق برای افزایش کارایی این پودر، با روغن هیدرولیک ترکیب شده و قبل از انجام فرایند، لوله و دیواره‌های قالب به آن آغشته شدند. سیاهی نمونه‌بی که در اثر استفاده از پودر مولیبدن دی‌سولفید به وجود آمده بود، با کشیدن سنباده نرم از روی سطح لوله به راحتی از بین می‌رود.

۴.۲. آزمون کشش

شکل ۵ تجهیزات آزمون کشش را نشان می‌دهد. با توجه به ابعاد کوچک لوله، امکان خارج کردن نمونه استاندارد آزمون کشش از آن وجود نداشت، بنابراین آزمون بر روی خود لوله انجام شد. برای جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی فرایند بر نتایج آزمون کشش، طول نمونه خارج شده از داخل قالب به اندازه ۲/۵ میلی‌متر از هر طرف کوتاه گردید. همچنین، برای جلوگیری از لغزش لوله در داخل گیره دستگاه کشش، ابتدا ۵ میلی‌متر

جدول ۱. سطوح متغیرهای طراحی.

سطح			پارامتر
۳	۲	۱	
۱۵°	۱۳۵°	۱۲۰°	زاویه ورودی کانال (φ _۱)
۱۵°	۱۳۵°	۱۲۰°	زاویه خروجی کانال (φ _۲)
۴۵°	۳۰°	۰°	زاویه انحنای ورودی و خروجی (ψ _۱)
۴۵°	۳۰°	۰°	زاویه انحنای وسط (ψ _۲)
۲	۱/۵	۱/۲	نسبت تغییر شکل (R = R _۱ /R _۰)
۵ m	۲/۵ mm	۱/۵ mm	طول قاعده کوچک (L)



شکل ۳. تاثیر پارامترهای هندسی کانال ذوزنقه‌بی بر نیروی فرایند TCAP.

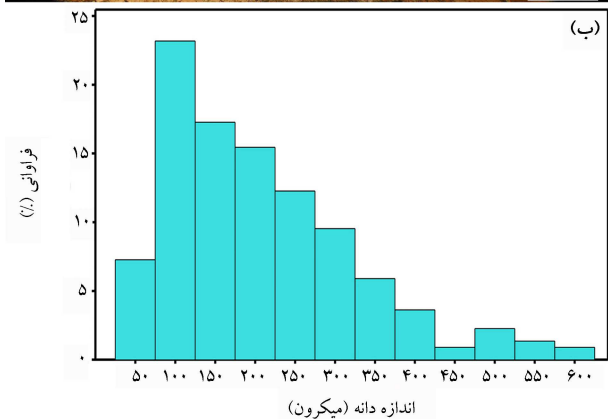
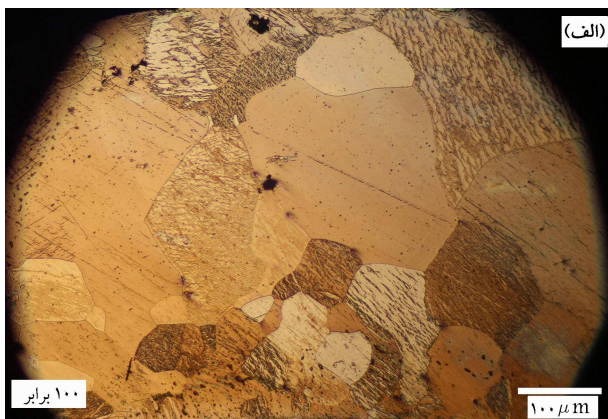
جدول ۲. پارامترهای هندسی بهینه قالب TCAP ذوزنقه‌بی.

پارامتر	مقدار
φ _۱ = φ _۲	۱۵°
ψ _۱ = ψ _۲	۱۳/۲°
L	۱/۵ mm
R = R _۱ /R _۰	۱/۲

به صورت صلب تحلیلی^{۱۸} و لوله به صورت شکل‌پذیر مدل گردیده است. ضریب اصطکاک بین لوله و اجزای قالب ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. با توجه به شدید بودن تغییر شکل در طول فرایند، از تکنیک مش سازگار^{۱۹} برای جلوگیری از اعوجاج شدید المان‌ها استفاده شد.

شکل ۳ نمودار تغییرات نیرو براساس پارامترهای هندسی قالب را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۳، زوایای کانال و نسبت تغییر شکل، بیشترین تأثیر را بر روی نیروی فرایند دارند. با افزایش مقدار R، نیرو با شیب تندی افزایش می‌یابد و با افزایش مقادیر φ_۱ و φ_۲، نیرو کاهش می‌یابد. متغیرهای ψ_۱، ψ_۲ و L تأثیر کمتری بر روی نیروی فرایند دارند. به منظور دستیابی به کمترین مقدار نیرو برای فرآوری لوله‌های با ضخامت ۱ میلی‌متر با استفاده از فرایند TCAP، پارامترهای هندسی قالب به صورت جدول ۲ طراحی شده است.

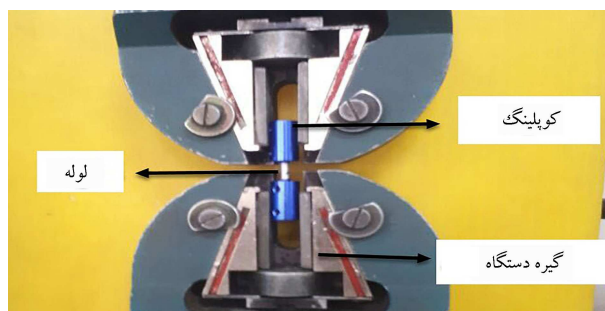
یکی از عوامل تأثیرگذار بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار لوله فرآوری شده، مقدار کرنش اعمالی در طول فرایند است. با بسط دادن رابطه کرنش معادل در فرایند TCAP با هندسه مثلثی فرمول محاسبه کرنش معادل در فرایند حاضر به صورت



شکل ۶. الف) ریزساختار لوله قبل از فرآوری با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر (ب) نمودار توزیع اندازه دانه نمونه اولیه.

تصویر نشان می‌دهد که با توجه به استفاده از شمش منیزیم خالص، توزیع دانه در لوله اولیه به شدت غیریکنواخت و اندازه دانه‌ها بسیار بزرگ است. بر اساس شکل، مشاهده می‌شود که اندازه دانه‌ها در وسط ضخامت لوله بزرگ‌تر از محیط داخلی و خارجی است. این تفاوت ممکن است ناشی از انجام فرایند ماشین‌کاری در ساخت لوله باشد. بر اساس نمودار توزیع اندازه دانه، کوچکترین و بزرگترین اندازه دانه به ترتیب ۲۵ و ۶۲۵ میکرومتر است و متوسط اندازه دانه لوله ساخته شده از شمش ریختگی منیزیم خالص ۲۰۰ میکرومتر است.

فرایند TCAP یک فرایند ترمومکانیکال است که در آن کرنش و دما باعث بهبود و تصفیه ریزساختار می‌شود. شکل ۷ نشان‌دهنده ریزساختار نمونه‌های فرآوری شده در پاس‌های مختلف فرایند TCAP است. در موادی که دارای شبکه کریستالی هگزاگونال متراکم (HCP) ^{۲۰} مانند منیزیم هستند، تعداد سیستم‌های لغزش در دمای پایین بسیار کم است. در این مواد، با تشکیل دوقلوبی‌های مکانیکی صفحات لغزش بیشتری برای حرکت ناهنجاری‌ها فراهم می‌شود و از این طریق شکل‌پذیری مواد با ساختار HCP افزایش می‌یابد. به همین دلیل دوقلوبی‌ها در ریزساختار نمونه‌های فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه افزایش یافته است. دوقلوبی‌ها در نمونه فرآوری شده دانه‌های درشت را به صورت لایه‌بندی تقسیم کرده‌اند که تعداد محدودی از آنها در پاس دوم با پیکان‌های قرمز رنگ، در ریزساختار مشخص شده است.^[۱۷] در قسمت‌هایی از ریزساختار نمونه فرآوری شده در پاس دوم و سوم که با مربع‌های سبز رنگ نشان داده شده، دانه‌های ریز مانند گردن‌بند حول دانه‌های درشت شکل گرفته‌اند که این اتفاق ناشی از اصلاح ریزساختار براساس مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی است و در تحقیقات



شکل ۵. نحوه انجام آزمون کشش.

از سر و ته نمونه در داخل کوپلینگ قرار گرفت و سپس کوپلینگ‌ها میان فک‌های گیره قرار گرفتند. همچنین، برای جلوگیری از لهیدگی لوله در داخل کوپلینگ، دو عدد بین با قطر ۳ میلی‌متر و طول ۵ میلی‌متر در دو انتهای لوله قرار داده شد. آزمون در دمای محیط و با نرخ کرنش ۰/۰۰۱ ثانیه انجام گردید. از آنجا که تمام نمونه‌ها در شرایط یکسانی تحت آزمون کشش قرار گرفتند، نتایج حاصل از این آزمون به لحاظ کیفی، قابل استناد هستند.

۳.۴. آزمون میکروسختی

متناسب با ابعاد کوچک نمونه‌های منیزیمی، برای محاسبه سختی از آزمون میکروسختی ویکرز استفاده شد. برای انجام آزمون، نمونه‌ها در جهت عمود بر محور اکستروژن برش داده شدند و در داخل مانت قرار گرفتند. سپس، نمونه‌ها با استفاده از سنباده ۵۰۰۰ تمیز شدند تا کیفی‌های سطحی از بین برود. در مرحله بعد، با استفاده از دستگاه میکروسختی سنجی بوهرلر، باری به مقدار ۵۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه بر روی نمونه اعمال شد. مقدار سختی در سه نقطه مختلف در مقطع لوله اندازه‌گیری شد و میانگین این سه نقطه به عنوان مقدار سختی گزارش گردید.

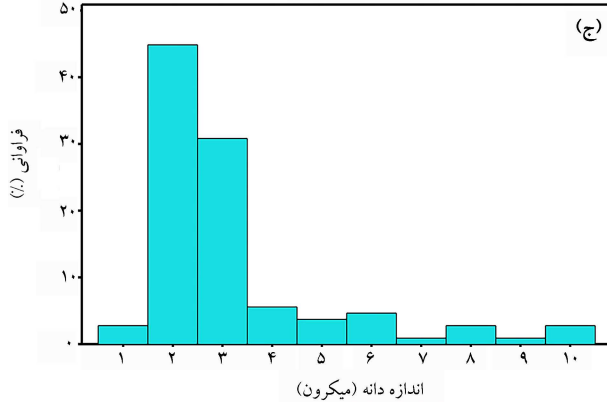
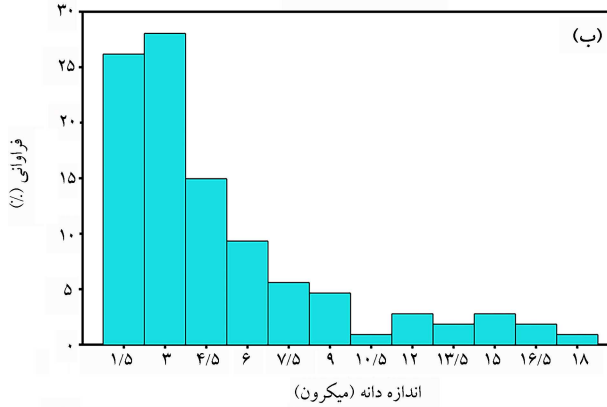
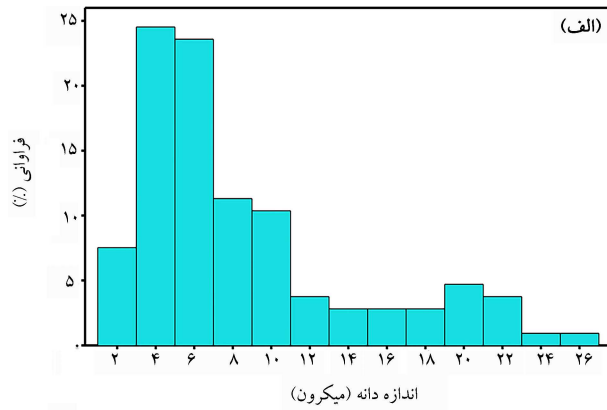
۴.۴. متالوگرافی

به منظور متالوگرافی در دو جهت، یعنی محور اکستروژن و عمود بر محور اکستروژن، نمونه‌ها مورد مقطع‌گیری قرار گرفتند. سپس سطح نمونه‌ها با استفاده از کاغذهای سلیسیم تا شماره ۵۰۰۰ تحت فرایند پرداخت سطحی قرار گرفت و در پایان، با استفاده از خمیر الماس ۱ میکرون پولیش شد. برای اچ کردن نمونه‌ها از محلول استیک - پیکرال استفاده شد که یک محلول مناسب و عمومی برای منیزیم است. در این فرایند، سطح نمونه‌ها به مدت ۲۰ ثانیه در تماس با محلول قرار گرفت و سپس با استفاده از اتانول شسته شد تا هیچ اثری از محلول روی آن باقی نماند. برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری استفاده گردید و اندازه دانه‌ها با استفاده از روش تقاطع خطی محاسبه شد. در تصویر میکروسکوپی لوله قبل از فرآوری، با کشیدن یک خط صاف ممکن است نهایتاً ۴ الی ۵ مرزدانه با خط تقاطع داشته باشند، لذا در این حالت و به دلیل بزرگ بودن اندازه دانه‌ها، طول محیط خارجی، داخلی و مرکزی را بر تعداد دانه‌هایی که در این مناطق وجود دارند تقسیم کرده و سپس میانگین این سه عدد به عنوان اندازه دانه گزارش شده است.

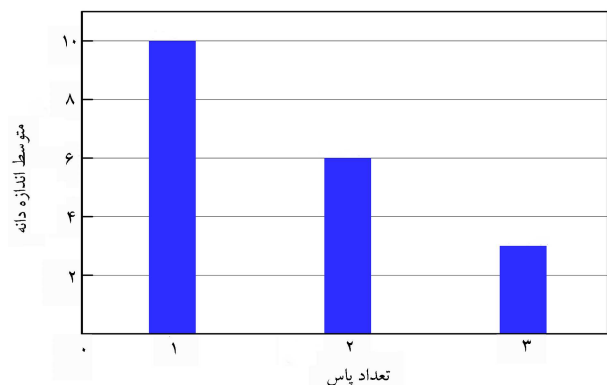
۵. نتایج و بحث و بررسی

۱.۵. بررسی ریزساختار

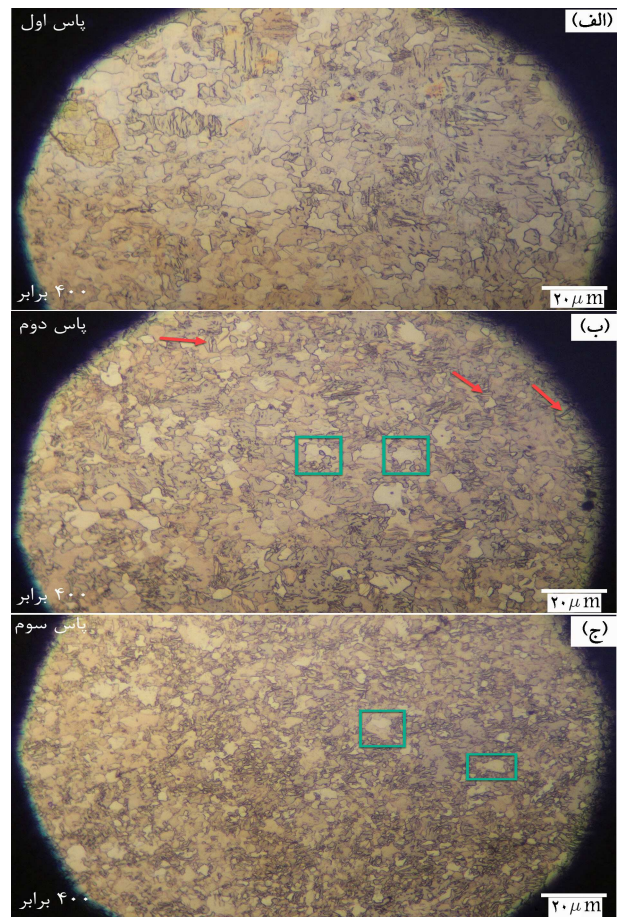
شکل ۶، نمودار توزیع اندازه دانه و تصویر ریزساختار لوله اولیه را نشان می‌دهد. این



شکل ۸. نمودار توزیع اندازه دانه نمونه‌های فرآوری شده در الف) پاس اول ب) پاس دوم ج) پاس سوم.



شکل ۹. نمودار تغییرات متوسط اندازه دانه نمونه‌های فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه.



شکل ۷. ریزساختار لوله‌های فرآوری شده با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر در الف) پاس اول ب) پاس دوم ج) پاس سوم.

پیشین نیز با اعمال فرایند ECAP بر روی منیزیم و آلایزهای آن مشاهده گردیده است. [۱۸-۱۹]

شکل ۸ نمودار توزیع اندازه دانه نمونه‌های فرآوری شده در طی پاس‌های مختلف را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که توزیع اندازه دانه در نمونه‌های فرآوری شده دوقله‌یی^{۲۱} است و نسبت به نمونه اولیه یکنواخت‌تر شده است. مقادیر کوچکترین و بزرگترین اندازه دانه در پاس اول به ترتیب برابر با ۱ و ۲۷ میکرومتر است که در پاس سوم به مقدار ۵/۰ و ۱۰/۵ میکرون رسیده است. بنابراین، با افزایش تعداد پاس‌ها، توزیع اندازه دانه یکنواخت‌تر شده و محدوده تغییرات آن کاهش می‌یابد. شکل ۹ تغییرات متوسط اندازه دانه طی پاس‌های مختلف را نشان می‌دهد. در نمونه‌های فرآوری شده در پاس دوم و سوم متوسط اندازه دانه نسبت به نمونه اولیه به ترتیب ۹۷/۵ و ۹۸/۵ درصد کاهش یافته و به مقدار ۶ و ۳ میکرون رسیده است. مطابق با شکل، با افزایش کرنش عملی در پاس‌های متوالی اندازه دانه به طور پیوسته کاهش یافته است.

۲.۵. سختی سنجی

شکل ۱۰، تغییرات سختی نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۱۰، با بالا رفتن تعداد پاس، مقدار سختی به طور پیوسته افزایش یافته است. در موادی مانند منیزیم که دارای ساختار کریستالی HCP هستند، به دلیل کمبود سیستم‌های لغزش، مقدار سختی به طور شدیدی به اندازه دانه وابسته است.^[۲۰] بنابراین، افزایش

می‌رسند، به علت متفاوت بودن جهت‌گیری دانه‌ها لغزش آن‌ها از یک دانه به دانه دیگر با مشکل همراه می‌شود. در همین راستا، با کاهش اندازه دانه و افزایش تعداد مرزخانه‌ها در فرایندهای SPD، استحکام مواد افزایش می‌یابد. در نمونه‌های آلایز منیزیم که با استفاده از فرایندهای SPD فرآوری شده‌اند، افزایش همزمان شکل‌پذیری و استحکام گزارش شده و برای این اتفاق دلایلی مانند کاهش نسبت تنش برشی بحرانی منعکس شده^{۲۳} به دلیل پالایش دانه، توزیع یکنواخت رسوب و تغییر بافت کریستالی در ریزساختار بیان شده است.^[۲۳-۲۴] یکی دیگر از دلایل افزایش همزمان استحکام و شکل‌پذیری در مواد فوق ریزدانه، توزیع دوقله‌یی اندازه دانه در ریزساختار است. در موادی که دارای توزیع دوقله‌یی اندازه دانه در ریزساختار خود هستند، مکانیزم کرنش سختی به نحوی است که تغییر شکل یکنواخت پایدار باقی می‌ماند و شکست نهایی دیر انجام می‌شود.^[۲۴] توزیع دوقله‌یی اندازه دانه و پالایش دانه در ریزساختار نمونه‌های فرآوری شده می‌توانند دلایلی برای افزایش همزمان استحکام و شکل‌پذیری در این پژوهش باشند.

با توجه به شکل ۱۱، مقدار استحکام تسلیم از مقدار اولیه ۳۷ مگاپاسکال به ترتیب در نمونه‌های یک پاس، دو پاس و سه پاس به مقادیر ۵۲، ۶۰ و ۵۶ مگاپاسکال رسیده است. بیشترین افزایش استحکام تسلیم در پاس دوم اتفاق افتاده و بعد از پاس دوم مقدار استحکام تسلیم کاهش یافته است. استحکام نهایی نمونه‌های یک پاس، دو پاس و سه پاس نسبت به نمونه اولیه، به ترتیب ۱۵، ۲۵/۷ و ۱۷/۸ درصد افزایش یافته است. میزان افزایش طول در نمونه‌های مربوط به یک پاس، دو پاس و سه پاس به ترتیب به مقادیر ۱۳/۲۵، ۱۳/۷۲ و ۱۲/۴ درصد رسیده است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، لوله‌های منیزیمی با ضخامت یک میلی‌متر با استفاده از فرایند TCAP با کانال دوزنقه‌یی و پارامترهای هندسی بهینه فرآوری شد و تأثیر تعداد پاس بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. برخی از نتایج مهم این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. با توجه به نتایج، فرآوری لوله‌های منیزیمی با ضخامت یک میلی‌متر با استفاده از فرایند TCAP دوزنقه‌یی با پارامترهای هندسی بهینه با مشکلاتی از قبیل کماتش سنبه و پارگی لوله همراه نبوده و فرایند مناسبی برای اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی لوله‌های نازک است.

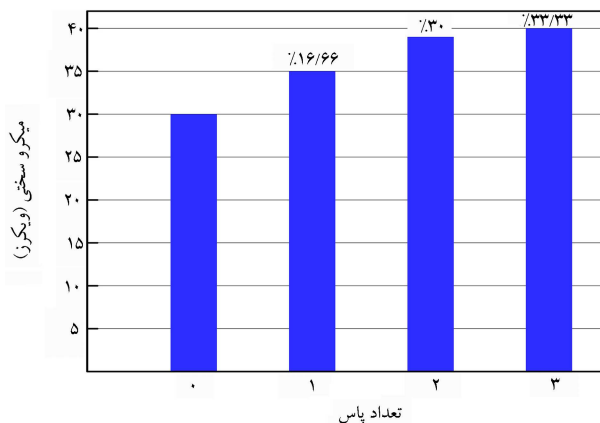
۲. بهترین حالت برای بهبود خواص مکانیکی در طول یک فرایند SPD، حالتی است که همزمان استحکام و شکل‌پذیری افزایش یابند؛ این موضوع در این فرایند به وقوع پیوسته است.

۳. مقدار استحکام تسلیم، استحکام نهایی و افزایش طول از پاس اول تا دوم افزایش و از پاس دوم به سوم کاهش یافته است. مقدار استحکام تسلیم و استحکام نهایی در پاس دوم به ترتیب ۱/۶ و ۱/۲۶ برابر نمونه اولیه شده است.

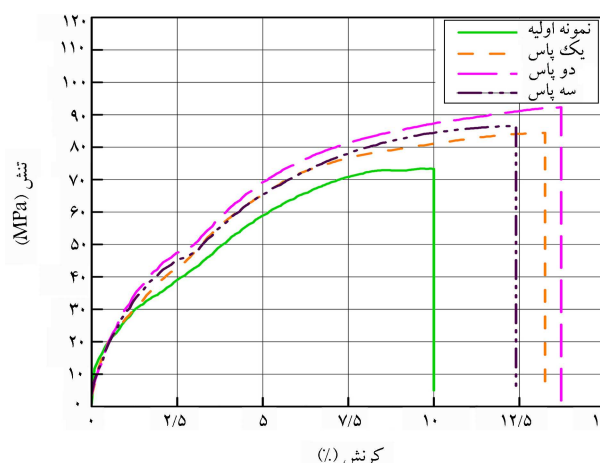
پانویس‌ها

1. Severe Plastic Deformation (SPD)

2. Equal Channel Angular Pressing (ECAP)
3. High Pressure Torsion (HPT)
4. Cyclic Extrusion Compression (CEC)
5. Accumulative Roll Bonding (ARB)



شکل ۱۰. نمودار تغییرات سختی نمونه‌های فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه.



شکل ۱۱. نمودار تنش و کرنش نمونه اولیه و نمونه‌های فرآوری شده در پاس اول، دوم و سوم.

مقدار سختی می‌تواند متناسب با ریزدانه شدن نمونه‌های فرآوری شده باشد. با ادامه روند کاهش اندازه دانه در طی پاس‌های متوالی، مقدار سختی به ترتیب به مقادیر ۳۵، ۳۹ و ۴۰ ویکرز رسیده است. مقدار سختی در پاس سوم نسبت به پاس دوم با افزایش سه درصدی همراه بوده است. این موضوع بیانگر اشباع‌شدگی افزایش سختی براساس تعداد پاس می‌باشد که در تحقیقات مشابه بر روی آلایز منیزیم مشاهده شده است.^[۲۱]

۳.۵. آزمون کشش

شکل ۱۱، نمودار تنش و کرنش لوله اولیه و لوله‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱، استحکام تسلیم، استحکام نهایی و افزایش طول^{۲۲} لوله‌های فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه افزایش یافته است. با اعمال تغییر شکل پلاستیک به مواد، نابجایی‌ها در ریزساختار شروع به حرکت می‌کنند و زمانی که به مرزخانه

6. High Pressure Tube Twisting (HPTT)
7. Accumulative Spin Bonding (ARB)
8. Tubular Channel Angular Pressing (TCAP)
9. Parallel Tube Channel Angular Pressing (PTCAP)
10. Hydrostatic Tube Cyclic Expansion Extrusion (HTCEE)
11. Cyclic Flaring and Sinking (CFS)
12. Rubber Pad Tube Straining (RPTS)
13. Tube Back Extrusion (TBE)
14. Full Factorial
15. Tuguchi Design
16. Minitab
17. Dynamic Explicit
18. Analytical Rigid
19. Adaptive Mesh
20. Hexagonal Close Pack (HCP)
21. Bimoda
22. Elongation
23. Critical Resolved Shear Stress

منابع (References)

1. Segal, V. and et al., 1981. Plastic working of metals by simple shear. *Russian Metallurgy*, pp.99-105.
2. Alexander, P. and et al., 2008. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*, 53(6), pp.893-979. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>.
3. Richert, M., Liu, Q. and Hansen, N., 1999. Microstructural evolution over a large strain range in aluminium deformed by cyclic- extrusion-compression. *Materials Science and Engineering: A*, 260(1.2), pp.275-283. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)00988-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00988-5).
4. Saito, Y. and et al., 1999. Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Materialia*, 47(2), pp.579-583. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00365-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00365-6).
5. Arzaghi, M. and et al., 2009. Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting. *Scripta Materialia*, 60, pp.175-177. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.09.029>.
6. Mohebbi, M.S. and Akbarzadeh, A., 2010. Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes. *Materials Science and Engineering: A*, 528(1), pp.180-188. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.081>.
7. Faraji, G., Mosavi, M. and Seop, H., 2011. Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*, 65(19-20), pp.3009-3012. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.06.039>.
8. Faraji, G. and et al., 2012. Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*, 77, pp.82-85. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.03.007>.
9. Motallebi Savarabadi, M., Faraji, G. and Zalnezhad, E., 2019. Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes. *Journal of Alloys and Compounds*, 785, pp.163-168. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.149>.
10. Lapovok, R. and et al., 2010. Severe plastic deformation processes for thin samples. *Journal of Materials Science*, 45, pp.4554-4560. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4403-x>.
11. Al-Mufadi, F. and Djavanroodi, F., 2015. Equal-channel angular pressing of thin-walled copper tube. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40, pp.2785-2794.
12. Torabzadeh Kashi, H. and Faraji, G., 2015. Cyclic flaring and sinking (CFS) as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes. *Modares Mechanical Engineering*, 15(8), pp.411-416 [In persian].
13. Shapourgan, O. and Faraji, G., 2016. Rubber pad tube straining as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(10), pp.1845-1854. <https://doi.org/10.1177/0954405416654185>.
14. Abdolvand, H. and et al., 2015. A novel combined severe plastic deformation method for producing thin-walled ultrafine grained cylindrical tubes. *Materials Letters*, 143, pp.167-171. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.12.107>.
15. Faraji, G., Reshadi, F. and Baniasadia, M., 2014. A new approach for achieving excellent strain homogeneity in tubular channel angular pressing (TCAP) process. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 2(1), pp.3-11.
16. Mesbah, M., Faraji, G. and Bushroa, A.R., 2014. Characterization of nanostructured pure aluminum tubes produced by tubular channel angular pressing (TCAP). *Materials Science and Engineering: A*, 590, pp.289-294. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.036>.
17. Knauer, E., Freudenberger, J., Marr, T., Kauffmann, A. and Schultz, L., 2013. Grain Refinement and Deformation Mechanisms in Room Temperature Severe Plastic Deformed Mg-AZ31. *Metals*, 3(3), pp.283-297. <https://doi.org/10.34657/4382>.
18. Figueiredo, R.B. and Langdon, T.G., 2009. Principles of grain refinement in magnesium alloys processed by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, 44, pp.4758-4762. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-009-3725-z>.
19. Figueiredo, R. and Langdon, T., 2009. The nature of grain refinement in equal-channel angular pressing: A comparison of representative fcc and hcp metals. *International Journal of Materials Research*, 100(12), pp.1638-1646. <https://doi.org/10.3139/146.110228>.
20. Faraji, G., Mashhadi, M.M. and Kim, H.S., 2011. Microstructure inhomogeneity in ultra-fine grained bulk AZ91 produced by accumulative back extrusion (ABE). *Materials Science and Engineering: A*, 528(13.14), pp.4312-4317. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.075>.
21. Faraji, G., Yavari, P., Aghdamifar, S. and Mosavi Mashhadi, M., 2014. Mechanical and Microstructural Properties of Ultra-fine Grained AZ91 Magnesium Alloy Tubes Processed via Multi Pass Tubular Channel Angular Pressing (TCAP). *Journal of Materials Science & Technology*, 30(2), pp.134-138. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.08.010>.

22. Samadpour, F., Faraji, G. and Savarabadi, M.M., 2020. Processing of long ultrafine-grained AM60 magnesium alloy tube by hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) under high fluid pressure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, pp.3535-3544. DOI:10.1007/s00170-020-06352-0.
23. Jafarzadeh, H., Abrinia, K. and Babaei, A., 2014. Repetitive tube expansion and shrinking (RTES) as a novel SPD method for fabrication of nanostructured tubes. *Materials Science and Engineering: A*, 596, pp.194-199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.12.037>.
24. Wang, Y.M. and Ma, E., 2004. Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal. *Acta Materialia*, 52(6), pp.1699-1709. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.12.022>.