



دانشگاه صنعتی شاهرود دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایاننامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

عنوان مطالعه عددی و تجربی شکلدهی لولهی دو فلزی در کانالهای همسان زاویهدار

> نگارنده آرش پولادسنج

استاد راهنما دکتر سید هادی قادری

بهمن ۱۳۹۶



باسمەتعالى

المکی الکی شیراندان مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صور تجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای آرش پولادسنج با شماره دانشجویی ۹۳۰۴۶۴۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان مطالعه عددی و تجربی شکل دهی لولهی دو فلزی در کانال های همسان زاویه دار که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۰۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود بر گزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

		د 🗌	ۇ 🚽 🕅 مردو	قبول (با امتياز . ١٩٨٨ درجه ٩
		and the second second to the second	نی 🗹	نوع تحقیق: نظری 🗹 عم
	امضاء	مرتبهٔ علمی	نام ونام خانوادگی	عضو هيأت داوران
(6.55	استادیار	دکتر سید هادی قادری	۱_استادراهنمای اول
	-			۲ – استادراهنمای دوم
				۳ - استاد مشاور
	time	استادیار	دکتر سید وحید حسینی	۴ – نماینده تحصیلات تکمیلی
9	9/11/04	استادیار	دكتر مهدى وحدتى	۵ – استاد ممتحن اول
	A SI	استادیار	دکتر هادی پروز	۶استاد ممتحن دوم
	de.			
	/	لىكدە:	نام و نام خانوادگی رئیس دانش	
		کدہ:	تاریخ و امضاء و مهر دانش	
ξ	ن ن نامه خود دفاع نماید (دفاع	متیل می تواند از پایا	داکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحد	تیصره: در صورتی که کسی مردود شود حا
		Maria Carlos) ³) _r	محدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقديمنامه

به پاس تعبیر عظیم وانسانی ثان از کلمه ایثار واز خودکذشتی به پاس عاطفه سر شار و کرمای امید بخش و جود شان که در سرد ترین دوران به تسرین پشتیبان است به پاس قلب بهی بزرگشان که فریاد س است و سرکر دانی و ترس در پناہشان به شجاعت می کراید وبېپاس محبت پای بې د يغثان که هرکز فروکش ښکند ماحصل آموخة فايم راتقديم مىكنم به استوارترین تکیه کاہم، دستان پر مهریدرم که عالمانه به من آموخت تا چکونه در عرصه زندگی، استادگی راتجربه کنم وبه زیباترین نگاه زندگیم، به مادرم، درمای بی کران فداکاری و عثق که وجودم برایش مه رنج بودو وجودش برایم مهه مهر

سپاسگزاری

. نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم حاری سازم و ساپس خودرا در وصف اسادان خویش آشکار نایم، که هر چه کویم و سرایم، کم گفته ام . به مصداق «من لم يشمر المحلوق لم يشكر الحالق »

بسی ثابیة است از زحات و ساعدت پای بی ثانبه اسآدرا به مای گرانقدر جناب آقای دکتر سید مادی قادری تشکر وقدر دانی می کنم، که با کرامتی چون خورشید، سرز مین دل را روشی بخشید و گلشن سرای علم و دانش را بارور ساختند. سلامت و توفیق روز افزونشان را از خداوند متعال خواسارم . از پدر و مادر عزیز م که بمواره با که می مادی و معنوی خود پشیبانم بودند بی نهایت سپاس کرارم .

، پچنین از مهندس رضاسعید نژاد، شهاب مرادی، میرصادق اکسریان، نوید رضایی و تامی دوستان و عزیزانی که در راستای انجام این پژوهش اینجانب راصمیانه بمراہی ویاری نمودند، کلل سایس کزاری را دارم .

تعهد نامه

اینجانب آرش پولادسنج دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکدهی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایاننامه ((مطالعه عددی و تجربی شکلدهی لولهی دو فلزی در کانالهای همسان زاویهدار)) تحت راهنمائی دکتر سید هادی قادری متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
 - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده
 است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود میباشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود »
 و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایح اصلی پایان نامه تأثیر گذار بودهاند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول
 اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاريخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
 - استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیدہ

توليد فلزات فوق ريزدانه (UFG) با توجه به خواص مكانيكي برتر خود، توجه زيادي را در صنعت و جامعه علمی به خود جلب کردهاند. یکی از این روشها پرسکاری در کانالهای زاویهدار همسان (ECAP) است که به علت عدم تغییر در سطح مقطع نمونه می توان آن را بارها تکرار کرد. هدف از این پایاننامه، مطالعه عددی و تجربی شکلدهی لوله دوفلزی آلومینیوم- مس با ضخامت mm و قطر خارجی به ترتیب ۱۲ و ۱۰ mm با طول ۵۰ mm با استفاده از فرآیند ECAP است. برای این منظور با انجام آزمونهای اولیه، نیاز به استفاده از فشار پشتی احساس شد. نظر به استفاده از سیستم فشار پشتی در خروجی قالب، ابزارهای مورد نیاز طراحی و ساخته شد. زاویه بین دو کانال $\varphi=9\cdot^{\circ}$ انتخاب شد. با توجه به ماهیت لوله و جلوگیری از مچالگی و از دست فتن ابعاد داخلی آن، از ماندرل های لاستیک وایتن و میله مسی درون لوله استفاده شد. فرایند با ماندرلهای لاستیک وایتن و میله مسی از دمای محیط تا بیشینه دمای کاری ۲°۱۵۰ با فشار پشتی متغیر از ۵۰ تا ۴۰۰ MPa انجام شد. به دلیل نامطلوب بودن نتایج، دمای فرایند را تا C°۲۰ و C°۲۵۰ به همراه فشار پشتی متغیر ۵۰، ۱۰۰ و MPa ۲۰۰ افزایش داده و با توجه به محدودیت دمای کاری لاستیک وایتن، فقط از ماندرل میله مسی استفاده شد. فرایند پرس کاری روی نمونههای لوله دوفلزی آلومینیوم- مس در دو دمای $^{\circ}C$ و $^{\circ}C$ با فشار پشتی ۵۰ و ۱۰۰ MPa، هر کدام در ۳ مرحله تحت مسیر Bc که در آن نمونهها پس از هر پاس، ۹۰[°] در امتداد محور طولی در یک جهت چرخانده و دوباره ECAP میشوند، با موفقیت انجام شد. سپس تاثیر پارامترهای فرایند روی ریزساختار، سختی و ضخامت دیواره لولهها، مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج سختیسنجی حاکی از بیشینه افزایش سختی برای لوله آلومینیوم در حالت خام از ۴۰/۱۳ ویکرز با افزایش ٪۱۱۸ به ۸۷/۴ ویکرز و برای لوله مسی در حالت خام از ۶۳/۷ ویکرز با افزایش ٪۱۰۶ به ۱۳۱ ویکرز در انتهای ۳ مرحله ECAP می باشد. همچنین تحلیل المان محدود فرایند در نرمافزار آباکوس، با دو ماندرل لاستیک وایتن و میله مسی در دمای محیط انجام گرفت و انطباق خوبی بین نتایج آن و نتایج تجربی مشاهده شد.

واژگان کلیدی: پرسکاری در کانالهای زاویهدار همسان، تغییر شکل شدید مومسان، فلزات فوق ریزدانه، لوله دو فلزی. مقالات مستخرج از پایاننامه/رساله

فهرست عنوانها

ج	چکیدہ
٥	تقديمنامه
9	سپاسگزاری
	فهرست عنوانها
	فهرست شکلها
٤	فهرست جدولها
ف	فهرست نشانهها
1	فصل ۱ مقدمه
۱	۱-۱- نانو مواد
٣	۲-۱- روش تولید مواد ریزدانه
۴	۱-۳- فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید
Υ	۰۱–۴– انواع روشهای SPD برای لوله
٨	۱–۵– فرآیند پرس کانال زاویهدار لولهای
زى	۱-۶- فرآیند پرس کانال زاویهدار لولهای موا
١٢	۱–۷- فرآیند PTCAP ترکیبی
۱۴	۱ – ۸– فرآیند پرس کانال لولهای
١۶	۱-۹- فرآیند پیچش لوله در فشار بالا
ستىكى	۱-۱۰– فرآیند کرنشدهی لوله با بالشتک لا
۱۸	۱–۱۱– فرآیند اکستروژن پسرو جدید
۱۹ (ECAP)	۱–۱۲– فرآیند پرس کانال زاویهدار همسان
۱۹	I-1۲-۱ اصول فرآيند ECAP
۲۱ECA	۱–۱۲–۲ کرنش اعمال شده در فرآیند P
۲۲EC	۱۲-۱۲ مسیرهای کرنش در فرآیند AP
7۴	۱-۱۲-۴ تاثیر زاویه کانال
۲۵	۱-۱۲-۱ تاثیر زاویه گوشه (زاویه انحناء) .

78	۱–۱۲–۶ تاثیر سرعت اعمال بار (سرعت شکلدهی)
79	۱–۱۲ تاثیر اصطکاک
79	۱-۱۲-۱ دمای انجام فرآیند
۲۷	۱–۱۲–۹ فشار پشتی
۲۸	۱–۱۳– پیشینه تحقیق
٣٢	۱۴-۱- ساختار پایاننامه
۳۵	فصل ۲ روش تحلیل المان محدود
۳۵	۲-۱- روش اجزاء محدود
٣٧	-۲-۲ شبیهسازی فرآیند ECAP لوله دو فلزی به همراه فشار پشتی
٣٧	۲-۲-۱ مدلسازی اجزای فرآیند
۳۸	۲-۲-۲ خصوصيات لوله و لاستيک
۴.	۲-۲-۳ مونتاژ اجزای قالب
41	۲-۲-۴ تعییین تعداد گام و نوع حل مسئله
41	۲-۲-۵ تعیین نوع تماس سطوح
47	۲-۲-۶ شرایط مرزی و بارگذاری
47	۲–۲–۷ شبکهبندی
40	فصل ۳ طراحی و اجرای آزمونهای تجربی
40	٣-١- مواد اوليه
49	۳–۲– تعیین خواص مکانیکی لوله
49	۳-۲-۱ آزمون کشش لوله
۴۸	۳-۳- آمادەسازى نمونەھا
۴٨	۴–۳– قالب ECAP
۵١	۳–۵– اجرای آزمون تجربی
۵۷	۳-۶- آمادهسازی نمونههای سختیسنجی
۵۷	۳–۷– اندازه گیری سختی
۵۹	۳-۸- آمادهسازی نمونههای متالوگرافی
81	فصل ۴ نتایج و بحث
۶١	۴-۱- آزمون کشش تکمحوری
۶۵	۲-۴- نتایج تجربی

٧٩	۴–۳- متالوگرافی ماده
λΥ	۴-۴- نتایج سختیسنجی
٨٨	-5-4 تحلیل نیروی فرایند
۹۲	۴-۶- توزیع ضخامت نمونهها
٩٩	۴-۷- مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی
۱۰۵	فصل ۵ نتیجه گیری و ارائهی پیشنهادها
۱۰۵	۵–۱– مقدمه
۱۰۵	۵-۲- نتیجه گیری
۱۰۹	۵–۳- ارائەى پيشنھادھا
111	منبع ها

فهرست شكلها

۵	۱-۱: زاویه جهت گیری مرزدانهها با یکدیگر	شکل
۹	۲-۱: شماتیک فرایند TCAP و پارامترهای قالب [۲]	شکل
۱۱	۲-۱: شماتیک فرآیند PTCAP الف) شروع فرآیند، ب) سیکل اول، ج) سیکل دوم [۶]	شکل
۱۱	۴-۱: پارامترهای قالب PTCAP [۶]	شکل
و	۵-۱: شماتیک فرآیند PTCAP ترکیبی الف) سیکل اول، ب) سیکل دوم، ج) اکستروژن پس	شکل
۱۳	لوله [۸]	
۱۳	۰-۶: پارامترهای قالب در فرآیند PTCAP و اکستروژن پسرو [۸]	شکل
	۲-۱: شماتیک فرآیند TCP الف) شروع پاس اول، ب) انتهای پاس اول، ج) شروع پاس دوم	شکل
۱۵	[٩]	
۱۵	۸-۱: دو هندسه متفاوت قالب، الف) سگال ب) لوییس [۱۰]	شکل
۱۷	۱-۹: شماتیک فرآیند پیچش لوله در فشار بالا [۱۱]	شکل
j	۱۰-۱: شماتیک فرآیند کرنشدهی لوله با بالشتک لاستیکی [۱۳] الف) ابتدای فرآیند، ب) در	شکل
۱۸	حین فرآیند، ج) انتهای فرآیند، د) مجموعه قالب	
۱۹	۱۱-۱: شماتیک فرآیند اکستروژن پسرو جدید [۱۴]	شکل
٢٠	۱۲-۱: شماتیک کلی قالب ECAP	شکل
21	۱۳-۱: چگونگی تغییر شکل یک المان مربعی از قطعهکار در قالب ECAP [۱۰]	شکل
22	۱۴-۱: مسیرهای مختلف فرآیند ECAP [۱۷]	شکل
٢٣	۱۵-۱: سیستمهای مختلف لغزش برای مسیرهای متفاوت [۱۷]	شکل
٢۵	۱۶-۱ تغییرات کرنش ایجاد شده بر اساس زاویه کانال و زاویه گوشه طبق رابطه ۱-۳ [۱۰].	شکل
۲۷	۱۷-۱: تأثیر دمای فرایند ECAP بر اندازه دانهها [۲۱]	شکل
۲۸	۱۸-۱: شماتیک قالب ECAP با سنبه فشار پشتی	شکل

۳۸	شکل ۲-۱: هندسه اجزای مدل شده در نرمافزار آباکوس
٣٩	شکل ۲-۲: منحنی تنش-کرنش مومسان لوله آلومینیومی
٣٩	شکل ۲-۳: منحنی تنش-کرنش مومسان لوله مسی
۴۰	شکل ۲-۴: مونتاژ اجزای قالب و لولهها در شبیهسازی
بمتری)۴۷	شکل ۳-۱: ابعاد نمونههای تست کشش لوله بر اساس استاندارد ASTM A307 (ابعاد میل
۴۷	شکل ۳-۲: دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ به همراه سیستم کنترل رایانهای
۴۸	شکل ۳-۳: لوله دوفلزی با ماندرلهای میله مسی و لاستیک وایتن
۴٩	شكل ٣-۴: الف) طرحواره قالب، ب) قالب طراحي شده
۵۰	شکل ۳-۵: فیکسچر قالب و جک هیدرولیک
	شکل ۳-۶: اجزا مختلف قالب الف) نیمه پایینی، ب) هسته افقی (کفه استوانهای بالا)،
۵۰	ج) هسته افقی (کفه استوانهای پایین)
۵۱	شکل ۳-۷: پرس هیدرولیک ۱۵۰ تن ژاو آریا
۵۲	شكل ۳-۸: منبع تامين قدرت هيدروليكي
۵۳	شکل ۳-۹: الف) مدار کنترل دما، ب) المانهای حرارتی داخل حلقه فشاری
۵۳	شکل ۳-۱۰: گریس مورد استفاده در فرآیند
۵۵	شکل ۳-۱۱: موقعیت مجموعه قالب، فیکسچر و جک هیدرولیک
۵۷	شكل ٣-١٢: دستگاه پوليش متكو
۵۸	شکل ۳-۱۳: دستگاه اندازه گیری میکروسختی
۵۸	شکل ۳-۱۴: طرحواره اندازهگیری سختی لوله دوفلزی
۶۲	شكل ۴-۱: منحنى تنش-كرنش حقيقى آلومينيوم
۶۲	شکل ۴-۲: منحنی تنش-کرنش حقیقی مس
۶۴	شکل ۴-۳: نمونههای لوله مسی و آلومینیومی پس از آزمون کشش

شکل ۴-۴: نمونههای خروجی از قالب پس از یک مرحله ECAP در دمای محیط با فشار پشتی ۱)
۵۰ MPa و ۲) ۱۰۰ MPa با ماندرل لاستیک وایتن، ۳) ۵۰ MPa و ۴) ۱۰۰ MPa با ماندرل
مىلە مسى
شکل ۴-۵: نمونههای خروجی از قالب پس از یک مرحله ECAP در دمای ℃۱۰۰ با فشار پشتی ۵)
۲۵۰ MPa (۶ ،۲۰۰ MPa (۶ ،۱۰۰ MPa و ۸) ۲۰۰ MPa با استفاده از ماندرل لاستیک
وايتن ۶۸
شکل ۴-۶: نمونههای خروجی از قالب پس از یک مرحله ECAP در دمای C°۱۰۰ با فشار پشتی
۹) MPa ۱۰۰ ، ۱۰ ، ۱۰۰ و ۱۰۱ و ۲۰۰ MPa با استفاده از ماندرل میله مسی ۶۹
شکل ۴-۲: نمونههای خروجی از قالب پس از یک مرحله ECAP در دمای ℃۱۵۰ با فشار پشتی ۱۲)
۱۰۰ MPa و ۱۳) ۲۰۰ MPa با ماندرل لاستیک، ۱۴) ۵۰ MPa و ۱۵) ۱۰۰ MPa با ماندرل
میله مسی
شکل ۴-۸: نمونه خروجی از قالب پس از دو مرحله ECAP در دمای ۲°۱۵۰ و فشار پشتی ۱۰۰ MPa
به روش B _C با استفاده از ماندرل میله مسی
شکل ۴-۹: نمونههای خروجی از قالب در دمای C°۲۰۰ و فشار پشتی MPa ۵۰ پس از
۱) یک، ۲) دو و ۳) سه مرحله ECAP به روش B _C با استفاده از ماندرل میله مسی
شکل ۴-۱۰: نمونههای خروجی از قالب در دمای C°۲۰۰ و فشار پشتی MPa ۱۰۰ پس از
۱) یک، ۲) دو و ۳) سه مرحله ECAP به روش B _C با استفاده از ماندرل میله مسی
شکل ۴-۱۱: نمونههای خروجی از قالب در دمای ۲۰۰° با فشار پشتی ۲۰۰ MPa پس از یک مرحله
ECAP با استفاده از ماندرل میله مسی
شکل ۴-۱۲: نمونههای خروجی از قالب در دمای ℃۲۵۰ و فشار پشتی ۵۰ MPa پس از
۱) یک، ۲) دو و ۳) سه مرحله ECAP به روش Bc با استفاده از ماندرل میله مسی ۷۶
شکل ۴-۱۳: نمونههای خروجی از قالب در دمای ℃۲۵۰ و فشار پشتی MPa بس از
۱) یک، ۲) دو و ۳) سه مرحله ECAP به روش Bc با استفاده از ماندرل میله مسی ۷۷
شکل ۴-۱۴: نمونههای خروجی از قالب در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa ۲۰۰ پس از یک مرحله
ECAP با استفاده از ماندرل میله مسی

نیکل ۴-۱۵: تصاویر متالوگرافی نمونه خام اولیه با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر
شکل ۴-۱۶: تصویر متالوگرافی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰ با فشار پشتی MPa
در ۳ مرحله الف) پاس ۱، ب) پاس ۲، ج) پاس ۳۳ در ۳ مرحله الف) پاس
شکل ۴-۱۷: تصویر متالوگرافی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa
در ۳ مرحله الف) پاس ۱، ب) پاس ۲، ج) پاس ۳۳ در ۳ مرحله الف) پاس
نکل ۴-۱۸: تصویر متالوگرافی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa
در ۳ مرحله الف) پاس ۱، ب) پاس ۲، ج) پاس ۳۳ در ۳ مرحله الف) پاس
نکل ۴-۱۹: تصویر متالوگرافی لوله مسی ECAP شده در دمای ۲۵۰°C با فشار پشتی MPa
در ۳ مرحله الف) پاس ۱، ب) پاس ۲، ج) پاس ۳۳ در ۳ مرحله الف) پاس
شکل ۴-۲۰: میانگین میکروسختی لوله آلومینیوم ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa
۵.
در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۸۴
نیکل ۴-۲۱: میانگین میکروسختی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa
در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۸۴
شکل ۴-۲۲: میانگین میکروسختی لوله آلومینیوم ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa
۱۰۰ در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۸۵
نیکل ۴-۲۳: میانگین میکروسختی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa
در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۸۵
نیکل ۴-۲۴: میانگین میکروسختی لوله آلومینیوم ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa
۵.
در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۸۶
سکل ۴-۲۵: میانگین میکروسختی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa
در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۸۶

شکل ۴-۲۶: میانگین میکروسختی لوله آلومینیوم ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa
۱۰۰ در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۴-۲۷: میانگین میکروسختی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa
در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۲
شکل ۴-۲۸: نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa
در ۳ پاس۹۰
شکل ۴-۲۹: نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa
در ۳ پاس
شکل ۴-۳۰: نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa
در ۳ پاس۹۱
شکل ۴-۳۱: نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa
در ۳ پاس۹۱
شکل ۴-۳۲: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa
شکل ۴-۳۲: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۴-۳۲: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۴-۳۲: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس شکل ۴-۳۳: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۴-۳۲: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس شکل ۴-۳۳: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۴-۳۲: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰ با فشار پشتی ۵۹ ۵۹ در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس شکل ۴-۳۳: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰ با فشار پشتی ۵۹ ۵۰ در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۴-۳۲: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس شکل ۴-۳۳: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس ۱۰۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۴-۲۳: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس شکل ۴-۳۳: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۴-۳۲: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰ با فشار پشتی ۵۹۸ ۵۰ در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۴-۲۳: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۹ ۵۰ در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۹۴ شکل ۴-۳۳: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۹ ۵۰ در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس
شکل ۲۰۲۴: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰ با فشار پشتی ۵۹ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس

شکل ۴-۳۸: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa
در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۹۷
شکل ۴-۳۹: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa
در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس۹۷
شکل ۴-۴۰: نمونه اولیه لوله دوفلزی آلومینیوم- مس۹۸
شکل ۴-۴۱: ناحیه مرده بین لوله آلومینیوم و مسی در منطقه تغییر شکل
شکل ۴-۴۲: شبیهسازی فرایند ECAP در دمای محیط با فشار پشتی MPa ۵۰ با استفاده از ماندرل
لاستیک وایتن در سه نمای بالا، پایین و جانبی
شکل ۴-۴۲: شبیهسازی فرایند ECAP در دمای محیط با فشار پشتی MPa ۱۰۰ با استفاده از ماندرل
میله مسی در سه نمای بالا، پایین و جانبی
شکل ۴-۴۴: نمای برشخورده نمونه در راستای طولی الف) نمونه با ماندرل لاستیک وایتن،
ب) نمونه با ماندرل میله مسی

فهرست جدولها

۳۸	ول ۲-۱: خواص مکانیکی مورد استفاده در شبیهسازی برای لوله آلومینیومی و مسی	جد
۴۰	ول ۲-۲: خواص مكانيكي لاستيك وايتن [۳۳]	جد
۵۶	-ول ۳-۱: آزمایشهای تجربی طراحی شده برای فرآیند ECAP لوله دوفلزی	جد
۶۴	ول ۴-۱: خواص مکانیکی لوله آلومینیومی و مسی	جد

فهرست نشانهها

	1		
تنش تسليم	$\sigma_{ m y}$	تعداد عبور	Ν
ثابت تسليم	$k_{ m y}$	اندازه دانه	d
كرنش معادل	Ē	مدول یانگ	Ε
کرنش برشی	γ	ضریب کارسختی	K
زاويه بين كانالها	φ	تنش مهندسی	S
زاويه انحنا	ψ	كرنش مهندسي	е
تنش حقیقی	σ	توان کرنشسختی	n
كرنش حقيقي	Е		

فصل ۱ مقدمه

۱–۱– نانو مواد

ریز شدن اندازه دانه یکی از روشهای مهم افزایش استحکام مواد است که نسبت به سایر روشهای استحکامبخشی از اهمیت ویژهای برخوردار است. اگرچه خواص مکانیکی و فیزیکی همهی مواد کریستالی توسط فاکتورهای گوناگونی تعیین میشوند، اما اندازه دانه عموما یک نقش قابل توجه و اغلب غالب را در این زمینه ایفا میکند. در این روش در عین رسیدن به حد مناسبی از استحکام، میتوان به میزان چقرمگی خوبی نیز دست یافت. از این رو استحکام همهی مواد پلی کریستال، بوسیله رابطه هال پچ^۱ با اندازه دانه (b) مرتبط میشوند. این رابطه تنش تسلیم ماده، σ_v ، را به صورت رابطه ۱-۱ بیان میکند [1]:

$$\sigma_{\rm v} = \sigma_0 + k_{\rm v} d^{-\frac{1}{2}}$$

۱

¹ Hall- Petch

 k_y ثابت تسلیم و σ_0 تنش اصطکاکی است. رابطه ۱-۱ نشان میدهد که استحکام ماده با کاهش اندازهی دانه اند فزایش می یابد. این امر منجر به یک علاقه در حال گسترش برای ساخت مواد با اندازه دانه های فوق ریز ('UFG) و مواد نانو بلور^۲ در میان محققین شده است.

مواد UFG به مواد بلوری با اندازه دانه زیرمیکرون و مواد نانو بلور به مواد بلوری که ابعاد خارجی و یا اندازهی فازهای تشکیل دهنده آن حداقل در یک بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد اطلاق میشوند. نانو مواد به گروههای نانو ذرات، نانو لولهها، نانو لایهها و نانو ساختارها تقسیمبندی میشود. از مهم ترین ویژگی در همه انواع مواد این است که فصل مشترک موجود در ساختار آنها سهم قابل ملاحظهای از ساختار ماده را تشکیل میدهد. به همین دلیل رفتار ماده در مقیاس نانومتری تفاوت بنیادی با رفتار آن در مقیاسهای بزرگتر دارد و کنترل این رفتار به کمک نانوفناوری موجب پدید آمدن خواص متنوع و مفیدی میشود. به طور کلی نانومواد خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی متفاوت و اغلب برتری نسبت به مواد متداول از خود نشان میدهند.

به کار گیری نانو مواد، کاهش وزن و افزایش مشخصههای مکانیکی (ازدیاد استحکام، سختی، چقرمگی و…) را به دنبال دارد. به این ترتیب کاربرد نانو مواد میتواند تحولات گستردهای را در صنایع مختلف شامل صنایع خودرو، هوا- فضا، نفت و گاز، پتروشیمی، نساجی، الکترونیک، مغناطیس، کامپیوتر، سنسورها، پزشکی، داروسازی، مواد آرایشی و فناوری اطلاعات و ارتباطات ایجاد کند. استفاده از نانو مواد در برخی از صنایع هم اکنون آغاز شده است. در این میان میتوان به پارچههای ضد چروک، شیشههای خود تمیزشو، نانو کاتالیزورها (برای کاهش مصرف سوخت خودرو و کاهش میزان آلودگی ناشی از محصولات احتراق)، نانو کامپوزیتها و نانو فیلترها را نام برد.

¹ Ultrafine-Grained Materials

³ Nano Crystalline Materials

۲-۱- روش تولید مواد ریزدانه

عموما مواد پلی *کر*یستال را از نظر دانهبندی به سه دسته تقسیم می *ک*نند:

الف) مواد درشت دانه : موادی که اندازه دانه آنها بزرگتر از یک میکرون است.

ب) مواد با اندازه دانههای کوچکتر از میکرون (بین ۱۰۰ نانومتر تا ۱ میکرومتر): این دسته به مواد با دانهبندی بسیار ریز (UFG) نیز معروف هستند.

ج) مواد نانو کریستال (NC): این دسته از مواد دارای اندازه دانه کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر میباشند. به طور کلی مواد UFG یا NC را به دو روش تولید میکنند:

الف) روشهای پایین به بالاً

ب) روشهای بالا به پایین^۳

در روشهای پایین به بالا، مواد UFG/NC را از کنار هم قرار دادن و چیدن اتمهای مجزا در کنار هم و یا تجمع ذرات نانوپودری ایجاد می کنند. مشکل عمده این روش کوچک بودن ابعاد قطعه تولیدی است که این مسئله باعث محدود شدن کاربرد آن شده است. همچنین قطعه تولید شده دارای مقداری تخلخل⁴ و آلودگی است که در حین فرآیند ساخت قطعه حاصل می شود.

در روش بالا به پایین، در ابتدا از یک ماده حجیم با دانهبندی درشت استفاده می کنند. سپس با انجام فرآیندهای خاصی، اندازه دانه آن را تا حد کوچکتر از میکرون و یا نانومتر کاهش می دهند. این روش ها عمدتا بر پایه ایجاد کرنش های پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار هستند و به روش های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD^a) معروف می باشند.

¹Coarse Grain Materials

¹ Bottom- Up

² Up- Bottom

³ Porosity

⁴ Severe Plastic Deformation

۱–۳– فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید

ایجاد ساختار UFG در یک ماده با اندازه دانه متعارف مستلزم اعمال کرنش بسیار شدید به آن بوده که در اثر این کرنش، چگالی بالایی از نابجاییها در ماده ایجاد شده و با نظم مجدد آنها دانههای بسیار ریز ایجاد می شود. در عمل، روش های متعارف شکل دهی فلزات همچون اکستروژن و نورد به دو دلیل نمى توانند چنين ساختاري ايجاد كنند. ابتدا بهدليل كاهش سطح مقطع قطعه كار توسط اين روشها، نمی توان کرنش کلی بیشتری اعمال نمود و دوم اینکه مقدار کرنش تحمیل شده در هر پاس عبور، در این فرآیندها برای ایجاد ساختار UFG ناکافی است. دلیل این امر شاید گویای این مطلب است که بسیاری از فلزات و آلیاژها در دمای محیط و دماهای نسبتا پایین قابلیت کارپذیری کمی دارند. این محدوديتها باعث تمايل به استفاده از روشهايي شده است كه با استفاده از أنها كرنش بسيار بالايي به قطعه کار اعمال نمود بدون اینکه کاهش قابل ملاحظهای در سطح مقطع ایجاد شود. در میان این روشها به فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید به عنوان یکی از روشهای تولید مواد با اندازه دانه نانومتری می توان اشاره کرد. تا کنون فرآیندهای متعددی برای اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید در مواد فلزی و رسیدن به ساختارهای نانومتری پیشنهاد شدهاند که در بسیاری از موارد با موفقیتهایی نیز همراه بودهاند. ویژگی مشترک و منحصر به فرد این فرایندها، ثابت بودن ابعاد و عدم تغییر شکل ظاهری ماده حین فرآیند می باشد که در نتیجه آن، محدودیت در اعمال کرنش از بین می رود و دستیابی به کرنش های بسیار بالا در ماده به راحتی میسر است. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریزساختار، کاهش اندازه دانهها تا مقیاس نانومتری و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم میآید، در حالی که شکل نمونه تغییری نکرده است. ویژگی دیگر این فرآیندها افزایش استحکام و اصلاح ساختار دانهها بدون اضافه كردن عناصر ألياژي است. در مقياس ميكروسكوپي تغيير شكل پلاستيك بيشتر تمايل دارد تا به صورت باندهای برشی محلی ظاهر شود. چنین باندهایی دانههای درشت اولیه را به ریزدانهها و یا شبکههای نابجایی تبدیل میکنند. در ابتدا زاویههای جهت گیری این ریزدانهها کم هستند. برای

¹ Misorientation

کرنشهای بزرگتر، جهتگیری کریستالوگرافی بعضی از این دانهها تا حدی تغییر میکند. از این رو میتوان آنها را کلا به صورت دانههای جدید و مجزا از همسایگان خود در نظر گرفت. شکل ۱-۱ زوایای جهتگیری مرزدانهها را نشان میدهد. زمانی که انحراف زاویه جهتگیری بیشتر از ۱۵ درجه باشد، اصطلاحا مرزدانه با زاویه جهتگیری زیاد تشکیل شده است.



شکل ۱-۱: زاویه جهت گیری مرزدانه ها با یکدیگر

مکانیزم تشکیل ساختار نانومتری در روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید همانند روش آلیاژسازی مکانیکی، به صورت ایجاد چگالی بالایی از نابجاییها، تشکیل ساختار سلولی، ایجاد مرزدانههای فرعی و نهایتا تبدیل مرزدانههای فرعی به مرزدانههایی با زاویه بالا میباشد. چنانچه تغییر شکل پلاستیک بر روی یک ماده چندین بار تکرار شود، دانههای اولیه به طور مکرر به دانههای کوچکتر تقسیم و تا مقیاس نانومتری کوچک می شوند.

مزیت عمده روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید نسبت به دیگر روشها مانند آلیاژسازی مکانیکی در این است که ماده اولیه و مهمتر از آن محصول نهایی به شکل یک قطعه می باشد. لذا نیاز به عملیاتهای ثانویه مانند فشردن و تف جوشی نبوده و خلوص محصول نهایی نیز بالاتر است.

- ريز است.
- این ساختار باعث ایجاد ویژگیهای مکانیکی و فیزیکی خاصی در فلزات UFG/NC میشود. از جمله این ویژگیهای این فلزات میتوان به موارد زیر اشاره کرد: الف) افزایش استحکام تسلیم در مقایسه با فلزات آنیل شده ب) افزایش استحکام کششی
 - ج) افزایش چقرمگی

د) افزایش عمر در بارگذاری نوسانی طولانی (HCF^۳)

با وجود توجهات زیادی که به فرایندهای SPD شده است، اما رشد این فرآیندها و به کارگیری آنها در صنعت روند نسبتا کندی دارد. علت این امر در این است که SPD عملا به صورت یک تکنولوژی شکل دهی ظاهر شده است و تنها تفاوت آن در این است که شکل و ابعاد قطعه کار مورد فرآیند قرار گرفته را حفظ می کند. از این رو SPD شبیه به شکل دهی کلاسیک با همه مشکلات مربوط به گرم کردن، اصطکاک، جریان ماده، ابزار، کیفیت، بهرهوری و هزینهها می باشد.

افزایش توجه و علاقه به فلزات UFG/NC انها را کاندیداهای خوبی برای کاربردهای صنعتی ساخته است. چنین کاربردهایی مستلزم تولید فلزات UFG در محدوده وسیعی از شکلها، ابعاد و در کمیتهای بالا میباشند. نکته قابل توجه دیگری که میتواند وجود داشته باشد عملیاتهای شکلدهی بر روی فلزات UFG/NC برای تبدیل به اجزا مورد نیاز بعد از فرآیند SPD میباشد.

برای ایجاد ساختارهایی با دانههای بسیار ریز و یا در بعد ساختارهای نانو در یک قطعه به کمک روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید، اهداف زیر میبایست مد نظر قرار گیرند:

¹ Recovery

² Precipitation

³ High Cycle Fatigue

الف) دانههای فوق ریز با مرزدانههای زاویه بالا به وجود آیند. زیرا تنها در چنین حالتی است که خواص
برتر ساختارهای فوق ریزدانه بروز میکنند.
ب) ساختار با دانهبندی فوق ریز در تمام نقاط همگن باشد تا یکنواختی و پایداری خواص حاصل شود.
ج) قطعه نهایی عاری از هرگونه ترک، عیب و نقص باشد.
بنابراین باید در هر روش متغیرهای فرآیند به خوبی شناخته و مقادیر بهینه آنها مشخص شوند.
به طور خلاصه مزایای روش تغییر شکل پلاستیک شدید عبارتند از:
الف) امکان تولید مستقیم قطعات فلزی با ابعاد بزرگ و اندازه دانههای نانومتری.
ب) امکان اعمال کرنش.های شدید پلاستیک بدون تغییر ابعاد نمونهها.
ج) قابلیت انجام فرایند به وسیله دستگاهها و قالبهای معمولی.
د) عدم وجود محدودیت در اعمال کرنش، زیرا از لحاظ نظری تعداد دفعات انجام فرآیندها نامحدود
است.

ه) امکان تهیه نمونههای بسیار ریزدانه با ابعاد مناسب برای انجام آزمایشهای مکانیکی. علت این مسئله دشواری تهیه مقدار کافی نمونه با ابعاد مناسب برای انجام آزمایشهای مکانیکی است. با استفاده از روش تغییر شکل پلاستیک شدید، حتی در آزمایشگاه میتوان نمونههایی با اندازه دانه بسیار ریز (زیرمیکرونی یا نانومتری) برای انجام آزمایشهای مکانیکی تولید کرد.

۱−۴−۱ انواع روشهای SPD برای لوله

تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)، روش های پیشرفته فرایندهای شکلدهی فلزات هستند که در سطوح بالایی تنش های هیدرواستاتیک را بدون تغییر سطح مقطع مواد اعمال میکنند و توانایی تولید فلزات فوق ریزدانه با مرزدانههای زاویه بالا را دارند. در این بین میتوان روشهای جدیدی را برای پردازش مواد با استفاده از ترکیب فشار هیدراستاتیک بالا و تغییر شکل برشی ارائه کرد که امروزه در هسته روشهای SPD است. تعداد زیادی از فزایندهای SPD در طول ۲۰ سال گذشته برای تولید فلزات نانوساختار و فوق ریزدانه پیشنهادشده است. تفاوت های بین آنها بهطور عمده به رفتار تغییر شکل، شکل قطعه کار، کرنش اعمال شده در هر پاس و بار مورد نیاز فرایند مربوط است. از نقطه نظر شکل قطعه کار، روشهای SPD را می توان برای مواد حجمی، ورق یا قطعات لولهای طبقه بندی کرد.

۱–۵– فر آیند پرس کانال زاویه دار لولهای

فرایند پرس کانال زاویه دار لوله ای (TCAP^۱)، در سال ۲۰۱۱ توسط فرجی و همکارانش توسعه پیدا کرد [۲]. تصویر شماتیک فرآیند TCAP و پارامترهای قالب در شکل ۱-۲ نشان داده شده است [۳]. در این فرآیند، لوله توسط ماندرل مقید شده و با استفاده از پانچ استوانهای تو خالی به داخل کانال زاویهدار لولهای پرس می شود. در طول یک پاس از فرآیند، ۳ ناحیه برشی متقارن وجود دارد. همچنین با استفاده از کرنش های برشی متقارن محوری، می توان کرنش همگنی در امتداد جهت محیطی لوله بهدست آورد. فرآیند TCAP میتواند برای رسیدن به کرنش های بزرگ بدون هیچ کاهشی در سطح مقطع تکرار شود. فرجی و همکارانش اثر شرایط اصطکاکی را مورد مطالعه قرار داده همچنین هندسه نیم دایرهای در مقایسه با هندسه مثلثی ناحیه تغییر شکل را با روش نرمافزار المان محدود مورد بررسی قرار دادهاند [۴]. نیاز به نیروی کمتر، همگنی کرنش بهتر و تنش هیدرواستاتیک کمتر در داخل هندسه نیم دایره ای نسبت به هندسه مثلثی بهدست آمده است. بررسیها نشان میدهد، افزایش زاویه دوم ($arphi_2$) کانال و کاهش نرخ تغییر شکل، منجر به پایین آمدن نیروی بارگذاری میشود، همچنین نرخ تغییر شکل تاثیر زیادی بر سطح کرنش پلاستیک دارد [۵]. پارامترهای مهمی شامل ابعاد لوله، زاویه دوم کانال قالب، زوایای انحناء، نرخ تغییر شکل و خواص مواد بر نیروی پرس تاثیر می گذارد. بار گذاری یکی از مهم ترین ویژگی های فرآیند است. زاویه انحناء (Ψ_1 و Ψ_1) بیشتر منجر به همگنی بهتر کرنش می شود در حالی که تاثیر چندانی بر روی بارگذاری ندارد [۶]. برای کاهش نیروی فرایند TCAP با استفاده از ارتعاش اولتراسونیک تلاشهایی صورت گرفته است. ارتعاش اولتراسونیک کاهش قابل توجهی در ضریب

¹ Tubular Channel Angular Pressing

اصطکاک و نیروی اصطکاک ایجاد می کند که قسمت بزرگی از بارگذاری فرایند TCAP است. اعمال فشار هیدرواستاتیکی بالا روی مواد، برای به دست آوردن ساختار بسیار ریزدانه با مرزدانه های زاویه بالا بسیار مهم است. فرآیند TCAP دراین زمینه محدودیت هایی دارد. عدم توانایی فرآیند TCAP برای تولید لوله های بلند، یکی از مهم ترین محدودیت های آن است. کل نیروی فرآیند برابر با مجموع نیروی شکل دهی، کار هدررفته و نیروهای اصطکاکی است. نیروهای شکل دهی و کار هدر رفته برای لوله با طول های متغیر، همواره ثابت هستند. اگر چه نیروی اصطکاک به طور چشمگیری با افزایش طول لوله زیاد میشود و در نتیجه نیروی کل افزایش می یابد. باتوجه به هندسه، پانچ استوانهای تو خالی استحکام کمانشی و تسلیم نسبتا پایینی دارد، که باعث ایجاد محدودیت در افزایش طول لوله میشود. همچنین زمانی که طول لوله افزایش می یابد، طول پانچ نیز باید افزایش یافته، که باعث کاهش استحکام کمانش میشود. حد نهایی طول لوله به دست آمده از این روش وابسته به ترکیبی از عوامل که شامل جنس لوله، هندسه قالب، ضخامت و قطر لوله، پارامترهای فرآیند و روانکار میباشد. بنابراین کاهش بارگذاری



شکل I-۲: شماتیک فرایند TCAP و پارامترهای قالب [۳]

۱-۶- فرآیند پرس کانال زاویه دار لوله ای موازی

فرآیند پرس کانال زاویهدار لولهای موازی ('PTCAP)، برای حل مشکل محدودیت بارگذاری فرآیند TCAP، توسط فرجی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ پیشنهاد شد [۷]. این فرآیند دارای ۲ سیکل می باشد و چندین پارامتر شامل زاویه کانال، شکلپذیری و زوایای انحناء در آن تاثیر دارد. شماتیک فرایند در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. در ابتدای این فرآیند لوله در داخل فاصله بین قالب و ماندرل قرار داده می شود که در شکل الف -۳، نشان داده شده است. در سیکل اول لوله توسط پانچ اول از بالا به داخل كانال لولهاى زاويهدار با دو ناحيه برشى متقارن، اكسترود شده است، بهطورى كه قطر لوله افزايش مى يابد (شكل ب - ٣). لوله در سيكل بعدى توسط پانچ دوم دوباره به داخل نواحى برشى قالب از سمت دیگر اکسترود میشود. این فرآیند ممکن است دفعات زیادی برای بدست آوردن کرنش مورد نیاز، بدون هیچ گونه تغییر در سطح مقطع قطعه کار تکرار شود. تاثیر پارامترهای قالب بر روی بارگذاری فرآیند و رفتار تغییر شکل همانطور که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است، توسط فرجی و موسوی مشهدیها تحلیل شده است [γ]. افزایش زوایه کانال (φ)، منجر به کاهش کرنش اعمالی در انتهای هر دو سیکل فرآیند میشود. زوایا انحناء (Ψ) کمتر، باعث بهدست آمدن کرنش همگن تری می شوند و کمترین نیروی بارگذاری و بهترین همگنی کرنش در زاویه انحناء برابر صفر بهدست می آید. نیروی بارگذاری ۶۰٪ در فرايند PTCAP نسبت به فر آيند TCAP، كاهش داشته است. اين مسئله مي تواند مزيت مهمي در فرايند. PTCAP باشد، زیرا امکان تولید لوله های بلندتری را نسبت به فرآیند TCAP ایجاد میکند. همگنی کرنش در لولههای فرآوری شده فرآیند PTCAP از TCAP بهتر است. مقدار کرنش در فرآیند TCAP در نواحی داخلی لوله بیشتر است در حالی که در فرآیند PTCAP، یک روند مخالف این مشاهده شده است [۸]. فرآیند PTCAP ممکن است لوله های ریزساختار شده بلندتری را نسبت به TCAP تولید کند، اما مشکل لوله های دیواره نازک همچنان حل نشده باقی مانده است. برای غلبه بر این محدودیت، چندین روش سعی شده است و برخی از روش های زیر نتیجه شده اند.

¹ Parallel Tubular Channel Angular Pressing



شکل ۱-۳: شماتیک فرآیند PTCAP الف) شروع فرآیند، ب) سیکل اول، ج) سیکل دوم [۷]



شکل ۱-۴: پارامترهای قالب PTCAP [۷]

-۷-۱ فرآیند PTCAP ترکیبی

اگرچه فرآیند TCAP و TCAP، میتوانند لولههای دیواره ضخیم ریزساختار شده تولید کنند، اما این دو فرآیند نمیتوانند در تولید لوله های دیواره نازک به کار برده شوند. زمانیکه فرآیند یک لوله دیواره نازک توسط TCAP و TCAP انجام میشود، به ناچار طول لوله انتخابی به طور چشمگیری کاهش پیدا میکند، زیرا سطح مقطع پانچ با سطح مقطع لوله یکسان است. از سوی دیگر کاهش ضخامت پانچ باعث کاهش ظرفیت تحمل نیرو آن میشود و با توجه به استحکام کمانشی و استحکام تسلیم پانچ نمیتوان طول آن را افزایش داد. نیروی اصطکاک برای فرآیند لوله دیواره نازک متغیر است، درحالی که نیروی شکلدهی بدون تغییر باقی میماند. این مسئله چالش قابل توجهی در فرآیند TCAP و TCAP برای لوله های دیواره نازک محسوب میشود، که برای حل آن عبدالوند و همکارانش روش ترکیبی شامل دو مرحله را ارائه دادند [۹]. در مرحله اول هر دو سیکل فرآیند TCAP برای تولید یک لوله دیواره ضخیم بسیار ریزدانه به کار برده میشود و سپس فرآیند اکستروژن پسرو^۱ برای کاهش ضخامت لوله انجام میشود. فرآیند TCAP ترکیبی در شکل ۱-۵ و پارامترهای قالب هر دو فرآیند TCAP و TCAP و TCAP

¹ Back Extrusion



شکل ۱-۵: شماتیک فرآیند PTCAP ترکیبی الف) سیکل اول، ب) سیکل دوم، ج) اکستروژن پسرو لوله [۹]



شکل ۱-۶: پارامترهای قالب در فرآیند PTCAP و اکستروژن پسرو [۹]

۱-۸- فر آیند پرس کانال لولهای

فرآیند پرس کانال لولهای ('TCP)، اولین بار توسط زنگیآبادی و کاظمینژاد توسعه پیدا کرد [۱۰]. در این روش لوله به داخل یک کانال لولهای که دارای یک ناحیه گلویی است پرس می شود که در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. از یک ماندرل، داخل لوله بهمنظور جلوگیری از مچاله شدن و حفظ ابعاد اولیه آن استفاده شده است. بعد از یک پاس به دلیل طراحی متقارن، قالب را °۱۸۰ چرخانده و وارونه کرده و پاس دوم فرآیند توسط پرس لوله در جهت معکوس انجام می شود. دو هندسه قالب متفاوت وجود دارد (سگال و لوییس)، که در شکل ۸-۱ نشان داده شده است. تفاوت بین فرآیندهای TCP و TCAP ممكن است از هندسه متفاوت كانال استفاده شده در آنها نتيجه شود. روش TCAP از هندسه سگال استفاده کرده است، درحالی که در روش TCP، از هندسه لوییس با شعاع گوشه بزرگتر (R) استفاده شده است. نیرو در فرآیند TCP ممکن است کمی از فرآیند TCAP کمتر باشد، اما کرنش کلی و همچنین نوع کرنش متفاوت هستند. کرنشهای برشی، نقش اصلی را در فرآیند ریزدانه کردن دارند. در حین فرآیند TCP، کرنش برشی کمتر و کرنش های فشاری و کششی بیشتر استفاده شده است. اما در فرآیند TCAP، کرنشهای برشی بیشتر و کرنشهای کششی و فشاری کمتر استفاده شده است. این به این معنی است که فرایند TCAP ممکن است ریزساختار بیشتری در همان کرنش های پلاستیک معادل توليد كند.

¹ Tube Channel Pressing



شکل ۱-۷: شماتیک فرآیند TCP الف) شروع پاس اول، ب) انتهای پاس اول، ج) شروع پاس دوم [۱۰]



شكل ۱-۸: دو هندسه متفاوت قالب، الف) سگال ب) لوييس [۱]

۱-۹- فرآیند پیچش لوله در فشار بالا

فرآیند پیچش لوله در فشار بالا (^۱HPTT)، برای اولین بار توسط توث و همکارانش در سال ۲۰۰۹ توسعه داده شد [۱۱]. فرآیند پیچش لوله در فشار بالا بهصورت شماتیک در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. لوله بین یک دیسک سخت و یک ماندرل قرار داده شده است. ماندرل در داخل لوله قرار گرفته و به صورت کشسان با یک ماشین فشار متراکم شده تا کمی در جهت شعاعی انبساط پیدا کند. از آنجا که انبساط ماندرل توسط لوله محدود شده است، دیسک ها یک تنش هیدرواستاتیک بزرگ و نیروی اصطکاکی زیادی را در هر دو طرف لوله ایجاد میکنند. درنهایت چرخش دیسکها باعث تغییرشکل لوله می شود. همچنین یک شیب کرنش برشی بسیار بزرگ در امتداد ضخامت لوله بهدست می آید. در مقایسه با روشهای SPD قبلی، چرخش لوله در فشار بالا یک فرآیند نیمه پیوسته است که توانایی اعمال کردن مقدار زیادی کرنش را بدون آسیب زدن به نمونه دارد. فشار هیدرواستاتیکی بسیار بالا، فقط استفاده از کرنش های برشی خالص (تقریبا بدون هیچ گونه کرنش نرمال) و توانایی اعمال کرنش-های بالا در یک مرحله، مهم ترین مزایای این فرآیند هستند. باوجود این مزایا، چرخش لوله در فشار بالا، محدودیت هایی همچون: دستگاه پیچیده، سخت بودن فرآیند برای نمونه هایی با مقیاس بزرگ و ایجاد کرنش ناهمگن دارد. این روش همچنین برای تولید لوله های دو لایه استفاده شده است. لایوواک و همکارانش از چرخش لوله فشار بالا اصلاح شده برای ساخت لوله دو فلزی مس- آلومینیوم استفاده کردند [۱۲].

¹ High Pressure Tube Twisting


شکل ۱-۹: شماتیک فرآیند پیچش لوله در فشار بالا [۱۱]

۱-۱۰- فرآیند کرنشدهی لوله با بالشتک لاستیکی

فرآیند کرنش دهی لوله با بالشتک لاستیکی^۱، برای لوله های نسبتا بلند و دیوار مناز ک توسط شاپورگان و فرجی توسعه پیدا کرد [۱۳]. این فرایند مشابه فرایند TCAP با هندسه قالب نیم دایره ای می باشد اما سودمندی آن استفاده از بالشتک لاستیکی به جای قالب سخت است. در این روش یک ماندرل سخت برای پرس کاری به جای یک پانچ توخالی استفاده می شود که روشی مناسب برای فرآیند تولید لوله های نانوساختار دیواره ناز ک و نسبتا بلند است. شماتیک فرآیند کرنش دهی لوله با بالشتک لاستیکی و مجموعه قالب در شکل ۱۰-۱۰ نشان داده شده است. ماندرل تا زمانی که لبه لوله به قسمت محدب ماندرل، مانند شکل الف ۱۰۰ برسد پرس می شود. لوله به صورت موضعی توسط ماندرل تا انتها داده که در شکل ۱۰-۱۰ نشان داده شده است. ماندرل تا زمانی که لبه لوله به قسمت محدب فاندرل، مانند شکل الف ۱۰۰ برسد پرس می شود. لوله به صورت موضعی توسط ماندرل تغییر شکل داده که در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است و قطر لوله افزایش پیدا می کند. زمانی که ماندرل تا انتها فشار لاستیک، لوله را روی ماندرل به عقب فشار داده تا قطر لوله در نواحی قبل و بعد از ناحیه تغییر شکل ثابت نگه داشته شود. در نهایت ماندرل مانند شکل ۱۰-۱۰ به انتهای لوله می رسد.

¹ Rubber Pad Tube Straining



شکل ۱-۱۰: شماتیک فرآیند کرنشدهی لوله با بالشتک لاستیکی [۱۳] الف) ابتدای فرآیند، ب) در حین فرآیند، ج) انتهای فرآیند، د) مجموعه قالب

۱-۱۱- فرآیند اکستروژن پسرو جدید

یکی از مهمترین چالشها در فرآیندهای SPD، عدم وجود روشهای موثر صنعتی برای تولید قطعه کار در مقیاس بزرگ و بلند است. در سال های اخیر، تلاشهای زیادی برای ترکیب فرآیندهای معمولی شکلدهی فلزات با تکنیکهای SPD شده است. فرآیند اکستروژن پسرو جدید برای اعمال کرنش برشی بیشتر از اکستروژن پسرو معمولی توسط شاطرمشهدی و همکارانش ارائه شده است [۱۴]. قالب اکستروژن پسرو جدید، سه قسمت اصلی شامل: محفظه، پانچ متحرک و پانچ ثابت دارد که در شکل ۱۰۱۰ نشان داده شده است. در اکستروژن پسرو جدید، یک شمش درون محفظه قرار داده شده و سپس پانچ متحرک شمش را به داخل فضای خالی قالب با دو ناحیه برشی و با زاویه °۹۰ پرس می کند. بارگذاری کمتر فرآیند و کرنش پلاستیک بیشتر در حدود ۲/۵، مهمترین مزایای این روش در مقایسه با روش معمولی محسوب میشود.



شکل ۱۱-۱: شماتیک فرآیند اکستروژن پسرو جدید [۱۴]

(ECAP) فرآیند پرس کانال زاویه دار همسان (ECAP)

I-11-1 اصول فر آیند ECAP

مرآیند پرس کانال زاویهدار همسان (^۲ECAP)، برای اولین بار توسط سگال و همکارانش در دهه ۸۰ میلادی معرفی شد [۱۵]. هدف آنها ابداع یک روش شکل دهی برای اعمال کرنش های زیاد به قطعه کار بدون تغییر در سطح مقطع آن بود. اصول ابتدایی و کلی فرآیند ECAP در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است. به طور کلی قالب ECAP دارای دو کانال با سطح مقطع یکسان میباشد. در حالت کلی زاویه برخورد کانال ها را با φ و زاویه انحناء را با ψ نشان می دهند. نمونه توسط سنبه در داخل قالب پرس است. به طور کلی قالب φ و زاویه انحناء را با ψ نشان می دهند. نمونه توسط سنبه در داخل قالب پرس قده و با عبور از کانال زاویه دارای دو کانال با سطح مقطع یکسان میباشد. در حالت کلی زاویه شده و با عبور از کانال زاویه دارای دو کانال با نشان میدهند. نمونه توسط سنبه در داخل قالب پرس شده و با عبور از کانال زاویه دار، کرنش برشی بالایی به آن اعمال میشود. برای کاهش اصطکاک بین قالب و نمونه از روانکار استفاده میشود. ماهیت تغییر شکل در فرآیند ECAP از نوع برش ساده^۲ است.

¹ Equal Channel Angular Pressing

² Simple Shear

تحت فرآیند، درون قالب مقید است و تحت تنش هیدرواستاتیک فشاری بالایی قرار دارد، امکان ترک خوردن و شکست کاهش مییابد. ابعاد نمونه در طول فرآیند تغییر نمی کند بنابراین میتوان فرآیند را چندین بار تکرار کرد به عبارت دیگر با تکرار فرآیند میتوان باعث انباشته شدن کرنشها و نهایتا دستیابی به کرنشهای بسیار بالا در نمونه شد. این کرنشهای بالا نقش اصلی را در ریزساختار کردن ماده دارند. اندازه دانه ایجاد شده در نمونه با مقدار کرنش اعمال شده رابطه مستقیم دارد، هرچه کرنش بیشتری داشته باشیم، اندازه دانه ریزتر خواهد شد. به عبارت دیگر، اعمال کرنشهای برشی باعث افزایش چگالی نابجاییها در ماده و تجمع آنها در مرزدانهها میشود، از طرف دیگر افزایش چگالی نابجاییها در ماده باعث افزایش انرژی داخلی ماده میشود و ماده یک حالت تقریبا ناپایدار پیدا می کند. ماده از حالت تعادل انرژی خارج میشود و به دنبال فرصتی برای رسیدن به تعادل میباشد که این فرصت در عملیات حرارتی بهدست میآید، زمانی که دمای ماده بیش از دمای تبلور مجدد باشد. این انرژی باعث ایجاد جوانهها در ماده میشود و هر چه انرژی بیشتری در ماده موجود باشد. چگالی جوانه ایجاد شده بیشتر حرارتی بهدست میآید، زمانی که دمای ماده بیش از دمای تبلور مجدد باشد. این انرژی باعث ایجاد شده و باعث ایجاد دانههای ریزتری میشود. البته باید موجود باشد. چگالی جوانه ایجاد شده بیشتر شده و باعث ایجاد دانههای ریزتری میشود. البته باید مواظب رشد دانههای ایجاد شده بود و با یک شده و باعث ایجاد دانه مد زا اندازه آنها جلوگیری کرد.



شکل ۱-۱۲: شماتیک کلی قالب ECAP

نظر می گیریم که پس از عبور از مسیر فرآیند به صورت ábćá در می آید، با استفاده از اصول اولیه و هندسی می توان گفت که مقدار کرنش اعمالی برابر است با:

$$\gamma = 2 \cot(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2}) + \psi \csc(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2})$$
 ١-١
و نهایتا کرنش معادل پس از N بار تکرار فرآیند از معادله زیر بهدست میآید.

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{\varepsilon}} \left[2 \cot(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2}) + \psi \operatorname{cosec}(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2}) \right]$$
 $(7-1)$

رابطه بالا از روشهای مختلفی توسط محققان بدست آمده و تایید شده است [۱۶].



شکل ۱-۱۳: چگونگی تغییر شکل یک المان مربعی از قطعه کار در قالب ECAP [۱]

در

I--۱۲-۱ مسیرهای کرنش در فرآیند ECAP

قابلیت تکرار فرآیند ECAP بر روی یک نمونه، علاوه بر ایجاد کرنشهای بسیار زیاد در ماده، یک ویژگی مهم دیگر نیز به همراه دارد و آن امکان ایجاد مسیرهای کرنشی مختلف از طریق فعال شدن سیستمهای لفزشی متفاوت میباشد. این کار با چرخش نمونه توسط مسیرهای مختلف بین پاسهای فرآیند انجام میشود. بر همین اساس برای فرآیند ECAP، چهار مسیر متداول بر حسب نوع چرخش نمونه بین عبورهای مختلف تعریف شده است. بین هر دو سیکل متوالی امکان چرخش نمونه حول محور طولی آن وجود دارد لذا مسیرهای مختلفی برای این فرآیند تعریف میشود. تغییر مسیر فرآیند، مسیر برای اعمالی را عوض میکند که نتیجه آن بر ریزدانه شدن و شکل دانه، تاثیرگذار است. بهترین مسیر برای ACAP، مسیری است که بیشترین اختلاف زاویه را بین مرزدانهها ایجاد کند. مسیر BC در کمترین مرحله بیشترین اختلاف زاویه را بین مرزدانهها ایجاد کند. مسیر BC در کمترین مرحله بیشترین اختلاف زاویه را بین مرزدانهها ایجاد کند. مسیر BC



شکل ۱-۱۴: مسیرهای مختلف فر آیند ECAP [۱۷]

مسیر A: که در آن نمونهها بدون هیچگونه چرخشی دوباره وارد قالب میشوند. مسیر BA: که در آن نمونهها در هر بار پرسکاری °۹۰ ساعتگرد و °۹۰ پادساعتگرد میچرخند. مسیر Bc: که در آن نمونهها پس از هر مرحله فقط °۹۰ در یک جهت چرخانده میشوند. مسیر C: که در آن نمونه پس از هر مرحله °۱۸۰ چرخانده میشود. سیستمهای لغزش برای مسیرهای مختلف صفحات لغزشی در هر پاس فرآیند ECAP در مسیرهای مختلف فعال می شوند، صفحاتی که با اعداد ۱ تا ۴ مشخص شده اند متناظر با یک تا چهار مرحله ECAP می باشند. که به صورت شماتیک در شکل ۱۵-۱ آورده شده است. در این شکل صفحات X، Y و Z مشخص شده اند و هر صفحه لغزش با اعداد ۱ تا ۴ در هر پاس علامت گذاری شده است. در مسیر A برش روی دو صفحه متقاطع عمود بر هم صورت می گیرد. در مسیر C تنش برشی به صورت مداوم بر یک صفحه لغزش و در جهات مختلف در هر پاس اعمال می شود. در مسیر BA برش روی صفحات متقاطع با زاویهی [°] ۱۲۰ با هم صورت می گیرد. در مسیر Bc تنش برشی روی چهار صفحه فعال می شود.



شکل ۱-۱۵: سیستمهای مختلف لغزش برای مسیرهای متفاوت [۱۷]

پارامترهای موثر در فرآیند ECAP به طور کلی پارامترهای موثر در فرآیند ECAP به سه دسته تقسیم میشوند الف) پارامترهای هندسی قالب که در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است. ب) پارامترهای فرآیند. ج) پارامترهای دیگر مانند ترکیب اولیه ماده، ریزساختار اولیه و عملیات حرارتی.

که پارامترهای قالب شامل: _ زاویه کانال (φ) _ زاویه گوشه (ψ) _ نوع مسیر انجام فرآیند _ تعداد پاسها _ سرعت انجام فرآیند _ اصطکاک _ دمای فرآیند _ فشار پشتی^۱

1-11-۴ تاثیر زاویه کانال

مهمترین پارامتر فرآیند ECAP، زاویه کانال میباشد که کرنش کل اعمالی به ماده را مشخص می کند. همچنین بر طبیعت ریزساختار نمونه پرس شده تاثیر مستقیم دارد. اعمال کرنش بالا در هر پاس نقش تعیین کنندهای در ریزساختار کردن نمونه دارد، به همین دلیل قالب ECAP ایدهآل، قالبی با زاویه کانال ۹۰ درجه است. محدودیتهایی در این زمینه برای برخی مواد خیلی سخت یا با شکل پذیری پایین وجود دارد که نیاز به استفاده از زوایای بیشتر است. همان طور که از رابطه ۱-۲، مشخص شده است زاویه کانال تاثیر معکوس روی کرنش اعمالی دارد، هر چه قدر زاویه کانال کمتر باشد مقدار کرنش حاصل شده بیشتر خواهد بود. با کاهش زاویه کانال، ماده تحت تغییر شکل برشی بیشتری قرار می گیرد

¹ Back Pressure

در این نمودار چگونگی تغییرات کرنش نسبت به تغییر زاویه کانال با زاویه گوشههای مختلف نمایش داده شده است [۱].



شکل ۱-۱۶: تغییرات کرنش ایجاد شده بر اساس زاویه کانال و زاویه گوشه طبق رابطه ۱-۲ [۱]

در انتخاب زاویه کانال مناسب محدودیتهایی وجود دارد که مهمترین آن چگونگی رفتار ماده در حین فرآیند میباشد. به عبارت دیگر باید زاویه کانال به گونهای انتخاب شود که با توجه به دمای انجام فرآیند، ماده در حین فرآیند دچار شکست نشود و پس از خروج از قالب دارای سطحی سالم و یکنواخت باشد. از طرفی برای بهدست آوردن بازده مناسب در فرآیند باید تا حد امکان زاویه کانال کوچک انتخاب شود. این خود یکی از مهمترین قسمتهای طراحی یک قالب ECAP میباشد که با توجه به نوع مادهای که قرار است ECAP شود، دمای فرآیند و ابعاد نمونه، بتوان بهترین زاویه کانال را انتخاب کرد.

1-11-4 تاثیر زاویه گوشه (زاویه انحناء)

زاویه گوشه همان طور که در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است، زاویه ایجاد شده بین دو کانال متقاطع میباشد. این زاویه در میزان کرنش ایجاد شده تاثیر چندانی ندارد ولی در یکنواختی کرنش در سطح نمونه تاثیر زیادی دارد و همچنین باعث هدایت نمونه به کانال خروجی می شود. همان طور که در شکل ۱۶-۱ دیده می شود تاثیر زاویه گوشه روی مقدار کرنش ناچیز است. مطالعات زیادی تاثیر زاویه انحناء خارجی را در فرآیند ECAP بررسی کردهاند [۱۸].

۱–۱۲–۶ تاثیر سرعت اعمال بار (سرعت شکلدهی)

فرآیند ECAP معمولا توسط پرسهای هیدرولیک تناژ بالا و با سرعت حدود ECAP ۲۰۰ mms میشود. سرعت پرس تاثیر قابل توجهی روی کرنش ایجاد شده و اندازه دانهها ندارد ولی هر چه سرعت پرس کمتر باشد بازیابی سادهتر رخ میدهد و ریزساختار تعادلیتری تشکیل میشود. از تفاوتهای دیگری که در سرعتهای مختلف اتفاق میافتد میتوان به گرم شدن نمونه تحت سرعت شکل دهی بالا اشاره کرد، درحالی که هیچ تغییر دمایی در سرعتهای پایین مشاهده نشده است [۱۹].

۱-۱۲-۷ تاثیر اصطکاک

وجود اصطکاک بین دیواره قالب و نمونه بر ساختار نمونه ECAP شده تاثیر می گذارد. افزایش اصطکاک موجب افزایش ناهمگنی در ریزساختار محصول و بالا رفتن نیروی مورد نیاز انجام فرآیند می شود. با استفاده از روانکارهایی چون MoS2، گرافیت و همچنین استفاده از دیوارههای متحرک، سعی در کاهش اصطکاک و در نتیجه ایجاد محصولی با حداکثر همگنی در ریزساختار شده است.

۱-۱۲-۸ دمای انجام فرآیند

دمای انجام فرآیند ECAP را در مقایسه با سایر پارامتر ها میتوان به راحتی کنترل کرد، از این رو یک فاکتور کلیدی در فرآیند ECAP محسوب می شود. مطابق شکل ۱-۱۷ اندازه دانهها با دمای فرآیند ECAP رابطه مستقیم دارد [۲۰]. با توجه به تحقیقات انجام شده با افزایش دما اندازه دانههای تعادلی و همچنین میزان مرزدانههای با زاویه کم نیز افزایش پیدا میکنند. علت این پدیده افزایش نابودی نابجاییها دراثر افزایش نرخ بازیابی در دماهای بالا و به تبع آن کاهش تعداد نابجاییهای جذب شده به دیوارههای دانههای فرعی میباشد. اگر چه انجام فرآیند ECAP در دماهای بالا به نیروی کمتری نیاز دارد اما بهترین دمای انجام فرآیند پایینترین دمای ممکنی است که میتوان در آن نمونههای سالم و بدون ترک خوردگی ایجاد کرد. با نگهداری دمای فرآیند در کمترین دمای ممکن، امکان رسیدن به کوچکترین اندازه دانه و بیشترین کسر مرزدانههای زاویه بالا ایجاد خواهد شد.



شکل ۱-۱۷: تأثیر دمای فرایند ECAP بر اندازه دانهها [۲۰]

نقش گرم شدن داخلی در حین فرایند ECAP گرم شدن داخلی که در اثر سرعت حرکت پرس و به دلیل اصطکاک بین دیوارههای کانال و نمونه ایجاد میشود، معمولاً بین C° 10-11 میباشد [۱۹].

۱–۱۲–۹ فشار پشتی

مهمترین مزیت استفاده از فشار پشتی در کانال خروجی قالب، بهبود کارپذیری نمونه است. مزیت دیگر استفاده از فشار پشتی افزایش یکنواختی سیلان فلز در طول فرآیند ECAP است. لازم به توضیح است که در طول فرآیند، یک منطقه پر نشده در داخل قالب ایجاد میشود. این ناحیه باعث غیر یکنواخت شدن ریزساختار نمونه در طول فرآیند میشود. اما زمانی که از فشار پشتی استفاده شود ناحیه پر نشده به طور کامل از بین رفته و منطقه کمتر تغییر شکل یافته نمونه حذف میشود. این اتفاقات بدون درنظر گرفتن خواص پلاستیک مواد اتفاق میافتد. از لحاظ فنی نیز روشهای مختلفی برای ایجاد فشار پشتی وجود دارد که ساده ترین آن ها بالا بردن ضریب اصطکاک در سطوح کانال خروجی قالب و بهترین آن ها استفاده از تجهیزاتی است که بتوان با یک سنبه دوم، نیروی مشخص و کنترل شدهای را در داخل کانال خروجی به نمونه وارد کنیم. شکل ۱۸-۱ شماتیک قالب ECAP را با سنبه فشار پشتی نشان میدهد.



شکل I-۸: شماتیک قالب ECAP با سنبه فشار پشتی

۱–۱۳– پیشینه تحقیق

تولید لوله با خواص فیزیکی و مکانیکی برتر همواره مورد توجه محققین بوده است که با استفاده از SPD با روش های گوناگونی مورد مطالعه قرار گرفته است. جوانرودی و همکارانش میلههای آلومینیوم خالص تجاری را تا ۴ پاس با زاویه کانال °۹۰ و زاویه گوشه قالب °۱۷ به روش A بدون پوشش و با پوشش لوله مسی، ECAP کردهاند و تاثیر پوشش لوله مسی بر توزیع کرنش به صورت عددی و تجربی بررسی شده است. قطر کانال ۱۹ و ضخامت لوله مسی ۱ mm درنظر گرفته شده است. اندازه گیری سختی ویکرز در سطح مقطع میلههای آلومینیومی نشان داد که نمونههای با پوشش لوله مسی، یکنواختی بیشتری نسبت به نمونههای بدون پوشش بعد از یک پاس بدست آوردهاند. افزایش زاویه کانال قالب باعث کاهش مقدار کرنش موثر شده است و توزیع کرنش همگن بر روی نمونههای ECAP شده را افزایش میدهد. میانگین مقدار تنش تسلیم و شاخص ناهمگنی برای آلومینیوم با یوشش لوله مسی به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۴۷٪ کمتر از نمونههای آلومینیوم بدون پوشش بهدست آمده است [۲۱]. شاعری و همکارانش تاثیر یوشش لوله مسی بر توزیع کرنش و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۷۵ را در ۴ پاس به روش A و Bc در فرآيند ECAP بررسي كردند. آنها فهميدند كه افزايش ضخامت لوله منجر به بهبود همگني كرنش و افزایش کرنش موثر و کاهش شاخص ناهمگنی نمونهها می شود. نتایج شبیه سازی نشان داد که سطح و همگنی کرنش با کاهش زاویه کانال قالب، افزایش ضریب اصطکاک و استفاده از فشار برگشتی در خروجی قالب، افزایش پیدا می کند [۲۲]. جوانرودی و همکارانش اثر مسیرهای مختلف را روی ECAP لوله مسی بررسی کردند. آنها لوله مسی خالص تجاری را با لاستیک پلیاورتان به عنوان ماندل تا ۳ پاس با ۴ مسیر اصلی Bc ،BA ،A و C را با زاویه قالب [°]۹۰، ECAP کردند. تاثیر مسیرهای متفاوت روی مقدار میانگین سختی و همگنی توزیع سختی نمونهها بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش قابل توجهی در مقدار سختی بعد از ۱ پاس تا ۳۲٪ بدست آمده است. سایز دانهها در پاسهای اول و سوم ECAP با روش Bc به ترتیب در حدود ۵۰٪ و ۶۲٪ کاهش یافته است. همچنین پرس نمونههای لوله تا $^{\circ}$ پاس نشان میدهد که با روش $^{\circ}$ و $^{\circ}$ بهترین مقدار میانگین سختی و یکنواختی توزیع سختی بهدست می آید [۲۳]. جوانرودی و همکارانش، ۳ تکنیک مختلف ECAP لوله را با روش تجربی بررسی کردند. آنها لوله مسی خالص تجاری را با زاویه کانال قالب °۹۰ به روش C با استفاده از ۳ ماندرل گریس، ماسه و لاستیک پلیاورتان برای پرکردن داخل لوله را تا ۳ پاس ECAP کردند. نتایج بهدست آمده نشان داد که لولههای مسی با ماندرل لاستیک، سختی بالاتر و با ماندرل گریس، توزیع سختی همگن تری داشتهاند. همچنین با استفاده از ماندرل پلیاورتان بهترین یکنواختی توزیع ضخامت و حداقل تغییرات ضخامت دیواره لوله نسبت به ماسه و گریس بدست آمده است [۲۴]. ال-موفادی و همکارانش، برای اولین بار ECAP لوله جداره نازک مسی را انجام دادند. آنها لوله مسی به قطر ۲۳ و ضخامت ۱ mm را تا ۴ پاس به ۲ روش Bc و C با زاویه کانال °۹۰ با استفاده از لاستیک پلیاورتان، ماسه و گریس به عنوان ماندرل، ECAP کردند. نتایج نشان داد که فرآیند ECAP لوله جداره نازک مسی با استفاده از

گریس موفقیتآمیز نبوده و لوله دچار شکست می شود. این فرآیند با استفاده از ماندرل ماسه و لاستیک پلیاورتان بدون شکست انجام شده است. در این فرآیند مقدار سختی و سایز دانه بعد از ۴ پاس به ترتيب حدود ٩٠٪ افزايش و ٢٠٠٪ كاهش داشته است. با استفاده از لاستيك پلي اورتان يكنواختي توزيع ضخامت خوبي مشاهده مي شود. همچنين لاستيک پلي اورتان روش موفق تري براي توليد لوله هاي نانو ساختار جداره نازک دیده شده است [۲۵]. جعفرلو و همکارانش، شکل دهی مومسان شدید لولههای آلومینیوم ۶۰۶۱ را با فرآیند ECAP بررسی کردند. آنها دو انتهای لوله را بسته و با روغن هیدرولیک داخل لوله را پر كرده و با استفاده از قالب با زاوايه كانال °۱۲۰ و زاويه گوشه °۲۲ موفق به ECAP شدهاند. نتایج نشان میدهد که سایز دانه ۶۰٪ کاهش یافته که منجر به بهبود خواص مکانیکی مانند تنش تسلیم و میکروسختی شده است. با توجه به تراکم ناپذیری روغن هیدرولیک فرآیند دقیقا شبیه ECAP معمولی میباشد [۲۶]. جعفرلو و همکارانش، کابرد فرآیند ECAP را برای اتصال فلزات غیر هم جنس آلیاژ آلومینیوم لوله ای ۶۰۶۱ و میله فولاد ۱۰۱۸ و تاثیر استفاده از یک میان لایه با ضخامت Ag-Cu-Sn از جنس Ag-Cu-Sn بررسی کردند. همچنین با شبیهسازی ECAP رفتار تغییرشکل قطعه را در حین فرآیند تحلیل کردند. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش دمای بازپخت، استحکام اتصال بهبود می یابد. استفاده از یک میان لایه در هر دمای بازیختی اجازه می دهد به مقادیر استحکام برشی بالاتری رسید. بر اساس نتایج، می توان با قراردادن یک میان لایه و دمای باز پخت C °C، استحکام برشی را تا MPa افزایش داد [۲۷]. جوانرودی و همکارانش، رفتار شکلدهی لولههای مسی را به روش عددی و تجربی بررسی کردند. این بررسیها شامل تاثیر ضخامت دیواره لوله بر مقدار کرنش موثر و یکنواختی توزیع کرنش است. نمونههای لوله مسی خالص تجاری با ضخامت دیواره mm تا ۴ پاس با زاویه کانال قالب °۹۰ در مسیر C با استفاده از لاستیک پلیاورتان ECAP شده است. نتایج شبیهسازی نشان میدهد که افزایش ضخامت دیواره لوله، مقدار کرنش موثر بالاتر و یکنواختی توزیع کرنش بهتری به وجود میآورد. ضخامت دیواره لوله ۳/۵ mm حد مطلوبی برای رفتار کرنشی است. اندازه گیری میکروسختی روی لولههای بازیخت و ECAP شده بعد از ۱ و ۴ پاس به ترتیب ۳۳٪ و ۵۷٪

افزایش در مقدار سختی و همچنین ۵۰٪ و ۷۰٪ کاهش در سایز دانه را نشان میدهد [۲۸]. والدر و همکارانش، مناسب بودن تکنیک ECAP را برای نمونههای لولهای ریخته گری شده با ترکیب -Al-5Zn 1Mg در دمای اتاق با زاویه قالب °۱۵۰، با ضخامت دیواره mm و بدون فشار پشتی بررسی کردند. همچنین از ماسه به عنوان ماندرل برای پرکردن داخل لوله استفاده کردند. نمونههای لولهای در همان پاس اول شکسته شد و تحلیل شکست با استفاده از SEM برای تعیین دلیل آن روی نمونهها انجام شد. آنها معتقدند میکروترکها در لوله با ضخامت دیواره mm ۳/۵ mm به راحتی میتواند در حین شکلدهی به دلیل انرژی ذخیره شده کشسان در لوله رشد کنند، به همین دلیل لوله مورد استفاده در این فرآیند قابلیت ECAP در دمای محیط بدون استفاده از فشار پشتی را ندارد [۲۹]. والدر و همکارانش، ECAP لوله آلومینیوم خالص تجاری را تا ۳ پاس با ۴ مسیر اصلی با زاویه قالب °۱۵۰ بررسی کردند. نتایج تحلیل نیرو نشان داد که نیروی مورد نیاز فرآیند در مسیر B_C از سایر مسیرها بیشتر است. مسیر B_A بیشترین سختی و مسیر C کمترین مقدار سختی را نشان میدهد [۳۰]. قدیمی و همکارانش، ECAP لوله دوفلزی Cu-Al را به روش تجربی و عددی بررسی کردند. آنها در این فرآیند لوله مس خالص تجاری را داخل لوله آلومینیوم ۶۰۶۱ قرار دادند و از ماندرل سرب برای پرکردن داخل لوله استفاده کردند و تا ۳ پاس در مسیر C، فرآیند را ادامه دادند. قطر داخلی و خارجی لوله آلومینیوم ۱۵ و mm ۱۹ و ضخامت لوله مسی ۲ mm در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که سختی مس و آلومینیوم به ترتيب ١٥٦/٨٪ و ١٢٩٪ افزايش پيدا ميكند. خط اتصال بين ألومينيوم و مس در بعضي نقاط داراي خواص پیوند ضعیفی است و لولهها بدرستی به هم متصل نشدهاند. دما و فشار مکانیزم غالب برای متصل شدن دو فلز است. سایز دانه مس بعد از ۳ پاس از ۶۲/۵ μm در حالت آنیل به μm ۱۱/۲ و آلومینیوم از ۸۱/۳ μm به ۱۹/۱ μm کاهش و استحکام برشی بعد از ۳ پاس حدود ۲۲۷٪ افزایش یافت. نتایج شبیهسازی نشان میدهد با افزایش اصطکاک از ۰/۰۵ به ۰/۱ فاصله گوشه بین مواد و قالب کاهش پیدا می کند و به صورت کامل پر می شود. همچنین افزایش ضخامت لوله مسی نسبت به لوله آلومینیوم باعث افزایش نیروی شکلدهی میشود که نشان میدهد تغییر شکل مس به انرژی بیشتری نسبت به آلومینیوم نیاز دارد [۳۱].

۱–۱۴– ساختار پایاننامه

یکی از روشهای جدید تولید مواد با اندازه دانه نانومتری، روش تغییر شکل به کمک عبور در کانالهای همسان زاویهدار است. در این روش با اعمال کرنشهای شدید به نمونه، اندازه دانهها تا مقیاس نانومتری کاهشیافته و در مقابل خواص مکانیکی فلز بهبود چشم گیری می یابد. از آنجایی که تغییرات ابعادی ماده می تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، اکثر روشهای SPD به نحوی طراحی شدهاند که ابعاد نمونه حین فرایند تغییر نکند. نتایج تحقیقات نشان میدهد که این فرایندها، روشهای مناسبی برای تولید مستقیم مواد فلزی با ابعاد بزرگ و اندازه دانههای نانومتری هستند. با توجه به کاهش اندازه دانهها و افزایش چشم گیر استحکام نمونههای تولیدشده با روشهای مذکور، به نظر میرسد روش SPD یکی از مناسبترین روشها برای تولید مواد فلزی با اندازه دانه نانومتری در مقیاس صنعتی میباشد. ECAP لوله و به ویژه لولههای دوفلزی به عنوان فرآیندی برای تولید لولههایی با استحکام بیشتر و خواص ترکیبی بهتر میتواند پتانسیل بالایی برای پیشرفت داشته باشد. این فرآیند در ابتدای مسیر توسعه قرار دارد و نیاز به تحقیق برای بررسی پارامترهای موثر دارد. در این پایاننامه، فرآیند ECAP لوله دو فلزی مس- آلومینیوم با زاویه قالب °۹۰ انجام می شود. در این پژوهش با ایجاد تغییر شکل مومسان شدید به واسطه عبور از کانالهای همسان زاویهدار تلاش بر این داریم که یک ساختار ریزدانه با خواص مکانیکی بهتر ایجاد شود. سپس با اندازه گیری میکرو سختی نمونههای ECAP شده در هر مرحله، تغییرات ایجاد شده در سختی آنها بررسی میشود. همچنین شبیهسازی آن با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس در دمای محیط مورد بررسی قرار می گیرد. بررسی اثر فشار پشتی و دمای فرايند بر خواص مكانيكي لوله، اثر استفاده از ماندرل الاستومري و فلزي براي پركردن داخل لوله و همچنین انجام فرآیند در دمای بالا از برجستهترین نوآوریهای تجربی این پژوهش میباشد. پایاننامه پیشرو شامل پنج فصل است. در فصل اول به تعاریف اصلی نانومواد، روش تولید مواد ریزدانه و فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید پرداخته شد. سپس انواع روشهای SPD برای لوله مورد بررسی قرار گرفت و اصول فرآیند ECAP و پارامترهای موثر در آن به تفضیل بیان شد. درنهایت پژوهشهای سایر محققین پیرامون ECAP لوله مورد مطالعه قرار گرفت. در فصل دوم به منظور بررسی عوامل کنترلی فرآیند و تاثیر هر یک از این متغیرها بر روی قطعه، از شبیهسازی اجزاء محدود استفاده شد. از این رو مراحل انجام شبیهسازی در نرم افزار آباکوس، چگونگی تعریف محیطهای مختلف آن و همچنین تحلیلهای انجام شبیهسازی در نرم افزار آباکوس، چگونگی تعریف محیطهای مختلف آن و همچنین چهارم نتایج بدست آوردن خواص مکانیکی لوله و روند انجام آزمایشها بیان میشود. در فصل مای تجربی، نحوه بدست آوردن خواص مکانیکی لوله و روند انجام آزمایشها بیان میشود. در فصل مای میشود. در نومل

فصل ۲ روش تحليل المان محدود

در این فصل پس از بیان مقدمهای بر روش اجزاء محدود و نرمافزار آباکوس، مدلسازیهای انجام شده به منظور تحلیل فرآیند ECAP لوله دو فلزی به همراه فشار پشتی شرح داده میشود.

۲-۱- روش اجزاء محدود

در سالهای اخیر روش اجزاء محدود به یک ابزار بسیار قدرتمند برای شبیهسازی فرآیندهای تولید تبدیل شده است. همواره برای توسعه یک فرآیند جدید، شبیهسازی صحیح فرآیند و آزمایش پارامترهای مختلف آن در ابتدای امر بسیار موثر بوده و به این ترتیب طراحی ساختار صحیح و انتخاب پارامترهای صحیح فرآیند قبل از آزمایش عملی ممکن خواهد بود. در نتیجه زمان صرف شده و تعداد آزمایشها و سعی و خطا کاهش یافته و منتج به کاهش هزینههای تولید خواهد شد. امروزه با توسعه روزافزون قابلیتهای نرم افزارهای محاسبات مهندسی، این نرم افزارها تقریبا در تمامی شرکتهایی که محصولات صنعتی تولید مینمایند، چه پیش از ساخت محصول و چه در فرآیند توسعه آن، به منظور شبیهسازی

¹ Finite Element Method (FEM)

عملکرد محصول مورد استفاده قرار می گیرند. نرمافزار آباکوس قابلیت حل مسائل از تحلیل خطی ساده تا پیچیدهترین مدلسازی غیر خطی را دارا میباشد. همچنین به علت قابلیتهای بالا نرمافزار آباکوس در تحلیل تغییر شکل شدید فلزات نسبت به سایر نرمافزارهای اجزاء محدود، در این پژوهش از نرمافزار فوق استفاده شده است. از جمله خصوصیات بارز این نرمافزار که آن را نسبت به سایر نرمافزارهای مشابه متمایز کرده، راحتی استفاده، دقت و سرعت بالای محاسبات است. نرمافزار آباکوس شامل سه محصول اصلی است که در زیر به هرکدام اشاره می شود:

- ۱- ABAQUS/Standard یکی از حل گرهای چند منظوره آباکوس است که از روش انتگرال گیری
 غیر صریح به منظور حل گستره وسیعی از مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و
 الکترونیک استفاده می کند. در حقیقت این حل گر به منظور حل مسائل شبه استاتیکی، مسایلی
 که دارای اینرسی کم و قابل صرف نظر هستند، استفاده می شود.
- ۲- ABAQUS/Explicit این حل گر برای مدلسازی مسائل دینامیکی مانند ضربه و انفجار و حل مسائل با درجه غیر خطی بالا که میتواند در خود دارای اندر کنشهای تماسی پیچیده باشند استفاده میشود. این محصول، دستگاه معادلات حاکم را بر پایه قانون انتگرال گیری صریح به همراه استفاده از ماتریس جرم قطری المان، تحلیل میکند.
- ۳– ABAQUS/CAE: به عنوان یک رابط گرافیکی کاربری در بسته نرمافزاری آباکوس گنجانده شده است. این محصول به کاربر کمک می کند که یک مدل هندسی را سریع و به سادگی بسازد یا از یک نرمافزار مدل سازی دیگر وارد کند. همچنین از آن برای مدل سازی اجزاء مکانیکی، مجموعههای مونتاژی، شرایط مرزی، بار اعمالی و نشان دادن نتایج تحلیل المان محدود استفاده می شود.

۲-۲– شبیهسازی فرآیند ECAP لوله دو فلزی به همراه فشار پشتی

یکی از بخشهای پژوهش صورت گرفته، شبیهسازی فرآیند ECAP لوله دوفلزی به همراه فشار پشتی است. در انجام مراحل شبیهسازی سعی شده است تا مدل عددی مشابه آزمایش تجربی باشد. در زیر شرح مراحل شبیهسازی این فرآیند آمده است.

۲-۲-۱ مدلسازی اجزای فرآیند

اولین گام برای تحلیل یک مساله، ایجاد مدل هندسی مناسب میباشد. در این بخش هر یک از اجزای فرآیند ECAP لوله دو فلزی شامل کانال قالب، سنبهها، لولهها و ماندرل بهصورت سهبعدی مدلسازی شده است. در این مدلسازی، کانال قالب و سنبه فشار پشتی بهصورت پوسته^۱ و از نوع صلب گسسته^۲ شده است. در این مدل سازی، کانال قالب و سنبه فشار پشتی بهصورت پوسته^۱ و از نوع صلب گسسته^۲ انتخاب شده است. مدل لولهها و میله مسی نیز از نوع جامد^۳ و شکلپذیر^۴ میباشد. همچنین سنبه انتخاب شده است. مدل لولهها و میله مسی نیز از نوع جامد^۳ و شکلپذیر^۴ میباشد. همچنین سنبه اعمال نیروی پرس، بهصورت پوسته و صلب تحلیلی^۵ در نظر گرفته شده است. به دلیل تقارن صفحهای هندسه کانال قالب، توسته و صلب تحلیلی^۵ در نظر گرفته شده است. به دلیل تقارن صفحهای هندسه کانال قالب، تنها نیمی از کانال قالب، لولهها، ماندرل و سنبه فشار پشتی مدل شده است. ابعاد نمونه لوله مسی با قطر خارجی و طول به ترتیب mm ۲۱ و mm ۵۰ و لوله آلومینیومی با قطر خارجی و طول به ترتیب ما ۲ و سره ۱۰ و لوله آلومینیومی با قطر خارجی و طول به ترتیب ما ۲۱ و ما ۲۰ و لوله آلومینیومی با قطر خارجی و طول به ترتیب ما ۱۰ و سه ۱۰ و لوله آلومینیومی با قطر خارجی از طول به ترتیب شده است. همچنین ضخامت از لولهها ماندرل و سنبه فشار پشتی مدل شده است. ابعاد موانه لوله مسی با قطر خارجی و طول به ترتیب ما ۱۰ و ما ۱۰ و لوله آلومینیومی با قطر خارجی و طول به ترتیب آل ۱۰ می و ما ۱۰ و آل ۱۰ می و ما ۱۰ و لوله آلومینیومی با قطر خارجی و طول به ترتیب آل ۱۰ می و ما ۱۰ و لوله آلومینیومی با قطر خارجی و طول به ترتیب آل ۱۰ میبه ازی در نظر گرفته شده است. همچنین ضخامت از لولهها آله ۱۰ میباشد. شکل ۲-۱، هر یک از اجزای مدل ایجاد شده در نرمافزار آباکوس را نشان می و هد.

¹ Shell

- ³ Solid
- ⁴ Deformable
- ⁵ Analytical Rigid

² Discrete Rigid



شکل ۲-۱: هندسه اجزای مدل شده در نرمافزار آباکوس

۲-۲-۲ خصوصیات لوله و لاستیک

لوله مسی و آلومینیومی به صورت یک ماده کشسان-مومسان در نظر گرفته شده است. خصوصیات مکانیکی آنها شامل نسبت پواسون، مدول یانگ، چگالی و تنش تسلیم در جدول ۲-۱ مشاهده می شود. همچنین از منحنی تنش-کرنش مومسان حقیقی بدست آمده از آزمون کشش تک محوره مطابق با شکل ۲-۲ و شکل ۲-۳ به ترتیب برای تعیین تنش تسلیم و ناحیه مومسان لوله آلومینیومی و مسی استفاده شده است.

جدول ۲-۱: خواص مکانیکی مورد استفاده در شبیه سازی برای لوله آلومینیومی و مسی

ضريب پواسون	تنش تسليم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	چگالی (kg/m ³)	جنس لوله
۰/۳۳	۶۶/۵	٧٠	۲۷۰۰	آلومينيوم
• /٣٣	149	١١۵	٨٩٠٠	مس



شکل ۲-۳: منحنی تنش-کرنش مومسان لوله مسی

به منظور تعیین خواص مکانیکی لاستیک وایتون، رفتار هایپرالاستیک^۱ با مدل انرژی کرنشی مونی-ریولین تعریف شده است. ضرایب مورد استفاده در شبیهسازی برای لاستیک وایتن در جدول ۲-۲ نشان داده شده است.

جدول ۲-۲: خواص مکانیکی لاستیک وایتن [۳۲]

چگالی (kg/mm³)	C ₀₁ (MPa)	C ₁₀ (MPa)	D 1	سختی لاستیک (Shore-A)
۱/۸۳۳ ×۱۰ ^{-۶}	-0/FFFFV	Y/XYY11	•/•••۵١۶٧	۷۵

۲-۲-۳ مونتاژ اجزای قالب

در این بخش تمامی مدلهای هندسی که به صورت جداگانه ایجاد شدهاند، در موقعیتهای خود نسبت به یکدیگر قرار گرفته تا هندسه کلی فرآیند مطابق با آزمایشهای تجربی شکل گیرد. شکل ۲-۴ موقعیت اجزای کانال قالب، سنبههای پرس و فشار پشتی، لولهها و ماندرل را نسبت به هم نشان می دهد.



شکل ۲-۴: مونتاژ اجزای قالب و لولهها در شبیهسازی

¹ Hyperelastic

۲-۲-۴ تعیین تعداد گام و نوع حل مسئله

در این مدلسازی، تحلیلها در یک گام انجام می شود. با توجه به تغییر شکل زیاد ماده و شرایط پیچیده تماسی از حل گر صریح دینامیکی استفاده شد. زمان گام حل برابر با ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شد و برای کاهش زمان حل از مقیاس جرمی^۱ برابر ۱۰۰ استفاده شد. همچنین مطابق شکل ۲-۵ همواره دقت شد تا مقدار انرژی جنبشی تغییر شکل کمتر از ۱ تا ۵ درصد انرژی داخلی شکل دهی باشد.



شکل ۲-۵: منحنی درصد انرژی جنبشی به انرژی درونی در شبیه سازی فرایند ECAP

۲-۲-۵ تعیین نوع تماس سطوح

در این مدلسازی، اثر متقابل سطوح بر یکدیگر به صورت تماس عمومی^۲ با مدل اصطکاک پنالتی^۳ در نظر گرفته شده است. شرایط تماسی بین لوله با خود و سنبه فشار پشتی با قالب، بدون اصطکاک در نظر گرفته شد. ضرایب اصطکاک بین قالب و لوله مسی ۰/۱، بین لوله مسی و آلومینیومی ۰/۱۷ و بین لوله آلومینیومی و ماندرل نیز ۰/۱۷ و سایر ضرایب اصطکاکی ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. همچنین از قید صلب[†] برای کانال قالب استفاده شد تا در طی فرآیند دچار تغییر شکل نشود.

- ² General Contact
- ³ Penalty
- ⁴ Rigid Body

¹ Mass Scaling

۲-۲-۶ شرایط مرزی و بارگذاری

۲-۲-۷ شبکهبندی

برای شبکهبندی کانال قالب و سنبه فشار پشتی، المان از نوع ۳D۴ استفاده شده است که بیان گر المان صلب سه بعدی با تعداد چهار گره است. همچنین المان به کار رفته برای ماندرل و لولهها از نوع CTDAR میباشد که المان پیوسته، سه بعدی، هشت گرهای و با انتگرال گیری کاهش یافته است. سنبه پرس نیز به دلیل صلب تحلیلی بودن نیاز به شبکهبندی ندارد.

۲-۲-۸ آنالیز استقلال نتایج از شبکهبندی

تعداد المانها تاثیر به سزایی در حل مسائل المان محدود دارند. در این پژوهش برای تعیین تعداد المانهای بهینه، مساله با تعداد المانهای متفاوتی حل شد و نیروی فرایند در هر یک از شبیه سازی ها مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۲-۶ مشاهده شد که اگر تعداد المان ها از حدی فراتر رود تاثیر چندانی در نیروی کل فرایند نخواهد داشت و همچنین زمان تحلیل را افزایش می دهد. تعداد المان

- ¹ Encastre
- ² Reference Point
- ³ Amplitude
- ⁴ Smooth Step

۸۹۵۲ و ۱۳۴۰۲ نیروی شکل دهی بسیار متفاوتی نسبت به تعداد المان ۳۰۶۰۲ دارد. اما از تعداد المان بیشتر از ۳۰۶۰۲، نیروها به هم نزدیک می شوند و تغییرات نیرو بسیار اندک است. بنابراین افزایش تعداد المان بر درستی نتایج تأثیری ندارد و فقط حجم محاسبات افزایش می یابد. تعداد المان ۲۵۰۱۴ به دلیل درست بودن هندسه محصول و نیروی شکل دهی مناسب، به عنوان تعداد المان مناسب در این تحقیق استفاده شده است.



شکل ۲-۶: منحنی نیروی فرایند بر حسب جابجایی برای تعداد المانهای متفاوت

فصل ۳ طراحى و اجراى آزمونهاى تجربى

در این فصل آزمونهای تجربی انجام شده شامل تعیین خواص مکانیکی لولهها، روش آزمایش، ماشینآلات و تجهیزات مورد استفاده از جمله قالب، پرس، دستگاه آزمون کشش، دستگاه سختیسنج میکروسختی و نحوه عملکرد آنها معرفی میشود. در نهایت آزمایشهای تجربی تعیین شده برای تولید نمونه ECAP شده و آماده سازی نمونهها بیان شده است.

۳–۱– مواد اوليه

برای انجام فرآیند ECAP، لولههای بدون درز از جنس آلومینیوم و مس خالص تجاری با ضخامت mm ۱ و با قطر خارجی به ترتیب ۱۰ و ۲۳ ۱۲، به طول ۳۳ ۵۰ در نظر گرفته شد. همچنین از لاستیک-هایی از جنس وایتن^۱ با سختی V۵ Shore-A و میله مسی با قطر ۳m ۸ به عنوان ماندرل استفاده شد. در فرآیند ECAP لوله، برای جلوگیری از مچاله شدن و از بین رفتن ابعاد هندسی آن نیازمند استفاده از ماندرل هستیم. لاستیکها بهدلیل خواص مکانیکی مطلوب و امکان جداسازی راحت از سطح داخلی نمونهها پس از فرآیند ECAP همواره مورد توجه محققان بودهاند. لاستیک وایتن برای اولین بار در این

[\] Viton

خواص وایتنها می توان به موارد زیر اشاره کرد [۳۳]:

- مقاومت دمایی بالا
- مقاومت شیمیایی بالا در برابر روغنها، سوخت، روانکارها و بیشتر اسیدهای معدنی
 - نفوذپذیری بسیار کم به طیف گستردهای از مواد
- مقاومت در برابر هیدروکربنهای آروماتیک که دیگر لاستیکها را در خود حل میکنند
 - مقاومت نسبت به سوختن نسبت به دیگر لاستیکها
 - مقاومت نسبت به خوردگی و سایش

۲-۲- تعیین خواص مکانیکی لوله

به منظور تعیین خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در این پژوهش، آزمون کشش بر روی لوله مسی و آلومینیومی انجام شد که در ادامه به آن پرداخته میشود

۳-۲-۱ آزمون کشش لوله

آزمون کشش تک محوری مهمترین آزمون تعیین خواص مواد برای اهداف تحلیلی و دقیق است. این آزمون به خوبی تنش تسلیم، کار سختی، استحکام کششی نهایی و چقرمگی را معین می کند. به عبارتی آزمون کشش پارامترهای مهم برای پیشبینی رفتار شکل دهی را در اختیار قرار می دهد. آزمون کشش روی یک میله، صفحه و یا نواری از ماده که دارای یک ناحیه با کاهش سطح مقطع (قسمت گیج) است، انجام می شود. ناحیه کاهش یافته سطح مقطع سبب می شود که کل تغییر شکل مومسان در قسمت گیج اتفاق افتد و انتهای بدون کاهش سطح مقطع در فک دستگاه مهار می شود. برای تعیین خواص مکانیکی، آزمون کشش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM A370 بر روی

برای تعیین خواص مکانیکی، ازمون کشش تک محوری مطابق با استاندارد ASIM AS70 بر روی نمونههای لوله مسی و آلومینیومی انجام شد. برای اطمینان از صحت نتایج، سه نمونه آزمون کشش از هر جنس آماده گردید که هر سه نمونه تا نقطه شکست بارگذاری شد. نمونههای استاندارد آزمون کشش و همچنین مشخصات ابعادی آن در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. این آزمون به کمک دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ انجام شد. مطابق شکل ۳-۲، این دستگاه دارای دو فک بوده که به فک بالایی آن نیروسنج^۱ متصل است. مکانیزم گرفتن نمونه در یکی از فکها به صورت مکانیکی و در فک دیگر به صورت هیدرولیکی است. پس از بستن نمونه با دور شدن فکها از یکدیگر نمونه کاملاً محکم می شود. در نهایت آزمون کشش در نهایت آزمون کشش می از مون به کمک دستگاه در نهایت آزمون که به فک بالایی آن در شکل ۳-۲، این دستگاه دارای دو فک بوده که به فک بالایی آن در وستترون ۲۰۸۸ انجام شد. مطابق شکل ۳-۲، این دستگاه دارای دو فک بوده که به فک بالایی آن در وستتروسنج^۱ متصل است. مکانیزم گرفتن نمونه در یکی از فکها به صورت مکانیکی و در فک دیگر به صورت هیدرولیکی است. پس از بستن نمونه با دور شدن فکها از یکدیگر نمونه کاملاً محکم می شود. در نهایت آزمون کشش با نرخ کرنش ¹⁻¹



شکل ۳-۱: ابعاد نمونههای تست کشش لوله بر اساس استاندارد ASTM A307 (ابعاد میلیمتری)



شکل ۳-۲: دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ به همراه سیستم کنترل رایانهای

¹ Loud cell

۳–۳– آمادهسازی نمونهها



شکل ۳-۳: لوله دوفلزی با ماندرلهای میله مسی و لاستیک وایتن

ECAP قالب -۴-۳

به منظور انجام پرسکاری در کانالهای همسان زاویه دار احتیاج به قالبی برای انجام فرایند است، که هم بتواند تنشهای اعمالی در حین اجرای عملیات را تحمل نماید و هم از مقاومت بالایی در برابر سایش برخوردار باشد تا پس از چندین مرحله شکل دهی مداوم مستهلک نشود. به منظور اجرای آزمون -های تجربی، تمامی قسمت های قالب به جز حلقه فشاری طراحی و ساخته شده است. در این طراحی سهولت کار با قالب، قابلیت تعویض راهگاه های عمودی و افقی قالب، گیر نکردن قطعه و سنبه، مونتاژ شدن دقیق و آسان در کنار توجه به استحکام مکانیکی اجزا آن لحاظ شده است. تصویر و طرحواره قالب طراحی شده در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شكل ٣-۴: الف) طرحواره قالب، ب) قالب طراحي شده

در قالب طراحی شده، حلقه فشاری و نیمه پایینی قالب از جنس Mo40 بوده و هسته عمودی و افقی قالب از جنس فولاد گرمکار H13 میباشد که هسته عمودی شامل راهگاه عمودی و هسته افقی شامل دو کفه استوانهای شکل میباشد که کفه بالایی شامل قسمتی از راهگاه عمودی و نیمی از راهگاه افقی و کفه پایینی شامل نیمه دیگر راهگاه افقی است. کلیه قطعات قالب سختکاری شده سپس برای رعایت توازی، سطوح هسته افقی شامل کفه استوانهای بالا و پایین و سطح پایین هسته عمودی سنگزنی شد همچنین راهگاه عمودی و افقی قالب برای رسیدن به دقت ابعادی مورد نیاز و صافی سطح بالا مورد سنگزنی قرار گرفت. هسته عمودی قالب برای رسیدن به دقت ابعادی مورد نیاز و صافی سطح بالا مورد موقعیت دهی شده سپس بوسیله جوش برنج در محل خود ثابت میشود. برای استفاده از سیستم فشار سنگرنی و یکپارچه کردن قالب و جک هیدرولیک یک پلیت L شکل به عنوان فیکسچر از جنس CK45 ساخته شده است که در شکل ۳-۵ دیده میشود. انتقال نیروی پرس و فشار جک هیدرولیک به وسیله سنجهایی از جنس SHC به نمونه اعمال میشود. برای جلوگیری از انتقال حرارت بین قالب و فیکسچر از صفحهای با جنس میکا استفاده می شود. همچنین برای اتصال اجزای قالب، فیکسچر و صفحه میکا از ۳ عدد پیچ M 18 گرید ۱۲/۹ به طول ۲۵ ۱۵ استفاده شده است. برای موقعیت دهی راهگاه های عمودی و افقی قالب نسبت به هم و همراستایی راهگاه افقی قالب نسبت به جک هیدرولیک، سنبه های پرس و فشار پشتی درون راهگاه ها قرار داده شده تا اجزا قالب نسبت به هم مقید شوند سپس پیچهای قالب را محکم کرده تا موقعیت قالب نسبت به فیکسچر و جک هیدرولیک ثابت شود. شکل ۳-۶ اجزا مختلف قالب را نشان می دهد.



شکل ۳-۵: فیکسچر قالب و جک هیدرولیک



شکل ۳-۶: اجزا مختلف قالب الف) نیمه پایینی، ب) هسته افقی (کفه استوانهای بالا)، ج) هسته افقی (کفه استوانهای پایین)،

د) حلقه فشاری، ه) هسته عمودی، و) سنبههای اعمال نیرو و فشار، ز) پیچهای M18

۳-۵- اجرای آزمون تجربی

برای اعمال نیروی یکنواخت شکل دهی در فرایند ECAP از پرسهای هیدرولیک با قابلیت تنظیم سرعت رم، به منظور تغییر در نرخ کرنش اعمالی استفاده می شود. برای تأمین نیروی مورد نیاز فرایند از یک دستگاه پرس هیدرولیک ژاو آریا^۱ با ظرفیت اسمی ۱۵۰ تن که در آن چهار میل راهنما مطابق شکل ۲-۳ به منظور هم راستایی فک بالا و پایین به کاربرده شده است استفاده شد.



شکل ۳-۷: پرس هیدرولیک ۱۵۰ تن ژاو آریا

همچنین برای ایجاد فشار پشتی لازم از یک منبع تامین قدرت هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰ بار استفاده شده است. فشار ایجاد شده توسط منبع قدرت با توزیع روغن از طریق یک سیستم هیدرولیکی به جک ۱۰ تن ارسال میشود و جک با به حرکت درآوردن سنبه، فشار پشتی مورد نیاز فرآیند را فراهم میسازد. شکل ۳-۸ منبع تامین قدرت هیدرولیکی به کار گرفته شده را نشان میدهد.

¹ Jav Aria



شکل ۳-۸: منبع تامین قدرت هیدرولیکی

نحوه اجرای فرآیند ECAP به این صورت است که ابتدا جک هیدرولیک روی فیکسچر بسته شده و روی پرس قرار داده میشود. صفحه میکا و قالب به ترتیب روی فیکسچر قرار داده شده و راهگاههای عمودی و افقی قالب با استفاده از سنبههای پرس و فشار برگشتی موقعیتدهی میشوند. سپس پیچهای قالب را سفت کرده تا موقعیت فیکسچر، صفحه میکا، قالب و جک هیدرولیک نسبت به هم ثابت شود. با حرکت سینه پرس به سمت بالا، سنبه را به سنبهگیر نزدیک کرده و پس از در یک امتداد قرار گرفتن سنبه و کانال عمودی، سنبهگیر را سفت میکنیم. سپس با استفاده از ۳ روبند در جهات مختلف موقعیت فیکسچر را نسبت به میز پرس مقید میکنیم.

برای افزایش دمای فرایند از شش المان حرارتی که داخل حلقه فشاری جا زده می شوند، استفاده شد. با روشن شدن مدار کنترلی المانهای حرارتی، پس از گذشت چند دقیقه، قالب به دمای مورد نظر می رسد. برای جلوگیری از افزایش یا کاهش بیش از حد دما از یک ترموکوپل که به مدار کنترل متصل شده و در هر لحظه دمای قالب را اندازه گیری می کند استفاده شد. در صورت کم بودن دما با روشن شدن المانها، دما افزایش یافته و در صورت زیاد بودن، با خاموش شدن آنها دما ثابت نگه داشته می شود. برای جلوگیری از انتقال حرارت بین قالب و فیکسچر از صفحه ای با جنس میکا استفاده شد. مدار کنترل دما و المانهای حرارتی داخل حلقه فشاری در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.


شکل ۳-۹: الف) مدار کنترل دما، ب) المانهای حرارتی داخل حلقه فشاری

با رسیدن قالب به دمای مورد نظر، لولههای دو فلزی با ماندرلهای لاستیک وایتن و میله مسی آماده قرارگیری در قالب میشوند. در این مرحله پس از آغشته کردن سر نمونهها به گریس مولی اسلیپ^۱ که به منظور کاهش اصطکاک در دمای بالا طراحی شده است، آنها را در کانال ورودی قالب قرار میدهیم، مدت زمان ۲۰ دقیقه برای همدمایی نمونه با قالب در نظر گرفته شده است. شکل ۳-۱۰، گریس مورد استفاده در فرایند را نشان میدهد.



شکل ۳-۱۰: گریس مورد استفاده در فرآیند

در این فرایند سرعت رم پرس ۱۳۳/۶ سرده و این نرخ در تمام فرایند ثابت میباشد. با قرار دادن نمونه داخل راهگاه عمودی، سنبه فشار پشتی نیز در راهگاه افقی بدون اعمال فشار پشتی قرار داده می شود. با شروع فرایند و اعمال نیرو از طرف سنبه پرس، نمونه به سمت پایین حرکت کرده و به محض تناژ گرفتن پرس (وارد شدن نمونه به ناحیه تغییر شکل و راهگاه افقی)، فشار مورد نظر با استفاده از جک هیدرولیک و از طریق سنبه فشار پشتی به نمونه اعمال می شود. در این حالت نمونه با اعمال نیرو از طرف سنبه پرس و سنبه فشار پشتی در طول مسیر فرایند، تغییر شکل مییابد. پس از قرار گرفتن کامل نمونه در راهگاه افقی، اعمال نیرو پرس و جک هیدرولیک از روی نمونه برداشته شده و فرایند پایان مییابد. سنبهها از راهگاههای قالب خارج شده و مدار کنترلی دما خاموش میشود. پس از سرد شدن قالب، پیچهای قالب را باز کرده و با برداشتن حلقه فشاری و هسته افقی، نمونه از داخل راهگاه افقی قالب خارج می شود. در این مرحله نمونه شسته شده و از نظر ایجاد ترک و عیوب ظاهری بررسی می شود. به دلیل ضخامت کم لوله ها، کیفیت سطح کانال های قالب از اهمیت بالایی در موفقیت آمیز بودن فرایند برخوردار هستند زیرا هیچ گونه فرایند روتراشی و سنباده زنی در صورت ایجاد کوچکترین ترک یا خشهای ساده روی نمونه قابل انجام نبوده و با کوچکترین عیب در سطح نمونه، تست ناموفق گزارش شده و قابلیت ECAP برای پاس بعدی را از دست میدهد. به همین دلیل پس از پایان هر پاس از فرایند، راهگاههای عمودی و افقی قالب کاملا تمیز و پولیش شده تا هرگونه عیوب ناشی از ماسیدن یا پوسته شدن فلز درون کانال و ایجاد خشهای احتمالی از بین رود و کیفیت سطح کانالها در وضعیت مطلوب و بالایی قرار گیرد. پس از هر پاس، قالب دوباره سوار شده و تمامی مراحل موقعیتدهی قالب، فیکسچر، صفحه میکا، جک هیدرولیک و سنبهها مجددا انجام می شود، پیچها سفت شده و با بستن روبند قالب اماده تست می شود. برای پاس بعدی نمونه آغشته به گریس شده و با چرخش ۹۰ درجهای در امتداد محور طولی دوباره برای مرحله دوم وارد قالب می شود. روند عبور نمونه از داخل قالب تا ۳ مرحله تحت مسير Bc كه بهترين مسير از نظر افزايش خواص مكانيكي است ادامه مي يابد. شكل ۳-۱۱ موقعیت مجموعه قالب، فیکسچر و جک هیدرولیک را نشان میدهد.



شکل ۳-۱۱: موقعیت مجموعه قالب، فیکسچر و جک هیدرولیک

به منظور دستیافتن به نمونهای سالم و بررسی پارامترهای تاثیر گذار بر قطعه نهایی، آزمایشهایی تحت شرایط مختلف بر روی لولههای دوفلزی طراحی و اجرا شد. جدول ۳-۱ شرایط آزمایشهای تجربی انجام شده را نشان میدهد. طول نمونهها برابر ۵۰ mm میباشد.

تعداد پاس	نوع ماندرل	فشار پشتی (MPa)	دمای فرآیند (C°)	شماره آزمون
١	لاستيک	۵۰	۲.	١
١	لاستيک	۱۰۰	۲.	٢
١	میله مسی	۵۰	۲.	٣
١	میله مسی	۱۰۰	۲.	۴
١	لاستيک	۱۰۰)	۵
١	لاستيک	۲۰۰	1	۶
١	لاستيک	۲۵۰	1	Y
١	لاستيک	۴۰۰	1	٨
١	میله مسی	۵۰	1	٩
١	میله مسی) • •)••	١.
١	میله مسی	۴۰۰)••	١١
١	لاستيک) • •	10.	١٢
١	لاستيک	۲۰۰	10.	١٣
١	میله مسی	۵۰	10.	14
٢	میله مسی	۱۰۰	10.	۱۵
٣	میله مسی	۵۰	۲۰۰	18
٣	میله مسی	۱۰۰	۲۰۰	١٢
١	میله مسی	۲۰۰	۲۰۰	۱۸
٣	میله مسی	۵۰	۲۵۰	١٩
٣	میله مسی	۱۰۰	۲۵۰	۲.
١	میله مسی	۲۰۰	۲۵۰	۲ ۱

جدول ۳-۱: آزمایشهای تجربی طراحی شده برای فرآیند ECAP لوله دوفلزی

۳-۶- آمادهسازی نمونههای سختیسنجی

برای اندازه گیری میکروسختی نمونه ها باید سطح آن ها کاملاً صاف، صیقلی و شبه آینه ای باشد، که این موارد به وسیله پولیش انجام می شود. نمونه ها به طول mm ۱۰ از قسمت میانه لوله های ECAP شده به وسیله اره دستی بریده شده است. در این آزمایش به منظور همگنی فشار دست بر سطح پولیش و امکان سختی سنجی لبه نمونه ها و عدم آسیب به دستگاه و خطرات احتمالی و بالا بردن دقت تست با ثابت نمودن لوله در زیر میکروسکوپ، نمونه ها مانت سرد شده است به این صورت که نمونه را داخل یک قالب پلاستیکی که به وسیله گریس چرب شده بود قرار داده و ماده مانت (نسبت ۱ به ۲ از سخت کننده و رزین) را روی نمونه ریخته، پس از ۱۰–۱۲ ساعت نمونه مانت شد. پس از ثابت کردن نمونه ها با مانت سرد، عملیات پولیش آنها به وسیله دستگاه پولیش نشان داده شده در شکل ۳–۱۲، آغاز شد، به این صورت که به وسیله سنباده های ۱۰۰، ۲۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ سطح نمونه ها کاملاپرداخت شد. برای بدست آوردن کیفیت سطح مطلوب، در حین مراحل سنباده زنی، سطح نمونه و سنباده ها به وسیله جریان آب از ذرات جداشده تمیز می شد.



شکل ۳-۱۲: دستگاه پولیش متکو

۳-۷- اندازهگیری سختی

برای اندازه گیری سختی از دستگاه میکرو سختی سنج باریز ^۱ مدل D-89610 استفاده شد. اساس کار این دستگاه به این صورت است که به وسیله یک فرورونده که از نوع هرم مربع القاعده با زاویه رأس [°]۱۳۶ است بار Kg ۱ در مدت زمان ۱۰ ثانیه به سطح نمونه اعمال می شود، پس از پایان اعمال نیرو، به وسیله

¹ Bareiss D-89610

میکروسکوپ دستگاه، محل اثر اعمال نیرو که از بالا به شکل مربعی است اندازه گیری شده و بر مبنای آن سختی ویکرز نمونهها به دست میآید. شکل ۳-۱۳، دستگاه میکروسختیسنج را نشان میدهد.



شکل ۳-۱۳: دستگاه اندازه گیری میکروسختی

سختی نمونهها برای هر لوله در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست و در هر جهت، ۳ نقطه در راستای شعاعی اندازه گیری شده است که در مجموع ۱۲ نقطه سختی برای هر لوله و ۲۴ نقطه سختی برای هر نمونه لوله دوفلزی در نظر گرفته شده است. شکل ۳-۱۴ طرحواره نقاط اندازه گیری شده سختی برای هر نمونه لوله دوفلزی با ماندرل میله مسی را نشان میدهد.



شکل ۳-۱۴: طرحواره اندازه گیری سختی لوله دوفلزی

۳-۸- آمادهسازی نمونههای متالوگرافی

معمولاً در نمونه متالوگرافی ساختار دانهها پس از پایان عملیات پرداخت نهایی در زیر میکروسکوپ مشخص نیست. ضخامت مرزدانههای یک فلز در بهترین حالت در حد ضخامت چند اتم است درحالی که توان آشکار سازی یک میکروسکوپ بسیار کمتر از حد لازم برای تشخیص آنهاست. تنها در فلزی که بلورهایی با رنگهای مختلف در تماس با یکدیگر باشند، قابل رویت ساختن مرز دانهها امکان پذیر است. لذا نمونههای متالوگرافی اچ می شوند که این عملیات با فروبردن سطح نمونه پولیش شده در یک محلول اچ ضعیف اسیدی یا قلیایی انجام میشود. برای نمونههای مس و آلومینیوم اچهای مختلفی به صورت جداگانه معرفی شده است، ولی با توجه به ساختار دوفلزی بودن نمونههای نهایی و بهبود و تسریع در روند کار نیاز به پنجرهای مشترک برای اچ میباشد. از این رو با مطالعه تحقیقات صورت گرفته روی متالوگرافی فلزات دو فازی، محلول اچ مشتر کی برای آلومینیوم و مس که محتوی (5 ml H₂O₂ + 50 5 ml NH4OH) میباشد انتخاب شد [۳۵, ۳۴]. عمل اچ را میتوان توسط مالش ملایم یک تکه پنبه آغشته به محلول اچ بر روی سطح نمونه انجام داد یا نمونه را درون محلول اچ غوطهور ساخت، به هر حال در نتیجه این عمل مقداری از سطح فلز حل می شود و از سطح خارج می شود. چنانچه فرآیند اچ کردن بهدرستی انجام شود، سطح فلز به صورت یکنواخت حل نمی شود پس از اچ کردن، مرزها به صورت پلههایی کم عمق در سطح ظاهر می شوند جدارههای عمودی این پلهها نور را همانند سطوح بلوری نسبتاً صاف به عدسیهای میکروسکوپ منعکس نمیکنند و در نتیجه محل مرزدانهها در زیر ميكروسكوپ قابل رويت مي شود. بررسي ساختار نمونهها به وسيله ميكروسكوپ شكل ٣-١٣ با بزرگ-نمایی ۱۰۰ برابر انجام شد.

فصل ۴ نتایج و بحث

در این فصل، نخست نتایج حاصل از آزمون کشش تک محوری مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین نتایج حاصل از طراحی آزمایش های انجام شده و تاثیر هر یک از عوامل فرایند مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. در پایان مدل شبیه سازی با نمونه های ECAP شده مقایسه می شود.

۴-۱- آزمون کشش تکمحوری

اطلاعات خروجی از آزمون کشش تکمحوری با استفاده از دستگاه اینسترون شامل نیرو و جابجایی فکها میباشد که با تقسیم نیرو بر سطح مقطع و تعیین کرنش محدوده گیج، منحنی تنش-کرنش مهندسی محاسبه میشود. سپس با استفاده از روابط ۴-۱ و ۴-۲ منحنی تنش-کرنش حقیقی بهدست آمد که در شکل ۴-۱ و شکل ۴-۲ نشان داده شده است. شکل ۴-۵ نمونهها را پس از انجام آزمون کشش نشان میدهد که ناحیه گلویی شدن در داخل ناحیه گیج میباشد.

$$\sigma = S(1+e) \tag{1-4}$$

$$\varepsilon = \ln(1+e) \tag{7-4}$$

و au و au به ترتیب تنش و کرنش حقیقی، S و e به ترتیب تنش و کرنش مهندسی میباشد. σ



شكل ۴-۱: منحنى تنش-كرنش حقيقى آلومينيوم



شکل ۴-۲: منحنی تنش-کرنش حقیقی مس



شکل ۴-۳ و شکل ۴-۴ منحنی نیرو-جابجایی را در آزمون تجربی و تحلیل اجزای محدود برای لوله آلومینیوم و مسی نشان میدهد.

شکل ۴-۳: منحنی نیرو- جابجایی در آزمون کشش لوله آلومینیوم



شکل ۴-۴: منحنی نیرو- جابجایی در آزمون کشش لوله مسی

	7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 /18
	and the second sec
A2 1	آلومیٹیوم

شکل ۴-۵: نمونه های لوله مسی و آلومینیومی پس از آزمون کشش

برای تمامی نمونههای آزمون کشش، تنش تسلیم مطابق با کرنش ۰۰/۰۰۲۵، تنش نهایی، درصد ازیاد طول و همچنین K و n ثوابت معادله توانی $\overline{\sigma} = k \overline{\varepsilon}^n$ محاسبه شد که در جدول ۴-۱ ارائه شده است.

نمای کارسختی n	ضریب کارسختی k (MPa)	ازدیاد طول (٪)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	جنس لوله
•/۲۸۷	TV•/•T	۲۳	١۶١/۵	۶۶/۵	آلومينيوم
•/۴۲٨	F• N/FY	۳۵	۳۲۵	149	مس

جدول ۴-۱: خواص مکانیکی لوله آلومینیومی و مسی

۴-۲- نتایج تجربی

پس از آماده سازی قالب، نمونهها و تجهیزات مورد نیاز، آزمونهای تجربی مطابق با جدول ۳-۱ انجام شد. در بین این آزمونها، نمونههایی دچار شکست و پارگی شدند. در شکل ۴-۶ آزمونهای انجام شده در دمای محیط در دو نمای بالا و پایین نشان داده شده است. در آزمونهای تجربی شماره ۱ و ۲ به ترتیب از فشار پشتی ۵۰ و ۱۰۰ MPa به همراه ماندرل لاستیک وایتن استفاده شده است. تناژ تا ۱۵ و ۱۹ تن افزایش پیدا کرده است که محدوده بالایی از نیروی مورد نیاز را نشان میدهد. به دلیل کافی نبودن فشار پشتی، لاستیک در حین فرایند از داخل لوله آلومینیوم خارج شده و باعث از دست رفتن قطر و ضخامت اوليه لولهها مي شود. اين مسئله مي تواند باعث كاهش قطر بيروني لوله آلومينيوم و خارج شدن آن از لوله مسی شود. به دلیل دمای پایین فرایند و خارج شدن ماندرل لاستیک از درون لولهها، عیوبی شامل مچالگی و ایجاد ترک در سطوح لولهها قابل مشاهده است که با افزایش فشار پشتی در آزمون شماره ۲ این عیوب کاهش پیدا کرده است. در آزمونهای شماره ۳ و ۴ از ماندرل میله مسی و فشار پشتی ۵۰ و MPa و ۱۰۰ به ترتیب استفاده شده است. در هر دو فرایند فشار پشتی مانع خروج ماندرل میله مسی از درون لولهها شده است و با افزایش آن پارگی ناحیه زیر لوله کاهش یافته است که نشان دهنده نقش کنترلی فشار پشتی در حین فرایند و بهبود قابل توجه سطوح نمونهها میباشد. در سطوح نمونه مچالگی و ترک دیده نشده اما با توجه به تغییر شکل شدید لولهها در حین فرایند ECAP و ضخامت کم آنها، لوله مسی از قسمت پایین دچار پارگی شده که نیاز به دمای بالاتر برای افزایش حد شکلپذیری را نشان میدهد.



شکل ۴-۶: نمونههای خروجی از قالب پس از یک مرحله ECAP در دمای محیط با فشار پشتی ۵۰ MPa (۱ و ۲) ۱۰۰ MPa با ماندرل لاستیک وایتن، ۳) ۵۰ MPa و ۴) ۱۰۰ MPa با ماندرل میله مسی

در آزمونهای ۴-۱ نیاز به افزایش دما برای موفقیت آمیز بودن فرایند احساس شد و با توجه به ضخامت کم لولهها انجام فرایند در دمای محیط امکان پذیر نمی باشد. به همین دلیل دمای انجام فرایند را افزایش داده و مجددا مطابق جدول ۳-۱ آزمونهای تجربی را انجام میدهیم. شکل ۴-۷ آزمونهای تجربی را در دمای C °۲۰ با ماندرل لاستیک وایتن در دو نمای بالا و پایین نشان میدهد. در آزمون شماره ۵ از فشار پشتی MPa بهره برده شده است. برای جلوگیری از خروج لاستیک از درون لوله از میلگرد ألومينيوم براي مسدود كردن مسير لاستيك استفاده شده است ولي همچنان ناحيه پايين لوله مسي دچار پارگی شده و ماندرل لاستیک از درون لولهها خارج میشود. در آزمون شماره ۶، فشار پشتی را به میزان MPa افزایش داده ولی همچنان انتهای لوله دچار پارگی شده و ماندرل لاستیک از درون لولهها خارج شده که باعث از دست رفتن دقت ابعادی لولهها و ایجاد عیوب سطحی می شود. در آزمون شماره ۷، فشار پشتی ۲۵۰ MPa را به نمونه اعمال شده است. پارگی در انتهای لوله و خارج شدن لاستیک در این آزمون نیز مشهود است. در آزمون شماره ۸، فشار پشتی را تا میزان ۴۰۰ MPa افزایش داده، همچنین از یک میلگرد آلومینیوم به طول ۲۰ mm درون لوله مسی استفاده شده است تا مانع خروج لاستیک از انتهای نمونه شود. در فشار پشتی ۴۰۰ MPa، قسمت پایین لوله مسی و آلومینیومی دچار نازک شدگی و پارگی شده است و جریان فلز به سمت ابتدای لوله هدایت شده که باعث افزایش ضخامت لوله مسى شده و ابعاد اوليه لولهها كاملا از بين رفته است كه نشان دهنده فشار پشتى بسيار بالا و بیش از حد مورد نیاز میباشد. شکل ۴-۸ آزمونهای تجربی را در دمای C °۲۰۰ با ماندرل میله مسی در دو نمای بالا و پایین نشان میدهد. در آزمون شماره ۹، فشار پشتی ۵۰ MPa مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که دیده می شود کافی نبودن فشار پشتی یا پایین بودن دمای انجام فرایند. باعث ایجاد نازک شدگی و پارگی در قسمت پایین لوله مسی شده است. در آزمون شماره ۱۰ با افزایش فشار پشتی به میزان MPa، پارگی قسمت پایین لوله مسی به میزان قابل توجهی کاهش یافته و ابعاد هندسی لولهها حفظ شده است ولی پارگی در قسمت انتهای لوله دیده می شود که باعث ناموفق بودن فرایند در پاسهای بعد می شود. در آزمون شماره ۱۱، فشار پشتی به مقدار بیشینه ۲۰۰ MPa افزایش داده شده است. همانطور که مشخص است افزایش فشار پشتی باعث پارگی و نازکشدگی گسترده در قسمت پایین لوله و انباشته شدن جریان فلز در قسمت ابتدای لوله مسی شده است که باعث از بین رفتن سطوح، قطر داخلی و ضخامت لولهها شده است.

۶٨



شکل ۴-۷: نمونههای خروجی از قالب پس از یک مرحله ECAP در دمای ۲۰۰° با فشار پشتی ۵) ۲۵۰ MPa (۶ ،۲۰۰ MPa (۶ ،۲۰۰ MPa و ۸) ۴۰۰ MPa و ۱۰۰ MPa با استفاده از ماندرل لاستیک وایتن



شکل ۴-۸: نمونههای خروجی از قالب پس از یک مرحله ECAP در دمای ℃۲۰۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa (۱۰ ،۵۰ MPa (۹ و ۱۱) ۴۰۰ MPa با استفاده از ماندرل میله مسی

برای رفع مشکلات به وجود آمده در مسیر ECAP نمونه ها، مطابق جدول ۳-۱ آزمون های تجربی را در دمای C°۱۵۰ ادامه می دهیم. در این دما نیز همچنان از دو ماندرل لاستیک وایتن و میله مسی برای حفظ دقت ابعادی لوله ها و جلوگیری از لهیدگی سطوح داخلی استفاده می کنیم. شکل ۴-۹ آزمون های تجربی را در دمای C°۱۵۰ در دو نمای بالا و پایین نمونه ها نشان می دهد.



شکل ۴-۹: نمونههای خروجی از قالب پس از یک مرحله ECAP در دمای ℃۱۵۰ با فشار پشتی MPa (۱۲ و ۱۵۰ MPa (۱۳ با ماندرل میله مسی ۱۰ MPa (۱۲ و ۱۳) ۱۰۰ MPa با ماندرل میله مسی

در آزمون شماره ۱۲، فشار پشتی MPa به نمونه اعمال می شود. لاستیک به علت کافی نبودن فشار پشتی از درون لوله خارج شده و لوله مسی و آلومینیومی از قسمت پایین دچار پارگی شدهاند. همچنین قسمتی از لوله آلومینیوم به همراه لاستیک از درون لوله مسی خارج شده که نشان میدهد ضریب اصطکاک بالایی بین لولهها برقرار نیست و در حین تغییر شکل شدید، در صورت کافی نبودن فشار پشتی با فشار لاستیک، لایههای لوله از هم جدا می شوند. در آزمون شماره ۱۳ میزان فشار پشتی را به ۲۰۰ MPa افزایش داده تا شرایط بهتری را برای انجام فرایند مهیا کنیم. همانطور که در شکل شکل ۴-۹ از نمای بالا مشاهده می شود، سطح بیرونی لوله مسی به نظر مطلوب و دارای عیوب کمی می باشد اما به دلیل ازدیاد طول بالا لاستیک و خارج شدن قسمتی از آن در حین فرایند از درون لوله و عدم موفقیت فشار پشتی در مقید کردن لاستیک به عنوان ماندرل درون لولهها، دقت ابعادی ضخامت و قطر داخلی لولهها کاملا از بین رفته است و با توجه به محدودیت دمایی کارکرد لاستیک و ازدیاد طول بالا آن در حین تغییر شکل شدید داخل کانال و عدم تاثیر جوش دادن انتهای لوله، قرار دادن میلگرد و استفاده از فشار پشتی در مقید کردن و حفظ ماندرل و ابعاد آن داخل لوله و با توجه به نتایج آزمونهای تجربی، انجام فرایند ECAP لوله با ماندرل لاستیک وایتن امکان پذیر نبوده و در ادامه آزمونهای تجربی فقط از ماندرل میله مسی استفاده می شود. در آزمون شماره ۱۴، از فشار پشتی MPa ۵۰ و ماندرل میله مسی استفاده شده است. در این آزمون میزان پارگی پایین لوله بسیار کاهش یافته و سطح نمونه عاری از عیوب میباشد. به منظور بهبود شرایط در آزمون شماره ۱۵، برای کاهش سطح پارگی در قسمت پایین لوله، فشار پشتی را به میزان ۱۰۰ MPa افزایش میدهیم. با افزایش فشار پشتی، میزان گشودگی انتهای لوله کاملا کنترل شده و در حد بسیار مطلوبی میباشد. همچنین نمونه دارای کیفیت سطح بالا و عاری از عیوب برای انجام پاس بعدی می باشد. شکل ۴-۱۰ پاس دوم فرایند ECAP را در دو نمای بالا و پایین، روی نمونه آزمون ۱۵ با شرایط دمایی C °C و فشار پشتی MPa با ا استفاده از ماندرل میله مسی به روش Bc نشان میدهد. همانطور که دیده می شود قسمت پایین لوله مسی دچار نازک شدگی و پارگی شده است. با توجه به میزان فشار پشتی مناسب و کنترل انتهای

فرایند، به نظر میرسد با وجود موفقیت آمیز بودن پاس اول در پاسهای بعد دمای مورد استفاده کافی نبوده و همچنان حد شکل پذیری لوله نسبت به میزان مورد نیاز برای انجام پاسهای بعد کافی نمی باشد.

نمای بالا نمای پایین 1 2 3 4 5

شکل ۴-۱۰: نمونه خروجی از قالب پس از دو مرحله ECAP در دمای ℃۱۵۰ و فشار پشتی MPa به روش Bc با استفاده از ماندرل میله مسی

با توجه به آزمونهای انجام شده نیاز به افزایش دما برای بهبود روند فرایند و امکان انجام آن در پاسهای بالاتر احساس میشود به همین منظور مطابق جدول ۳-۱ آزمونهای تجربی را در دمای C[°]۲۰۰ انجام می دهیم. شکل ۴-۱۱، آزمونهای تجربی را در دمای C[°]۲۰۰ با فشار پشتی MPa در ۳ پاس به روش B با استفاده از ماندرل میله مسی در سه نمای بالا، جانب و پایین نمونه نشان می دهد. همانطور که دیده میشود نمونه خروجی پس از یک مرحله ECAP کاملا سالم بوده همچنین میزان گشودگی در قسمت پایین نمونه مطلوب است که امکان انجام فرایند را در پاسهای بعد فراهم می کند. برای انجام مرحله دوم PCAP با توجه به اینکه برای قسمت زانویی کانال افقی قالب امکان سنگزنی برای بالا بردن کیفیت سطح آن وجود نداشت ابتدا این قسمت با استفاده از فرز CNC تراشیده شد و سپس عملیات پولیش زنی، تا از بین بردن عیوب سطحی و رسیدن به کیفیت سطح بالا ادامه پیدا کرد. به همین منظور همین امر موجب بالا رفتن قطر نمونه در قسمت ابتدایی کانال میشود. به همین منظور پس از هر مرحله PCAP مقداری سنگ زنی شده تا از قطر آن کاسته شده و مجدا آماده قرارگیری در پس از هر مرحله و مجدا آماده نماز مونه در قسمت ایندایی کانال میشود. به همین منظور انتهای نمونه جریان فلز در قسمتهایی دیده می شود که کاملا به صورت موضعی بوده و تاثیری در طول نمونه و نتیجه کار ندارد. مرحله سوم ECAP نیز موفقیت آمیز بوده ولی به دلیل افزایش میزان گشودگی در انتهای لوله و طول محدود نمونه امکان انجام ECAP در پاسهای بالاتر امکان پذیر نمی باشد. با توجه به اینکه سایر محققین نهایتا تا ۳ پاس به ECAP لوله پرداخته اند، تعداد مراحل ECAP نمونه ها کافی می باشد. در شکل ۴-۱۲ به منظور بررسی نقش فشار پشتی، مطابق جدول ۳-۱، ECAP نمونه ها را در دمای °C با فشار پشتی ۱۰۰ MPa می دهیم.



شکل ۴-۱۱: نمونههای خروجی از قالب در دمای ℃۲۰۰ و فشار پشتی ۵۰ MPa پس از ۱) یک، ۲) دو و ۳) سه مرحله ECAP به روش Bc با استفاده از ماندرل میله مسی



شکل ۴-۱۲: نمونههای خروجی از قالب در دمای ℃۲۰۰ و فشار پشتی I۰۰ MPa پس از ۱) یک، ۲) دو و ۳) سه مرحله ECAP به روش Bc با استفاده از ماندرل میله مسی

همانطور که در شکل ۴-۱۲ دیده می شود در فشار پشتی ۱۰۰ MPa نیز نمونه ها موفقیت آمیز ECAP شدهاند و با افزایش فشار پشتی از ۵۰ به MPa ۱۰۰ میزان گشودگی انتهای نمونه کاهش یافته است که نقش موثر فشار پشتی را نشان می دهد. مطابق جدول ۳-۱، آزمون تجربی شماره ۱۸ را با هدف بررسی تاثیر فشار پشتی بالاتر بر روند انجام فرایند انجام می دهیم. شکل ۴-۱۳، ECAP نمونه لوله دوفلزی را در دمای C[°] ۲۰۰ با فشار پشتی MPa در یک مرحله با استفاده از ماندرل میله مسی نشان میدهد. همانطور که دیده میشود افزایش فشار پشتی به میزان MPa ۲۰۰ باعث کاهش میزان جریان فلز در راهگاههای قالب نسبت به سرعت انجام فرایند شده است همین امر موجب انباشته شدن فلز و افزایش ضخامت آن در قسمت سر لوله میشود. همچنین جریان پیدا نکردن فلز در راهگاه افقی، کاهش ضخامت، نازکشدگی و در نهایت پارگی را در قسمت پایین نمونه به همراه دارد. با استناد به موارد گفته شده و شکل ۴-۱۳، میتوان دریافت که فشار پشتی MPa کام ۲۰۰ برای ECAP نمونه لوله دو فلزی در دمای C[°] ۲۰۰ بیش از حد مورد نیاز بوده و تاثیر منفی در روند انجام فرایند را دارد.



شکل ۴-۱۳: نمونههای خروجی از قالب در دمای ℃ ۲۰۰° با فشار پشتی ۲۰۰ MPa پس از یک مرحله ECAP با استفاده از ماندرل میله مسی

فرایند ECAP روی نمونهها در دمای C°۲۰ با فشار پشتی ۵۰، ۱۰۰ و ECAP انجام شد. حال با هدف بررسی تاثیر دمای انجام فرایند آزمونهای گفته شده را با فشار پشتی ۵۰، ۱۰۰ و MPa در دمای C°۲۰ انجام میدهیم. شکل ۴-۱۴، آزمونهای تجربی را در دمای C°۲۰ با فشار پشتی MPa ۵۰ در ۳ پاس به روش Bc با استفاده از ماندرل میله مسی در سه نمای بالا، جانب و پایین نمونه نشان میدهد. همانطور که دیده میشود افزایش دما باعث بهبود شکلپذیری نمونهها شده و ۳ مرحله ECAP



شکل ۴-۱۴: نمونههای خروجی از قالب در دمای ℃۲۵۰ و فشار پشتی MPa ۵۰ پس از ۱) یک، ۲) دو و ۳) سه مرحله ECAP به روش Bc با استفاده از ماندرل میله مسی

شکل ۴-۱۵، ECAP نمونه لوله دوفلزی را در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa ۲۰۰ در ۳ مرحله به روش Bc با استفاده از ماندرل میله مسی نشان میدهد. همانطور که دیده میشود با افزایش میزان فشار پشتی به MPa و دمای فرایند به C°۲۵۰، حد مطلوبی از شکلپذیری را شاهد هستیم. میزان گشودگی انتهای لوله کاملا کاهش یافته و حتی در پاسهای بالاتر نیز کنترلشده و قابل قبول میباشد. همچنین کیفیت سطح نمونهها نیز در حد بالایی است.



شکل ۴-۱۵: نمونههای خروجی از قالب در دمای ℃۲۵۰ و فشار پشتی ۱۰۰ MPa پس از ۱) یک، ۲) دو و ۳) سه مرحله ECAP به روش عB با استفاده از ماندرل میله مسی شکل ۴-۱۶، مطابق جدول ۳-۱، آزمون تجربی شماره ۲۱ را نشان میدهد. در این آزمون، ECAP نمونه دوفلزی در دمای ℃۲۵۰ و فشار پشتی MPa ۲۰۰ در یک پاس با استفاده از ماندرل میله مسی انجام شده است. همانطور که انتظار میرفت با اعمال فشار پشتی ۲۰۰ MPa، حتی با افزایش دما به ℃۲۵۰ شاهد ناز کشدگی و پارگی از ناحیه پایین نمونه می باشیم. قسمت پایین نمونه با توجه به ماهیت فرایند و انباشته شدن فلز در قسمت سر لوله به علت اعمال فشار پشتی بالا، همواره در معرض پارگی می باشد.



شکل ۴-۱۶: نمونههای خروجی از قالب در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی ۲۰۰ MPa پس از یک مرحله ECAP با استفاده از ماندرل میله مسی

با توجه به اینکه، اندازه دانهها با دمای انجام فرایند رابطه مستقیم دارد. هر چه دمای انجام فرایند ECAP پایین تر باشد برای بهبود خواص مکانیکی مطلوب تر میباشد. به همین منظور افزایش دما بیش از ۲۵۰°C توجیه علمی نداشته و از انجام آن صرف نظر میکنیم.

۴-۳- متالوگرافی ماده

به منظور مشخص نمودن تاثیر فرایند بر اندازه دانه و ریزساختار، نمونهها پس از حکاکی، متالوگرافی شدند. نمونهها توسط میکروسکوپ نوری، متالوگرافی و ریزساختار آنها مشاهده شد. شکل ۴-۱۷ ریزساختار نمونه خام اولیه را نشان میدهد. با توجه به اچ کردن مشکل آلومینیوم و مرزدانههای بسیار ظریف آن، ریزساختار نمونه آلومینیوم فقط در حالت خام مشاهده شد. شکل ۴-۱۸، تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری را برای لوله مسی EACP شده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی MPA ۵۰ در سه مرحله نشان میدهد. شکل ۴-۱۹، تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری را برای لوله مسی EACP مرحله نشان میدهد. شکل ۴-۱۹، تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری را برای لوله مسی EACP مده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی MPA شده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی MPA ۵۰ در سه محمد آمده از میکروسکوپ نوری را برای لوله مسی EACP شده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی ولاه مسی MPa بدست آمده از میکروسکوپ نوری را برای لوله مسی EACP شده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی ماویر محمد شکل ۴-۲۰۰، تصاویر مسی MPA شده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی MPA شده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی ماوید مسی MPA شده از میکروسکوپ نوری را برای لوله مسی EACP شده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی MPA بدست آمده از میکروسکوپ نوری را برای لوله مسی EACP شده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی MPA مسی محمد نشان میدهد. شکل ۴-۲۱، تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری را برای لوله مسی ADA شده در دمای 2[°]۰۰۰ و فشار پشتی MPA شده در دمای 2[°]مه و نوری را برای لوله مسی EACP شده در دمای 2[°]۰۰۵ و فشار پشتی ECAP در سه مرحله نشان میدهد. همان گونه که مشخص است با افزایش تعداد مراحل ECAP اندازه دانه کاهش یافته است. البته به دلیل عدم وضوح کامل تصاویر نمیتوان به قطعیت در مورد اندازه دانه اظهار نظر کرد اما نتایج مطالعه محققان روی Stappe دو فلزی آلومینیوم مس نشان میدهد سایز دانه پس از سه پاس ۹/۱/۱ رسیده است آ



شکل ۴-۱۷: تصاویر متالوگرافی نمونه خام اولیه با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر





شکل ۴-۱۹: تصویر متالوگرافی لوله مسی ECAP شده در دمای C[°]۲۰۰ با فشار پشتی MPa در ۳ مرحله الف) پاس ۱، ب) پاس ۲، ج) پاس ۳



شکل ۴-۲۰: تصویر متالوگرافی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa در ۳ مرحله الف) پاس ۱، ب) پاس ۲، ج) پاس ۳



شکل ۴-۲۱: تصویر متالوگرافی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵ با فشار پشتی MPa در ۳ مرحله الف) پاس ۱، ب) پاس ۲، ج) پاس ۳

۴-۴- نتایج سختی سنجی

میزان بار اعمال شده برای هر نمونه ۱Kg در مدت زمان ۱۰ ثانیه بود. مقادیر میکروسختی مطابق شکل ۲۴-۳، در ۴ جهت و در هر جهت ۳ نقطه به این صورت که برای ۱۲ نقطه از هر لوله و در مجموع ۲۴ نقطه در هر نمونه اندازه گیری شد. در هر جهت شعاعی بالا، پایین، چپ و راست برای هر لوله، میانگین سه نقطه سختی گرفته شده است. سپس مقادیر میانگین بدست آمده را در پاسهای متفاوت باهم مقایسه کرده و نتایج گزارش شده است. برای نمونه خام اولیه میانگین مقادیر سختی برای لوله آلومینیوم در ۴ جهت بالا، پایین، چپ و راست به ترتیب ۳۸/۵، ۴۰/۱، ۳۹/۹ و ۳۹/۳ ویکرز و برای لوله مسی، ۶۱، ۶۲، ۶۲/۴ و ۶۳/۷ ویکرز ثبت شده است. شکل ۴-۲۲ و شکل ۴-۲۳، میانگین مقادیر سختی لوله آلومینیوم و مس ECAP شده را در دمای °C ۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود مقادیر سختی، با افزایش تعداد دفعات عبور نمونه از داخل كانالهاى قالب، افزايش پيدا كرده است. الگوى افزايش سختى در نواحي جانبی مشابه یکدیگر میباشد. همچنین معمولا افزایش سختی در نواحی جانبی لولهها نسبت به قسمت های بالا و پایین بیشتر بوده است که این مسئله به دلیل اعمال بزرگترین کرنشها در این نواحی مي باشد [٣١]. سختي نمونه ها در پاس اول نسبت به نمونه خام اوليه بيشترين افزايش را داشته است و در پاسهای بعد این روند نیز ادامه پیدا کرده است. بیشترین مقدار میانگین سختی ثبت شده برای لوله آلومینیوم در حالت خام از ۴۰/۱۳ ویکرز با افزایش ٪۱۱۷ به ۸۷/۲ ویکرز و برای لوله مسی در حالت خام از ۶۳/۷ ویکرز با افزایش ٪۱۰۰ به ۱۲۷/۳ ویکرز رسیده است. شکل ۴-۲۴ و شکل ۴-۲۵، میانگین مقادیر سختی لوله آلومینیوم و مس ECAP شده را در دمای C°۲۰ با فشار پشتی MPa در ۳ یاس نشان میدهد. در این نمونه بیشترین مقدار سختی ثبت شده برای لوله آلومینیوم در حالت خام از ۴۰/۱۳ ویکرز با افزایش ٪۱۱۸ به ۸۷/۴ ویکرز و برای لوله مسی در حالت خام از ۶۳/۷ ویکرز با افزایش ./۱۰۶ به ۱۳۱ ویکرز رسیده است. افزایش فشار پشتی از ۵۰ MPa به ۱۰۰ MPa درمیزان سختی لوله آلومينيوم تاثير خاصي نداشته است ولي باعث افزايش ٪۶ سختي لوله مسي نسبت به نمونه مشابه شده است. شکل ۴-۲۶ و شکل ۴-۲۷، میانگین مقادیر سختی لوله آلومینیوم و مس ECAP شده را در دمای ۲۵۰°C با فشار پشتی MPa در ۳ پاس نشان میدهد. همانطور که مشاهده میکنید در پاس ۱ سختی افزایش پیدا کرده است. همچنین نواحی جانبی افزایش سختی بیشتری را به خود اختصاص داده

اند و نمونه به حدکثر سختی ۸۱/۳ ویکرز رسیده است ولی در پاس ۲ و ۳ برای نواحی جانبی و در پاس ۳ برای قسمتهای بالا و پایین نمونه با کاهش سختی مواجه شدهایم، همگرایی سخنی در پاس ۳ برابر ۶۷ ویکرز میباشد. در پاس اول فرایند در اثر بازآرایی، افزایش چگالی و کاهش اندازه دانه، سختی افزایش پیدا می کند. پس از آن به دلیل آنیلینگ نابجاییها در اثر دمای انجام فرایند و اینکه اندازه دانه بسیار ریز می شود و این ریزدانگی بر کرنش سختی غلبه می کند، سختی نمونه با کاهش نسبی همراه خواهد بود. در نمونه لوله مسى به دليل بالاتر بودن دماى تبلور مجدد أن نسبت به ألومينيوم، كاهش نسبى سختی فقط برای نواحی جانبی که کرنشهای بزرگتری به آنها اعمال میشود در پاس سوم اتفاق افتاده است و در سایر نقاط روند افزایش سختی تا پاس ۳ دیده میشود. حداکثر میزان سختی در پاس ۲ برابر ۱۲۵ ویکرز و همگرایی سختی تقریبا در پاس ۳ برابر ۱۱۸ ویکرز میباشد. شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹، میانگین مقادیر سختی لوله آلومینیوم و مس ECAP شده را در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa ۱۰۰در ۳ پاس نشان میدهد. با افزایش فشار پشتی از ۵۰ به ۱۰۰ MPa، روند بهبود افزایش سختی در لوله آلومینیوم و مسی دیده میشود. در لوله آلومینیومی در پاس سوم فقط شاهد کاهش سختی در نواحی جانبی میباشیم. حداکثر سختی ۷۹/۷ ویکرز در پاس دوم و همگرایی سختی در پاس ۳ برابر ۷۵ ویکرز میباشد. در لوله مسی نیز روند افزایش سختی تا پاس سوم مشاهده میشود، همچنان نواحی جانبی لوله بیشترین مقدار سختی برابر با ۱۲۹/۳ ویکرز را رائه میدهند. افزایش سختی لولههای آلومینیوم و مس را میتوان به وسیله افزایش نابجاییها با توجه به ایجاد کرنشهای پلاستیک بسیار زیاد و کاهش فاصله مرز دانهها در اثر ایجاد دانههای جدید در ماده توجیه کرد. در پاسهای بالاتر با شکل گیری دانههای فوق العاده ریز، نقش نابجاییها در افزایش سختی کاهش می یابد. تشکیل دانههای بسیار ریز با مرزهای بزرگزاویه از حرکت نابجاییها جلوگیری کرده و موجب قفل شدن آنها در یکدیگر می شود. این عامل باعث کاهش سهم نابجاییها در سختی ماده می شود. در حالی که سهم مرز دانهها با توجه به کاهش تدریجی اندازه دانه ثابت میماند. در نتیجه سختی پس از چندین پاس ممکن است کاهش پیدا کند [۳۶]. با توجه به نتایج بدست آمده بیشترین میزان سختی در نمونه ECAP شده در دمای C[°]C و فشار پشتی MPa حاصل شده است. حداکثر میزان سختی برای لوله آلومینیوم ۸۷/۴ ویکرز و برای لوله مسی ۱۳۱ ویکرز ثبت شده است. نتایج نشان میدهد دمای پایین تر و میزان فشار پشتی بالاتر در افزایش میزان سختی نقش تعیین کنندهای دارد.



شکل ۴-۲۲: میانگین میکروسختی لوله آلومینیوم ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۲۳: میانگین میکروسختی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۲۴: میانگین میکروسختی لوله آلومینیوم ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۲۵: میانگین میکروسختی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۲۶: میانگین میکروسختی لوله آلومینیوم ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۲۷: میانگین میکروسختی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۲۸: میانگین میکروسختی لوله آلومینیوم ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۲۹: میانگین میکروسختی لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس

۴–۵– تحلیل نیروی فرایند

نیروی مورد نیاز فرایند یکی از پارامترهای اساسی در تعیین شرایط انجام آزمون است. افزایش نیروی پرس محدودیتهایی مانند: جنس سنبه پرس، تنشهای وارد شده به قالب و میزان فشار پشتی اعمالی را در پی دارد. به همین دلیل برای انجام فرایند ECAP باید شرایط به گونهای مهیا شود که نیروی مورد نیاز فرایند به حداقل مقدار خود یا محدودهای قابل اعمال برسد. در فرایند ECAP، افزایش دما به دلیل بالابردن حد شکل پذیری مواد باعث کاهش نیروی مورد نیاز می شود. همچنین استفاده از فشار پشتی با توجه به اعمال نیرو در جهت مخالف و بسته به میزان اعمال شده، باعث بالارفتن نیروی پرس می شود. در شکل ۴-۳۰، نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در ۳ پاس به روش Bc نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بیشترین نیرو اعمالی در پاس اول فرایند به ۷/۴ تن رسیده است. در پاس دوم نیز نیروی مورد نیاز فرایند تا ۸/۶ تن افزایش پیدا کرده است. الگوی تغییرات نیرو در پاس سوم نیز مشابه پاس اول بوده و بیشترین نیرو ۷/۲ تن را به خود اختصاص داده است. در پاس یک استحکام نمونه پایین است و بیشترین سهم نیرو صرف ریزدانه شدن مواد و در نتیجه افزایش استحکام نمونه می شود. در پاس دوم استحکام و ریزدانه شدن نسبت به پاس اول بیشتر شده و با توجه به اینکه در پاس یک ریزدانه شدن به بیشترین حد خودش نرسیده است فرایند ریزدانه شدن ادامه پیدا کرده و نیروهای شکلدهی به دلیل ریزدانه شدن در پاس دوم نسبت به پاس اول افزایش مییابد. در انتهای پاس دوم استحکام نمونه و ریزدانگی مواد به حد بالایی رسیده است به همین دلیل در پاس سوم مقدار نیروی مورد نیاز فرایند برای ریزدانهشدن نسبت به پاس دوم کاهش یافته و بیشترین سهم نیرو فقط صرف شکلدهی نمونه می شود و نیرویی صرف ریزدانه شدن مواد نمی شود به همین دلیل نیرو نسبت به پاس دوم کاهش پیدا کرده است.در شکل ۴-۳۱، نمودار نیرو-جابجایی نمونه ECAP شده در دمای [°]C ۲۰۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa در ۳ پاس به روش Bc نشان داده شده است. بیشترین نیروی فرایند در پاس یک به ۷/۲ تن میرسد. در پاس دوم نیروی فرایند تا ۹/۵ تن افزایش پیدا کرده است و در پاس سوم بیشترین نیروی مورد نیاز فرایند به ۸/۴ تن رسیده است.
با افزایش فشار پشتی از ۵۰ به MPa ۱۰۰، نیروی فرایند در حالت بیشینه حدود ۱/۲ تن افزایش پیدا کرده است. در شکل ۴-۳۲، نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C[°] ۲۵۰ با فشار پشتی ما ۸۰ در ۳ پاس به روش Bc نشان داده شده است. بیشترین نیروی فرایند در پاس یک به ۷/۶ تن رسیده است. در پاس دوم نیز نیرو تا ۸/۷ تن افزایش پیدا کرده و در پاس سوم نیرو از ۶/۹ تن فراتر نرفته است. در شکل ۴-۳۳، نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C[°] ۲۵۰ با فشار پشتی نرفته است. در پاس دوم نیز نیرو تا ۸/۷ تن افزایش پیدا کرده و در پاس سوم نیرو از ۶/۹ تن فراتر نرفته است. در شکل ۴-۳۳، نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C[°] ۲۰۰ با فشار پشتی ماده است. در پاس دوم نیز نیرو تا ۸/۵ تن افزایش پیدا کرده و در پاس سوم نیرو از ۶/۸ تن فراتر نرفته شده است. در پاس دوم نیرو تا ۸/۵ تن افزایش پیدا کرده و در پاس سوم نیرو از ۲/۸ تن فراتر نرفته شده است. در پاس دوم نیرو تا ۸/۵ تن افزایش پیدا کرده و در پاس سوم نیرو از ۲/۸ تن فراتر نرفته است. با توجه به نتایج، با افزایش فشار پشتی از ۵۰ به ۱۹۷۸ در دمای C[°] ۲۰۰ ، میزان نیرو در افزایش دما از C[°] ۲۰۰ به C[°] ۲۰۰۲، تغییرات نیرو بارزی احساس نمیشود ولی در شرایط دمایی مشابه با افزایش فشار پشتی از ۵۰ به ۱۰۰ افزایش نیروی فرایند به خوبی دیده میشود و میتوان نتیجه رفزایش فشار پشتی در مقدار نیروی مورد نیاز فرایند، نسبت به دمای کاری ذکر شده بیشتر میباشد.



شکل ۴-۳۰: نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa در ۳ پاس



شکل ۴-۳۱: نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C[°]C با فشار پشتی ۱۰۰ MPa در ۳ پاس



شکل ۴-۳۲: نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای ۲۵۰°C با فشار پشتی ۵۰ MPa در ۳ پاس



شکل ۴-۳۳: نمودار نیرو- جابجایی نمونه ECAP شده در دمای C°۲۵ با فشار پشتی MPa در ۳ پاس

۴–۶– توزيع ضخامت نمونهها

هر نمونه شامل دو لوله آلومینیومی و مسی به ضخامت حدودی ۱ mm و میلگرد مسی به قطر ۸ mm می باشد. از قسمت میانه هر نمونه در راستای طولی، قطعهای به طول mm ۱۰ بریده شده و پس از پلیسه گیری و پولیشزنی با استفاده از میکروسکوپ نوری با بزر گنمایی ۵ و میکرومتر دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ mm فخامت لوله آلومینیومی و مسی در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست با هدف بررسی توزیع ضخامت و نازکشدگی لولهها مورد اندازه گیری قرار گرفت. شکل ۴-۴۲، نمونه خام لوله دوفلزی آلومینیوم- مس را نشان میدهد. ضخامت نمونه خام آلومینیومی در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست به ترتیب برابر ۰/۹۷، ۱، ۹۹/۰ و ۰/۹۸ میلیمتر و برای نمونه خام مسی به ترتیب برابر ۱/۰۳، ۰/۹۸، ۰/۹۹ و ۱/۰۱ میلیمتر ثبت شده است. شکل ۴-۳۴ و شکل ۴-۳۵، توزیع ضخامت لوله آلومینیومی و مسی ECAP شده را در دمای C°۲ با فشار پشتی ۵۰ MPa در ۳ پاس به روش B_C نشان مي دهد. در لوله آلومينيومي و مسى بيشترين كاهش ضخامت مربوط به قسمت پايين لوله بوده و به ترتیب کمترین ضخامت به mm ۰/۷۴ mm سوم و ۰/۸۴ mm در پاس دوم رسیده است، همچنین ضخامت لوله مسی در پاس سوم در کمترین حالت به mm ۰/۸۷ رسیده است. شکل ۴-۳۶ و شکل ۴-۳۷، توزیع ضخامت لوله آلومینیومی و مسی ECAP شده را در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa ۱۰۰ در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس به روش Bc نشان میدهد. در این نمونه همچنان بیشترین کاهش ضخامت در قسمت پایین لوله رخ میدهد. کمترین ضخامت برای لوله آلومینیوم برابر ۸ mm ۰/۸ در پاس سوم و برای لوله مسی برابر ۳m ۰/۷۲ در پاس دوم ثبت شده است، ضخامت لوله مسی در پاس سوم در کمترین مقدار به mm ۰/۸۴ رسیده است. همانطور که دیده می شود لوله مسی به عنوان لایه بیرونی نمونه در معرض بیشترین نازکشدگی در قسمت پایین لوله میباشد، به همین ترتیب نقش فشار پشتی در جبران این کاهش ضخامت در پاس سوم بیشترین نمود را پیدا می کند. با ریزدانه شدن نمونه ها تا پاس دوم و کاهش روند افزایش سختی، نیروی مورد نیاز پرس برای ECAP نمونهها در پاس سوم کاهش می یابد. این کاهش نیرو باعث افزایش نقش فشار پشتی و بهبود

ضخامت نمونهها در پاس سوم نسبت به پاس دوم می شود. شکل ۴-۳۸ و شکل ۴-۳۹، توزیع ضخامت لوله آلومینیومی و مسی ECAP شده را در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در ۳ پاس به روش Bc نشان میدهد. در این نمونه کمترین ضخامت برای لوله آلومینیوم برابر mm ۰/۸۳ سر یاس دوم و برای لوله مسی برابر mm ۰/۵۹ سر پاس سوم ثبت شده است، ضخامت لوله آلومینیوم در پاس سوم در کمترین مقدار به ۳m ۰/۸۶ رسیده است. با توجه به افزایش دما به C°۲۵۰ و افزایش حد شکل پذیری لولهها، فشار پشتی ۵۰ MPa برای بهبود روند کاهش ضخامت لولهها مخصوصا لوله مسی در قسمت یایین نمونه به نظر کافی نمی باشد. شکل ۴-۴۰ و شکل ۴-۴۱، توزیع ضخامت لوله آلومینیومی و مسی ECAP شده را در دمای C°۲ ۲۵۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa در ۳ پاس به روش B_C نشان میدهد. در این نمونه کمترین ضخامت برای لوله آلومینیوم برابر ۰/۷۴ mm در پاس سوم و برای لوله مسی برابر mm ۰/۸۴ mm در پاس دوم ثبت شده است، ضخامت لوله مسی در پاس سوم در کمترین مقدار به ۰/۸۷ رسیده است. همانطور که دیده می شود افزایش فشار پشتی به میزان MPa، تاثیر مطلوبی روی کاهش ضخامت لوله مسی در قسمت پایین نمونه در پاس سوم دارد. با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش دما نیاز به فشار پشتی بالاتر برای کنترل میزان ناز کشدگی لولهها میباشد. همچنین کمترین کاهش ضخامت در انتهای ۳ پاس فرایند برای لوله آلومینیومی در نمونه ECAP شده در دمای C°۲۵۰ و با فشار پشتی ۵۰ MPa برابر با ۵۰ /۸۶ و بیشترین کاهش ضخامت نمونه ECAP شده، در دمای ۲۵۰°C و با فشار پشتی MPaو دمای C ۲۰۰°C با فشار پشتی ۵۰ MPa مشترکا به میزان mm ۰/۷۴ ثبت شده است. کمترین کاهش ضخامت در انتهای ۳ پاس فرایند برای لوله مسی نیز در نمونه ECAP شده در دمای C°C و با فشار پشتی ۱۰۰ MPa و دمای C°C با فشار پشتی ECAP شده در مشترکا به میزان mm ۰/۸۷ و بیشترین کاهش ضخامت لوله مسی در نمونه ECAP شده در دمای ۲۵۰°C و ۵۰ MPa برابر با ۰/۵۹ mm اندازه گیری شده است. در تمامی نمونهها معمولا بیشترین کاهش ضخامت در قسمت پایین لوله نسبت به قسمت بالا و نواحی جانبی رخ داده است. این مسئله احتمالا بهدليل ايجاد يديده ناحيه مرده مي باشد كه در گوشه بيروني قالب ECAP اتفاق مي افتد [۲۴, ۲۵].



شکل ۴-۳۴: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C[°]۲۰۰ با فشار پشتی MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۳۵: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C[°]۲۰۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۳۶: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۳۷: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C[°]۲۰۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۳۸: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۳۹: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی ۵۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۴۰: توزیع ضخامت لوله آلومینیومی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس



شکل ۴-۴۱: توزیع ضخامت لوله مسی ECAP شده در دمای C°۲۵۰ با فشار پشتی ۱۰۰ MPa در چهار جهت بالا، پایین، چپ و راست در ۳ پاس

شکل ۴-۴۴، نمونهای را نشان میدهد که تحت نیمی از فرایند ECAP در پاس اول با دمای C°۲۰ و فشار پشتی ۵۰ MPa قرار گرفته است. سپس فرایند متوقف شده، قالب باز شده و نمونه تحت نیروی پرس خارج شده است. نمونه در راستای محور طولی برش خورده است. ناحیه مرده نیز در دو حالت با میلگرد مسی و بدون میلگرد مسی در ناحیه تغییر شکل در محل اتصال لوله آلومینیومی به مسی مشاهده میشود. ناحیه مرده نیز در گوشه بیرونی قالب، بین قالب و لوله مسی وجود دارد. این ناحیه نیز به علت پرنشدن گوشه قالب با ماده ایجاد میشود که کاهش ضخامت لوله مسی را در قسمت پایین به همراه دارد.



شكل ۴-۴۲: نمونه اوليه لوله دوفلزي آلومينيوم – مس



شکل ۴-۴۳: ناحیه مرده بین لوله آلومینیوم و مسی در منطقه تغییر شکل

۲-۴- نتایج تحلیل عددی

در این بخش نتایج حاصل از شبیهسازی فرایند ECAP لوله دو فلزی بیان می شود. به دلیل نداشتن خواص مکانیکی لوله آلومینیوم و مسی مورد استفاده در دمای بالا، فرایند مورد نظر فقط در دمای محیط شبیه سازی شده است. شکل ۴-۴۴، شبیه سازی فرایند ECAP در دمای محیط با فشار پشتی MPa با ماندرل لاستیک وایتن را نشان میدهد. همانطور که مشاهده می شود بیشترین تنش به میزان MPa ۳۵۴ به ناحیه زانویی نمونه بهصورت تنش فشاری اعمال میشود که بهصورت لهیدگی سطوح لوله نمایان می شود. با توجه به شرایط دمایی پایین می توان به بالا رفتن اصطکاک بین قالب و لوله مسی پی برد. نقش اصطکاک را نیز در قسمت پایین لوله مسی که با کف قالب در تماس است را بیشتر می توان مشاهده کرد. در این قسمت از لوله به دلیل تنشهای کششی وارده، پارگی دور از انتظار نمیباشد. همچنین با مقید نشدن لاستیک درون لوله و خارج شدن آن، قسمتی از لوله مسی و آلومینیومی دچار مچالگی شده است در نهایت این عوامل به خارج شدن لوله آلومینیومی از درون لوله مسی کمک کرده و باعث شده است تا عیوب زیادی در سطح نمونه حاصل شود و ابعاد هندسی لولهها از بین رود در نتیجه فرایند کاملا ناموفق میباشد. شکل ۴-۴۵، شبیهسازی فرایند ECAP در دمای محیط با فشار پشتی ECAP را با ماندرل میله مسی را نشان میدهد. با توجه به انجام فرایند در دمای محیط برای MPa و ناموفق بودن تجربه استفاده از لاستیک وایتن، از میله مسی به عنوان ماندرل نیز در شبیهسازی برای صحهسنجی نتایج تحلیل عددی با نتایج تجربی استفاده میکنیم. همانطور که مشاهده می شود شرایط آزمون نسبت به حالت استفاده از لاستیک وایتن، بهینهتر میباشد. فشار پشتی MPa ۲۰۰ کاملا در مقيد كردن ميله مسى درون لوله آلومينيومي موفق عمل كرده و به همين دليل ابعاد هندسي نمونه به ابعاد اولیه نزدیک میباشد. بیشترین تنشهای فشاری اعمالی در ناحیه زانویی نمونه بهصورت لهیدگی مشاهده میشود. همچنین قسمت انتهای نمونه به دلیل اعمال فشار پشتی، تنشهای فشاری بالایی را تحمل می کند. در این شبیه سازی نیز به نقش غیر قابل انکار اصطکاک بین قالب و لوله مسی نیز می توان اشاره کرد. با توجه به انجام آزمون در دمای محیط و پایین بودن حد شکلپذیری مواد و ماهیت تغییر

شکل شدید آزمون با اعمال کرنشهای بالا به نمونه، پارگی و افزایش گشودگی ناحیه پایین لوله مسی به دلیل اعمال تنشهای کششی و ضریب اصطکاک بالا بین قالب و لوله، دور از ذهن نمی باشد. همچنین با توجه به اعمال کرنشهای بالاتر به نواحی جانبی لوله نسبت به ناحیه پایین و بالا، نازکشدگی لوله در این قسمتها به خوبی دیده می شود. همین امر موجب افزایش و گسترده شدن ناحیه پارگی از قسمت پایین لوله به قسمتهای جانبی می شود. شکل ۴-۴۶، نمای بر شخورده در راستای طولی نمونه ECAP شده با فشار پشتی ۵۰ MPa و ماندرل لاستیک وایتن و نمونه ECAP شده با فشار پشتی MPa ۱۰۰ و ماندرل میله مسی را نشان میدهد. همانطور که دیده می شود با توجه به درصد ازدیاد طول بالا لاستیک وایتن و خارج شدن قسمتی از آن از درون لوله آلومینیوم، لاستیک در حین فرایند دچار کاهش قطر و افزایش طول شده است به همین سبب ضخامت لوله آلومینیوم و مس در قسمتهای ابتدایی و میانی افزایش پیدا کرده است ولی در قسمت انتهای لوله دچار نازکشدگی شدهاند همچنین جدایش لایههای الومینیوم و مس نیز به چشم میخورد. در نمونه با ماندرل میله مسی نیز به دلیل اعمال فشار پشتی ۱۰۰ MPa و ضریب اصطکاک بالا بین لوله مسی و قالب، انباشته شدن و افزایش ضخامت لوله مسي در قسمت ابتداي لوله مشاهده مي شود. اين امر نيز باعث كاهش ضخامت لوله ألومينيوم و قطر میله مسی در نواحی ابتدای نمونه شده است. با کاهش ضخامت لوله آلومینیوم و قطر لوله مسی در ابتدای نمونه، قسمتهایی از لوله آلومینیوم و میله مسی در انتهای نمونه با افزایش قطر مواجه شده و لوله مسی نیز دچار نازکشدگی از قسمت بالا و افزایش گشودگی از قسمت پایین شده است. شکل ۴۷-۴، منحنی کرنش پلاستیک معادل بر حسب فاصله نرمال در سه جهت بالا، پایین و جانب برای نمونه لوله دوفلزي با ماندرل لاستیک وایتن و میله مسی را نشان میدهد. با توجه به نتایج ذکر شده می توان تاثیر پارامترهای کنترلی را به صورت زیر بیان نمود.

دمای فرایند یکی از مهم ترین عوامل در انجام موفقیت آمیز ECAP میباشد. انجام فرایند در
 دمای محیط به دلیل پایین بودن حد شکل دهی مواد کاری بسیار سخت و گاها محال است.

- اصطکاک نیز یک عامل تاثیر گذار در فرایند ECAP میباشد. افزایش اصطکاک باعث پرشدن
 گوشه بیرونی قالب و کاهش ناحیه مرده میشود ولی از طرفی باعث کاهش سرعت جریان فلز
 در راهگاههای قالب شده و در نتیجه ناز کشدگی و پارگی را در پی دارد.
- فشارپشتی نیز به عنوان یک عامل مطلوب در فرایند ECAP طبقهبندی می شود. این عامل با کنترل انتهای فرایند سعی در جبران ناز ک شدگی ضخامت لوله ها، کاهش گشودگی قسمت پایین نمونه و جلوگیری از پارگی لوله را دارد.



شکل ۴-۴۴: شبیهسازی فرایند ECAP در دمای محیط با فشار پشتی ۵۰ MPa با استفاده از ماندرل لاستیک وایتن در سه نمای بالا، پایین و جانبی



شکل ۴-۴۵: شبیهسازی فرایند ECAP در دمای محیط با فشار پشتی ۱۰۰ MPa با استفاده از ماندرل میله مسی در سه نمای بالا، پایین و جانبی



شکل ۴-۴۶: نمای برشخورده نمونه در راستای طولی الف) نمونه با ماندرل لاستیک وایتن، ب) نمونه با ماندرل میله مسی



الف) نمونه با ماندرل لاستیک، ب) نمونه با ماندرل میله مسی

فصل ۵ نتيجه گیری و ارائهی پیشنهادها

۵–۱– مقدمه

در این فصل از پایاننامه به نتیجه گیری نهایی در رابطه با نتایج ارائه شده در فصل پیشین، پرداخته و نقاط قوت و ضعف پژوهش صورت گرفته بیان خواهد شد. در پایان، با هدف ارتقا و رفع عیوب کارهای آتی در این خصوص از زمینهی کاری، پیشنهادهایی ارائه خواهد شد.

۵-۲- نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا قالب فرایند ECAP به منظور استفاده از فشار پشتی بازطراحی و ساخته شد. از جمله مزایای طرح ایجادشده میتوان به چند نکته اشاره کرد: پس از چندین مرحله ECAP در حالت سرد و گرم هیچگونه خرابی در قالب مشاهده نشد. از نظر ایجاد مخاطره جانی برای آزمایش *ک*ننده فرایند، قالب کاملاً ایمن بوده چرا که هسته عمودی قالب به وسیله حلقه فشاری احاطه شده است. به دلیل جا زدنی^۱ ساخته شدن هسته عمودی، در هنگام خرابی کانال عمودی میتوان به راحتی و با صرف هزینه اندک نسبت به تعویض آن به جای تعویض کل قالب اقدام کرد. همچنین راهگاه افقی به جای تراشیده شدن در کفه پایینی قالب، درون ۲ کفه استوانهای شکل که درون کفه پایینی قالب قرار می گیرند ایجاد

¹ Insert

شده است. به این ترتیب مشکل گیر کردن نمونه و قفل شدن قالب کاملا از بین رفته و با ایجاد هر مشکل یا عیوبی در سطوح داخلی راهگاه افقی به راحتی قابل تعویض میباشد. به این ترتیب بدون نیاز به دست زدن به شاکله اصلی قالب (حلقه فشاری و کفه پایینی قالب) میتوان در صورت نیاز هسته عمودی و افقی قالب را تعویض کرد.

در بخش تجربی، لولههایی از جنس آلومینیوم و مس تهیه و خواص مکانیکی آنها بر اساس استانداردهای موجود تعیین شد. پس از آماده سازی قالب، نمونهها و تجهیزات مورد نیاز، آزمونهای تجربی مطابق با جدول ۳-۱ انجام شد. فرایند ECAP در دمای محیط، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۵ با دو ماندرل لاستیک وایتن و میله مسی با فشارهای پشتی ۵۰ تا ECAP در دمای محیط، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۵ با دو ماندرل لاستیک وایتن خارج شدن ماندرل لاستیک از درون لولهها یا پاره شد. لوله و کاهش ضخامت شدید آن و از دست نوایة محیط معنی نادر ماه حالتهای ذکر شده، فرایند به دلیل خارج شدن ماندرل لاستیک از درون لولهها یا پاره شدن لوله و کاهش ضخامت شدید آن و از دست رفتن ابعاد هندسی اولیه، ناموفق بوده و نتیجه مطلوبی برای امکان ادامه ECAP در پاسهای بالاتر نداشته است. سپس با شناسایی عوامل تاثیرگذار بر فرایند، سعی بر بهبود شرایط ECAP داشته و به همین دلیل دمای انجام فرایند را تا ۲°۰۰۰ و ۲°۰۵۰ بالا بردهایم. با توجه به محدودیت دمای کارکرد استیک وایتن، امکان استفاده از آن در دماهای ذکر شده وجود نداشته و فقط از ماندرل میله مسی می بهبود شرایط ECAP داشته و به معین دلیل دمای انجام فرایند را تا ۲°۰۰۰ و ۲°۰۵۰ بالا بردهایم. با توجه به محدودیت دمای کارکرد استیک وایتن، امکان استفاده از آن در دماهای ذکر شده وجود نداشته و فقط از ماندرل میله مسی می بهبود شرایط ECAP و ۲°۰۰۰ با توجه به محدودیت دمای کارکرد در ایتای مواند را تا ۲°۰۰۰ و ۲°۰۵۰ بالا بردهایم. با توجه به محدودیت دمای کارکرد در مین دلیل دمای استفاده از آن در دماهای ذکر شده وجود نداشته و فقط از ماندرل میله مسی می با فشار پشتی ۵۰۰ و ۲°۰۰۰ و ۲°۰۵۰ فرایند ECAP برای نمونه پس از هر مرحله به اندازه ۹۰ مسی با فشار پشتی ۵۰۰ و می ۲۰۰۰ و ۲°۰۵۰ فرایند ECAP برای نمونه ها پس از هر مرحله به اندازه ۹۰ مسی با فشار پشتی ۵۰۰ و ۲۰۰۰ و ۲°۰۵۰ فرایند ECAP برای نمونه برای نمونه ولوله دوفلزی با ماندرل میله مسی مسی با فشار پشتی ۵۰۰ و می ۲۰۰۰ و توند مولا که در آن نمونهها پس از هر مرحله مداوم پرسکاری مده مدی در یک جهت چرخانده میشوند، انجام و نمونهها به صورت موفق، تحت ۳ مرحله مداوم پرسکاری در مدی

پس از ECAP، نمونهها برای سه منظور آماده سازی شدند، متالوگرافی ماده، انجام آزمون سختیسنجی و بررسی توزیع ضخامت لولهها که به همین منظور نمونهها پس از برش، پولیش کاری و حکاکی شدند، در نهایت میزان سختی، ضخامت لولهها و اندازه دانهها مورد بررسی قرار گرفت.

در بخش تحلیل عددی، شبیهسازی فرایند در دمای محیط انجام شده و با نتایج تجربی مقایسه و صحهسنجی شده است.

نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر ارائه شده است.

- خواص مکانیکی لولههای آلومینیومی و مسی به کمک آزمون کشش تک محوره بر اساس
 استاندارد ASTM A370 تعیین شد.
- دمای فرایند در میزان نیرو مورد نیاز پرس تاثیر زیادی داشته به گونهای که ECAP در دمای محیط نیاز به نیروی حدودا ۲ برابر بیشتر از نیروی انجام فرایند در دمای C°۲۰۰ و C°۲۵۰ را دارد.
- افزایش بیش از حد فشار پشتی موجب انباشته شدن فلز در قسمت سر لوله و پارگی قسمت پایین آن می شود.
- کافی نبودن میزان اعمال فشار پشتی یا پایین بودن دمای فرایند موجب ناز کشدگی و پارگی لوله می شود.
- با توجه به درصد ازدیاد طول بالای لاستیک وایتن و محدوده دمای کاری آن، استفاده از آن به عنوان ماندرل برای ECAP لوله مناسب نبوده و تغییرات فشار پشتی تاثیری بر مقید کردن لاستیک درون لوله ندارد.
- نتایج متالو گرافی لوله انشان میدهد با افزایش تعداد پاس های ECAP سایز دانه ها کاهش پیدا کرده است.
- نتایج سختی سنجی نشان میدهد که الگوی افزایش سختی در نواحی جانبی مشابه یکدیگر میباشد. همچنین معمولا افزایش سختی در نواحی جانبی لولهها نسبت به قسمت های بالا و پایین بیشتر بوده است که این مسئله به دلیل اعمال بزرگترین کرنشها در این نواحی میباشد.
- سختی نمونه ها در پاس اول نسبت به نمونه خام اولیه به دلیل رشد ریزدانگی بالا، بیشترین
 افزایش را نسبت به پاس های ۲ و ۳ داشته است.
- نتایج نشان میدهد دمای پایین تر و میزان فشار پشتی بالاتر در افزایش میزان سختی نقش تعیین کنندهای دارند. بیشترین میزان سختی در نمونه ECAP شده در دمای C°۲۰ با فشار پشتی ۲۰۰۰ مال شده است. بیشترین مقدار میانگین سختی ثبت شده برای لوله

آلومینیوم در حالت خام از ۴۰/۱۳ ویکرز با افزایش ٪۱۱۸ به ۸۷/۴ ویکرز و برای لوله مسی در حالت خام از ۶۳/۷ ویکرز با افزایش ٪۱۰۶ به ۱۳۱ ویکرز رسیده است.

- نتایج تحلیل نیروی فرایند نشان میدهد در همه نمونههای ECAP شده، پاس دوم بیشترین سهم نیروی مورد نیاز را به خود اختصاص داده است . این مسئله به دلیل افزایش روند ریزدانگی از نمونه خام تا انتها پاس دوم میباشد. سهم نیروی قابل توجهی در هر پاس صرف ریزدانه شدن مواد میشود. با توجه به حد بالای ریزدانگی در انتهای پاس دوم، در پاس ۳، سهم نیرویی که صرف ریزدانگی مواد میشود به شدت کاهش یافته و نیرو فقط صرف شکل دهی میشود به همین سبو، بیاس دوم کاهش میباد.
- با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش دما از C°۲۰۰ به C°۲۰۰ روند تغییرات نیروی فرایند محسوس نمیباشد ولی در شرایط دمایی مشابه با افزایش فشار پشتی از ۵۰ به MPa در دمای C°۲۰۰ در بیشینهترین حالت ۱/۲ تن و در دمای C°۲۰۰ نیز، ۱/۸ تن، نیرو افزایش داشته است و میتوان نتیجه گرفت نقش فشار پشتی در مقدار نیروی مورد نیاز فرایند نسبت به دمای کاری ذکر شده بیشتر میباشد.
- در تمامی نمونهها معمولا بیشترین کاهش ضخامت در قسمت پایین لوله نسبت به قسمت بالا و نواحی جانبی رخ داده است. همچنین با افزایش دما نیاز به فشار پشتی بالاتر برای کنترل میزان نازکشدگی لولهها میباشد.
- کمترین کاهش ضخامت در انتهای ۳ پاس فرایند برای لوله آلومینیومی در نمونه ECAP شده در دمای C°۲۵۰ و با فشار پشتی MPa ۵۰ برابر با mm ۸/۰ و بیشترین کاهش ضخامت نمونه ECAP شده، در دمای C°۲۵۰ و با فشار پشتی MPa ۱۰۰ و دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی MPa ۵۰ MPa شده، در دمای C°۲۰۴ شده است. کمترین کاهش ضخامت برای لوله مسی نیز در نمونه ECAP شده در دمای C°۲۰ و با فشار پشتی MPa ۱۰۰ و دمای C°۲۰۰ با فشار پشتی ECAP شده در دمای C°۲۰ و با فشار پشتی کاهش ضخامت در نمونه با فشار پشتی MPa ۵۰ مشترکا به میزان mm ۲۰۰° و بیشترین کاهش ضخامت در نمونه با فشار پشتی AMPa شده در دمای C°۲۰ و با MPa دمشترین کاهش ضخامت در نمونه دمونه مشترکا به میزان mm ۵۰/۰۴ و بیشترین کاهش ضخامت در نمونه در نمونه ECAP شده در دمای C°۲۰ و با MPa در نمونه مشار پشتی BPa ۲۰۰° و بیشترین کاهش ضخامت در نمونه در نمونه ECAP شده در دمای C°۲۰ و با فشار پشتی کاهش ضخامت در نمونه با فشار پشتی BPa ۲۰۰۰ و دمای C°۲۰۰ و بیشترین کاهش ضخامت در نمونه در نمونه ا

- مقایسه نتایج عددی و تجربی نشان داد که هندسه نهایی قطعه ECAP شده در دمای محیط
 و همچنین ناحیه پارگی در شبیهسازی به خوبی پیشبینی شده است.
- با توجه به نتایج تحلیل عددی، دمای فرایند پایین، لاستیک وایتن به عنوان ماندرل و ضریب
 اصطکاک بالا بین قالب و نمونه، از مهمترین عوامل ناموفق بودن فرایند ECAP به شمار میآیند.

۵-۳- ارائهی پیشنهادها

به منظور ادامهی پژوهش در این زمینه، پیشنهادهای زیر ارائه میشود.

- در این پژوهش از لاستیک وایتن و میله مسی به عنوان ماندرل استفاده شد. پیشنهاد می شود
 از ابزارهای الاستومتری دیگر، روغن و ماسه به عنوان ماندرل برای این فرایند به کار گیری شود.
- پیشنهاد می شود لوله های آلومینیوم و مس با ضخامت بیشتر و لوله هایی با جنسهای متفاوت مورد پژوهش قرار گیرد.
 - اثر زاویه بین کانالهای قالب بر میکروساختار و خواص مکانیکی بررسی شود.
- فرایند ECAP با نرخ کرنشهای مختلف اجرا شود و تأثیر سرعت رم پرس بر فرایند مشخص شود.
- پیشنهاد می شود طول کانال افقی قالب به منظور توانایی ECAP نمونههایی با اندازه بزرگتر با
 اعمال فشار پشتی، افزایش پیدا کند.

منبعها

- [1] R. Z. Valiev, and T. G. Langdon, "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement," *Progress in materials science*, vol. 51, no. 7, pp. 881-981, 2006.
- [2] G. Faraji, M. M. Mashhadi, and H. S. Kim, "Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes," *Materials Letters*, vol. 65, no. 19, pp. 3009-3012, 2011.
- [3] M. Mesbah, G. Faraji, and A. Bushroa, "Characterization of nanostructured pure aluminum tubes produced by tubular channel angular pressing (TCAP)," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 590, pp. 289-294, 2014.
- [4] G. Faraji, M. M. Mashhadi, and H. S. Kim, "Deformation behavior in tubular channel angular pressing (TCAP) using triangular and semicircular channels," *Materials transactions*, vol. 53, no. 1, pp. 8-12, 2012.
- [5] G. Faraji, K. Abrinia, M. Mashhadi, and M. Hamdi, "An upper-bound analysis for frictionless TCAP process," *Archive of Applied Mechanics*, pp. 1-11, 2013.
- [6] G. Faraji, M. Mashhadi, A. Dizadji, and M. Hamdi, "A numerical and experimental study on tubular channel angular pressing (TCAP) process," *Journal of mechanical science and technology*, vol. 26, no. 11, pp. 3463-3468, 2012.
- [7] G. Faraji, A. Babaei, M. M. Mashhadi, and K. Abrinia, "Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes," *Materials Letters*, vol. 77, pp. 82-85, 2012.
- [8] G. Faraji, and M. M. Mousavi, "Plastic deformation analysis in parallel tubular channel angular pressing (PTCAP)," 2013.
- [9] H. Abdolvand, H. Sohrabi, G. Faraji, and F. Yusof, "A novel combined severe plastic deformation method for producing thin-walled ultrafine grained cylindrical tubes," *Materials Letters*, vol. 143, pp. 167-171, 2015.
- [10] A. Zangiabadi, and M. Kazeminezhad, "Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube Channel Pressing (TCP)," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 15, pp. 5066-5072, 2011.
- [11] L. Tóth, M. Arzaghi, J. Fundenberger, B. Beausir, O. Bouaziz, and R. Arruffat-Massion, "Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting," *Scripta Materialia*, vol. 60, no. 3, pp. 175-177, 2009.
- [12] R. Lapovok, H. P. Ng, D. Tomus, and Y. Estrin, "Bimetallic copper-aluminium tube by severe plastic deformation," *Scripta Materialia*, vol. 66, no. 12, pp. 1081-1084, 2012.
- [13] O. Shapourgan, and G. Faraji, "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*, vol. 230, no. 10, pp. 1845-1854, 2016.
- [14] V. Shatermashhadi, B. Manafi, K. Abrinia, G. Faraji, and M. Sanei, "Development of a novel method for the backward extrusion," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 62, pp. 361-366, 2014.
- [15] V. Segal, "Materials processing by simple shear," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 197, no. 2, pp. 157-164, 1995.

- [16] M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, and T. Langdon, "Processing of metals by equal-channel angular pressing," *Journal of materials science*, vol. 36, no. 12, pp. 2835-2843, 2001.
- [17] T. G. Langdon, M. Furukawa, M. Nemoto, and Z. Horita, "Using equal-channel angular pressing for refining grain size," *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, vol. 52, no. 4, pp. 30-33, 2000.
- [18] S. Yoon, P. Quang, S. Hong, and H. Kim, "Die design for homogeneous plastic deformation during equal channel angular pressing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187, pp. 46-50, 2007.
- [19] D. Yamaguchi, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, "Significance of adiabatic heating in equal-channel angular pressing," *Scripta materialia*, vol. 41, no. 8, pp. 791-796, 1999.
- [20] A. Yamashita, D. Yamaguchi, Z. Horita, and T. G. Langdon, "Influence of pressing temperature on microstructural development in equal-channel angular pressing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 287, no. 1, pp. 100-106, 2000.
- [21] F. Djavanroodi, M. Daneshtalab, and M. Ebrahimi, "A novel technique to increase strain distribution homogeneity for ECAPed materials," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 535, pp. 115-121, 2012.
- [22] M. Shaeri, F. Djavanroodi, M. Sedighi, S. Ahmadi, M. Salehi, and S. Seyyedein, "Effect of copper tube casing on strain distribution and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 48, no. 8, pp. 512-521, 2013.
- [23] F. Djavanroodi, A. A. Zolfaghari, M. Ebrahimi, and K. Nikbin, "Route effect on equal channel angular pressing of copper tube," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 27, no. 1, pp. 95-100, 2014.
- [24] F. Djavanroodi, A. Zolfaghari, and M. Ebrahimi, "Experimental investigation of three different tube equal channel angular pressing techniques," *Kovove Mater*, vol. 53, pp. 27-34, 2015.
- [25] F. Al-Mufadi, and F. Djavanroodi, "Equal-Channel Angular Pressing of Thin-Walled Copper Tube," Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV), vol. 40, no. 9, 2015.
- [26] D. Jafarlou, E. Zalnezhad, M. Hassan, M. Ezazi, N. Mardi, A. Hamouda, M. Hamdi, and G. Yoon, "Severe plastic deformation of tubular AA 6061 via equal channel angular pressing," *Materials & Design*, vol. 90, pp. 1124-1135, 2016.
- [27] D. Jafarlou, E. Zalnezhad, M. Ezazi, N. Mardi, and M. Hassan, "The application of equal channel angular pressing to join dissimilar metals, aluminium alloy and steel, using an Ag–Cu–Sn interlayer," *Materials & Design*, vol. 87, pp. 553-566, 2015.
- [28] F. Djavanroodi, A. Zolfaghari, M. Ebrahimi, and K. Nikbin, "Equal channel angular pressing of tubular samples," *Acta Metall. Sin.(Engl. Lett.)*, vol. 26, no. 5, pp. 574-580, 2013.
- [29] J. Valder, M. Rijesh, and A. Surendranathan, "Failure Analysis of Cast Tubular Specimens of Al–5Zn–1Mg While Processing at Room Temperature by Equal Channel Angular Pressing (ECAP)," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 14, no. 5, pp. 690-695, 2014.
- [30] J. Valder, M. Rijesh, and A. Surendranathan, "Forming of tubular commercial purity aluminum by ECAP," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 9, pp. 986-989, 2012.

[31]	S. Ghadimi, M. Sedighi, F. Djavanroodi, and A. Asgari, "Experimental and
	numerical investigation of a Cu-Al bimetallic tube produced by ECAP,"
	Materials and Manufacturing Processes, vol. 30, no. 10, pp. 1256-1261, 2015.

- [32] S. Lee, and K. Kim, "A densification model for powder materials under cold isostatic pressing—Effect of adhesion and friction of rubber molds," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 498, no. 1, pp. 359-368, 2008.
- [33] J. E. Mark, B. Erman, and M. Roland, *The science and technology of rubber*: Academic press, 2013.
- [34] I. Galvão, J. Oliveira, A. Loureiro, and D. Rodrigues, "Formation and distribution of brittle structures in friction stir welding of aluminium and copper: Influence of shoulder geometry," *Intermetallics*, vol. 22, pp. 122-128, 2012.
- [35] Q.-z. Zhang, W.-b. Gong, and L. Wei, "Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al–Cu joints by friction stir welding," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 6, pp. 1779-1786, 2015.
- [36] R. Valiev, I. Alexandrov, Y. Zhu, and T. Lowe, "Paradox of strength and ductility in metals processed bysevere plastic deformation," *Journal of Materials Research*, vol. 17, no. 1, pp. 5-8, 2002.









Abstract

Producing of Ultrafine Grained Metals (UFG) has attracted much attention in the industry and the scientific community due to their superior mechanical properties. One of these methods is equal channel angular pressing (ECAP), which can be repeated many times due to unchangeability of the sample cross section. The aim of this thesis is to study ECAP process for copper-aluminum bimetallic tube with length of 50 mm and outer diameters of 12 and 10 mm, respectively. After some preliminary trial testes, the need for application of backpressure was observed. Therefore, for application of the backpressure in the exit, the necessary tooling was designed and fabricated. The angle between two channels was selected equal to $\varphi = 90^{\circ}$. Considering the nature of the tube, to avoid crushing as well as loss of its internal dimensions, Viton rubber- and copper rod -mandrels were inside the tube. The process was performed with Viton rubber and copper rod from ambient to a maximum operating temperature of 150 °C with a backpressure ranging from 50 to 400 MPa. Due to the undesirable results, the process temperature was increased to 200 °C and 250 °C with backpressures of 50, 100 and 200 MPa. Owing to the limited working temperature of the Viton rubber, only the copper rod was used for the later testes ECAP of aluminum-copper bimetallic tubes at temperatures of 200 °C and 250 °C using a backpressure of 50 and 100 MPa, was successfully performed for 3 passes under route $B_{\rm C}$, in which after each pass, the samples were rotate 90 ° along the longitudinal axis in a same direction and ECAP process was repeated. The effect of process parameters on the microstructure, hardness and wall thickness of the samples were studied. The micro-Vickers hardness test results showed that after three passes of ECAP the hardness of aluminum tube with a value of 40 HV increased by 118% to 87 HV. Similarly, the initial hardness of copper tube 63 HV increased by 106% to 131 HV. Also, Finite element analysis (FEA) using Abaqus software was carried out with Viton rubber- and copper rod -mandrels at ambient temperature. The results obtained were verified to be in good agreement with experimental results.

Key words: Bimetallic tube, ECAP, SPD, UFG metals.



M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

Experimental and numerical study on equal channel angular pressing of bimetallic tube

By: Arash Pooladsanj

Supervisor: Dr. Seyed Hadi Ghaderi

January 2018