



شبیه‌سازی عددی فرآیند و ساخت پوسته جدار نازک مسی به روش جدید اتوکشی محدودشده

آریا کاظمزاده^۱، قادر فرجی^{۲*}

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: ghfaraji@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۵ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۶ بهمن ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

اتوکشی محدودشده
شبیه‌سازی المان محدود
ریزساختار
درصد کاهش ضخامت
خواص مکانیکی

چکیده

یکی از فرایندهای پرکاربرد در صنعت شکل‌دهی، فرآیند اتوکشی است که معمولاً به‌عنوان فرآیند ثانویه پس از فرآیند کشش عمیق کاربرد دارد. فرآیند اتوکشی به‌منظور کاهش ضخامت دیوار، یکسان کردن توزیع ضخامت و همچنین افزایش طول مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بین روش‌های ارائه شده روش اتوکشی محدود شده بالاترین نسبت کاهش ضخامت را ارائه می‌دهد. اساس این روش تبدیل تنش کششی فرآیند اتوکشی سنتی به تنش فشاری است. درصد کاهش ضخامت ۶۵ درصد برای این پژوهش در نظر گرفته شده است به کمک نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی شده و پوسته مسی جدار نازک با این روش ساخته شده است. در نهایت مشخص شده به دلیل تبدیل تنش‌های کششی به تنش فشاری علاوه بر امکان دستیابی به کاهش ضخامت‌های بالا این فرآیند موجب بهبود خواص مکانیکی پوسته شده است. این فرآیند به دلیل اعمال تنش فشاری و کرنش بالا به پوسته منجر به ریز شدن اندازه دانه و همچنین کشیده شدن آن شده است که بر روی خواص مکانیکی تاثیرگذار بوده به‌نحوی که سختی نمونه از ۴۸ ویکرز به ۱۳۰ ویکرز رسیده است همچنین این فرآیند منجر به افزایش ۱۲۰ درصدی استحکام کششی شده است.

Numerical Simulation and fabrication of copper thin wall tube by constrained ironing method

Arya Kazemzadeh¹, Ghader Faraji^{2*}

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: ghfaraji@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 5 January 2024

Accepted: 5 February 2024

Keywords:

Constrained Ironing
Thickness Reduction Percentage
Finite Element Method
Microstructure
Mechanical Properties

Abstract

One of the most widely used metal forming processes is Ironing, which is usually used as a secondary process after the deep drawing process. The Ironing process is used to reduce the wall thickness, equalize the thickness distribution of the wall, and also increase the length of the workpiece. Among the developed methods, the constrained Ironing method has provided the highest thickness reduction ratio. This method is based on converting the tensile stress to compressive stress in the deformation area. The thickness reduction percentage of 65% has been considered for this research which is simulated by the FEM method and after that experimental sample has been made by this method. Finally, due to the conversion of stress in the deformation area, this method provides the possibility of achieving a higher thickness reduction, and the mechanical properties of the sample were improved. This process, due to the application of compressive stress and high strain to the shell, has led to the reduction of the grain size and also its stretching, which has affected the mechanical properties in such a way that the microhardness of the sample has reached from 48 Vickers to 130 HV. Also, this process leads to a 120% increase in tensile strength.

Please cite this article using:

Kazemzadeh A, Faraji Gh. Numerical Simulation and fabrication of copper thin wall tube by constrained ironing method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 October 23;10(8):20-26. doi: 10.22034/IJME.2024.434030.1899 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

فرآیند اتوکشی از جمله فرایندهایی است که در صنعت مورد استفاده زیادی قرار می‌گیرد. طبق تعریف ASM اتوکشی عبارت است از کاهش ضخامت یک پوسته به وسیله محدود کردن پوسته بین سنبه و ماتریس [۱]. در فرآیند اتوکشی سنتی یک پوسته به دور سنبه‌ای پیچیده شده است که قطر داخلی آن برابر با قطر سنبه است. با حرکت نسبی مجموعه سنبه-پوسته نسبت به ماتریس قطر خارجی پوسته کاهش یافته و برابر با قطر داخلی ماتریس می‌گردد. اساس شکل‌دهی در این فرآیند تنش کششی است که به واسطه حرکت نسبی سنبه و ماتریس و تماس پوسته با دیواره قالب ایجاد می‌گردد. از مشکلات اصلی این فرآیند محدودیت در درصد کاهش ضخامت بوده که دلیل آن کشش دیواره پوسته است. در صورت عبور درصد کاهش ضخامت از حد مجاز تنش کششی دیواره پوسته بالا رفته و به ناحیه گلوبی نزدیک می‌شود که در نهایت منجر به پارگی پوسته می‌گردد. به همین جهت برای دستیابی به درصد کاهش ضخامت‌های بالا نیاز به چند مرحله‌ای کردن فرآیند و آنیل‌های بین پاسی است. به همین دلیل برخی پژوهشگران تلاش نموده‌اند که با ارائه روش‌های جدید و یا بهینه کردن پارامترهای مؤثر در فرآیند اتوکشی، درصد کاهش ضخامت را افزایش و نیروی انجام فرآیند را کاهش دهند.

مدانلو و همکاران [۲] پژوهشی به صورت شبیه‌سازی و ساخت نمونه آزمایشگاهی با محوریت بررسی توزیع ضخامت در فرآیند کشش عمیق و پارامترهای مؤثر بر آن انجام داده‌اند که مشخص شده است که عواملی همچون ضریب اصطکاک بین ورق، ورق‌گیر، سنبه و قالب و همچنین فاصله بین ورق‌گیر و ورق بر توزیع ضخامت فنجان پس از انجام فرآیند تأثیر گذارند.

در سال ۲۰۲۲ مدانلو و همکاران [۳] با بررسی اثر فشار سیال و زاویه لبه سنبه در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیک در صد بهینه‌سازی نیروی سنبه در این فرآیند برآمدند که نتیجه این پژوهش کاهش نیروی سنبه تا ۵۵ درصد با کاهش فشار سیال و همچنین با کاهش شعاع لبه مقدار نیروی سنبه تا ۵۵ درصد کاهش یافته است.

در سال ۱۹۹۴ مورتی و همکاران [۴] روش جدید برای اتوکشی ارائه نمودند که در این روش ماندلر انعطاف‌پذیر جایگزین ماندلر فلزی شده است. همچنین در این پژوهش امکان استفاده از قالب‌های چند مرحله‌ای نیز بررسی شده است. پیکربندی قالب به این گونه است که ماندلری انعطاف‌پذیر در داخل پوسته قرار گرفته و سنبه‌ای هم‌قطر با پوسته به آن‌ها فشار وارد می‌کند. با اعمال فشار توسط سنبه فشار داخلی توسط ماندلر انعطاف‌پذیر به دیواره پوسته وارد می‌شود و همچنین حرکت سنبه منجر به حرکت پوسته-ماندلر و انجام فرآیند می‌شود. در نهایت مشخص شده که این روش برای پوسته‌هایی با ضخامت ۲ الی ۴ میلی‌متری غیر آهنی صرفه اقتصادی دارد و همچنین سختی ماندلر عاملی اثرگذار بر درصد کاهش ضخامت نهایی است.

در سال ۲۰۰۲ کامپوز و همکاران [۵] روشی جدید جهت انجام فرآیند اتوکشی ارائه نمودند. در این روش نیرویی اضافی بر لبه پوسته تحت انجام فرآیند اعمال می‌شود که منجر به افزایش کارپذیری پوسته خواهد شد. نیروی اضافی منجر به اضافه شدن فشار به پوسته شده که عامل هدایت پوسته به ناحیه تغییر شکل می‌شود. آزمایش‌ها به کمک نرم‌افزار المان محدود و همچنین تئوری الاستیسیته انجام شده و سپس نتایج تئوری با عملی مقایسه شده‌اند. پژوهشگران در این تحقیق موفق به ساخت پوسته‌هایی با ضخامت غیریکنواخت چه از داخل و چه از خارج مطابق شکل شده‌اند و در این تحقیق مدعی شده‌اند که می‌توان با این روش پوسته‌ای ساخت که در برخی نواحی ضخامت کنترل شده است. با اضافه کردن نیروی اضافی بر روی لبه پوسته کرنش اعمالی به قطعه می‌تواند تا ۴۰ درصد افزایش یابد که در نهایت به درصد کاهش ضخامت در حدود ۳۰ درصد رسیده‌اند. همچنین ایشان رابطه‌ای برای نیروی انجام فرآیند ارائه نموده‌اند که در صورت صفر در نظر گرفتن نیروی اضافی قابل‌تعمیم به روش سنتی نیز است.

روش اتوکشی هیدرواستاتیک توسط تیروش و همکاران [۶] در سال ۱۹۹۲ بیان گردید. در این روش سعی شده است تا با تبدیل تنش کششی به تنش فشاری به درصد کاهش ضخامت‌های بالاتر دسترسی پیدا کرد. به همین جهت از یک سنبه و فنجان و ماتریس معمول استفاده شده است با این تفاوت که در اطراف فنجان فشار هیدرواستاتیک اعمال می‌شود که منجر به ایجاد تنش فشاری در قطعه خواهد شد. به جهت انجام فرآیند از یک قالب با توان اعمال فشار در حدود ۶۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است. انجام فرآیند به این صورت است که پس از اعمال فشار و رسیدن فشار به اندازه تعیین‌شده، سنبه و فنجان شروع به حرکت نموده و با ایجاد تنش کششی در فنجان، پوسته به دور سنبه پیچیده شده و عملیات اتوکشی انجام می‌پذیرد. در این روش به درصد کاهش ضخامت حدود ۵۶ درصد رسیده‌اند.

شیرازی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۵ روشی جدید به جهت اتوکشی پوسته‌ها ارائه نمودند که بخشی از ضعف‌های روش اتوکشی هیدرواستاتیک را مرتفع نموده است. در این روش برخلاف روش اتوکشی هیدرواستاتیک سنبه داخلی عملیات اتوکشی را انجام می‌دهد. در واقع قطر سنبه بزرگ‌تر از قطر داخلی پوسته بوده و فشار هیدرواستاتیک از داخل به پوسته اعمال می‌شود. فشار موجود در داخل قطعه منجر به ایجاد تنش فشاری در پوسته شده و همچنین منجر به روان کاری در ناحیه شکل‌دهی نیز می‌شود. پوسته در قالب به کمک ورق گیرهایی از بیرون محدود شده و مقید شده و از حرکت آن جلوگیری می‌شود، سپس با اعمال فشار و شروع حرکت نسبی سنبه نسبت به پوسته به دلیل بزرگ‌تر بودن سنبه منجر به کشیده شدن پوسته و انجام فرآیند اتوکشی می‌شود. محققان با این روش به درصد کاهش ضخامت حدود ۷۰ درصد دست یافته‌اند اما این روش مشکلاتی نیز دارد که از آن جمله می‌توان به آب‌بندی فشار سیال داخل، تنش کششی بالا و تمرکز تنش در ناحیه مقید کردن لبه فلنج و همچنین تجهیزات پیچیده جهت انجام فرآیند اشاره نمود.

آخرین روش ارائه شده جهت افزایش درصد کاهش ضخامت توسط خودستان و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۵ ارائه شده است که روش اتوکشی محدود شده نام‌گذاری شده است. در این روش از یک سنبه و ماتریس استفاده شده که لبه انتهایی پوسته توسط سنبه و اطراف آن توسط ماتریس محدود شده است. مطابق شکل ۱-الف با حرکت سنبه تنش فشاری در ناحیه تغییر شکل ایجاد می‌شود و با ادامه حرکت سنبه پوسته از فضای بین سنبه و ماتریس خارج می‌شود. این روش به دلیل حذف کامل تنش کششی و تبدیل آن به تنش فشاری قابلیت افزایش درصد کاهش ضخامت به مقادیر بالا را دارا است چراکه نیروی اعمالی از طریق سنبه و دیواره ماتریس باعث افزایش کارپذیری پوسته شده و امکان اتوکشی مواد ترد را نیز فراهم می‌نماید.

۲- مواد و روش‌ها

در ابتدا برای شبیه‌سازی فرآیند نیاز است تا فنجان مدنظر با قطر ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر از طریق فرآیند کشش عمیق ساخته شود. به جهت کاهش تمرکز تنش و جلوگیری از پارگی ورق در ناحیه شعاع سنبه، شعاع سنبه بزرگ در نظر گرفته شده است. شکل ۱-الف هندسه در نظر گرفته شده برای فنجان را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن فرمول‌های ارائه شده در هندبوک طراحی قالب [۹] قطر بلانک اولیه ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جنس ماتریس قالب کشش عمیق M040 است که با توجه به شمار پایین و نیروی کم فرآیند سخت‌کاری نشده است. اما جنس سنبه VCN150 است که همین سنبه در فرآیند اتوکشی مورد استفاده قرار می‌گیرد به همین جهت با کوره القایی تا ۶۰۰ راکول سخت شده است.

پس از انجام فرآیند کشش عمیق به جهت کاهش نیروی انجام فرآیند اتوکشی فنجان کشش عمیق شده در دمای ۶۰۰ درجه به مدت ۱ ساعت آنیل شده و سپس با نرخ ۱۰۰ درجه بر ساعت تا دمای ۱۵۰ درجه سرد شده است.

جهت انجام فرآیند اتوکشی ابتدا فرآیند در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی خواص مس آنیل شده در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی زاویه قالب و ضریب اصطکاک به‌عنوان پارامترهای متغیر و درصد کاهش ضخامت ۸۰ درصد بوده است. شبیه‌سازی به صورت تقارن محوری انجام شده و ماتریس به صورت فیکس و به سنبه سرعت حرکتی اعمال شده است تا در نهایت نیروی فرآیند از نقطه مرجع سنبه خوانده شود. همچنین با توجه به کرنش بالای پوسته از تکنیک ALE برای شبیه‌سازی استفاده شده است. پس از شبیه‌سازی و مشخص شدن پارامترهای اصلی قالب مدنظر ساخته شده است که جنس قالب اتوکشی از VCN150 بوده که تا ۶۰ راکول سخت‌کاری شده است و سنبه مورد استفاده نیز همان سنبه کشش عمیق است.



شکل ۱ الف) شماتیک قالب اتوکشی محدود شده، ب) سنبه فرآیند اتوکشی محدود شده، ج) ماتریس فرآیند اتوکشی محدود شده، د) شماتیک قالب اتوکشی در نرم افزار آباکوس

جدول ۱ پارامترهای شبیه‌سازی

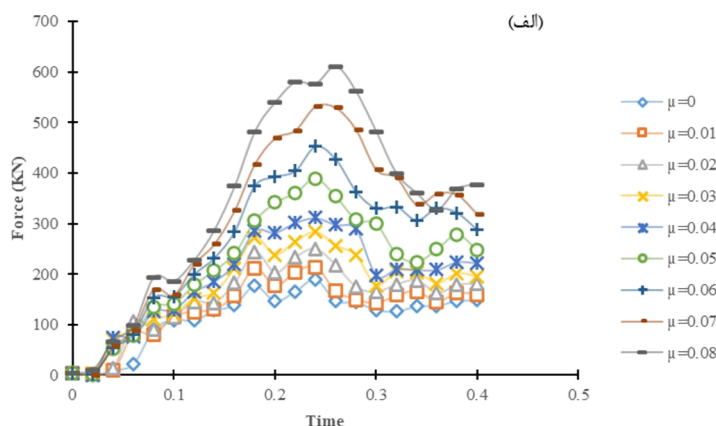
تقارن محوری	نحوه تعریف قطعات
مس خالص	جنس
غیر وابسته (مستقل)	نحوه مونتاژ
میلی‌متر	اندازه مش روی پوسته
۱۰-۴۵ درجه با گام ۵ درجه	بازه تغییرات زاویه قالب
۰ تا ۰,۰۸ با گام ۰,۰۱	بازه تغییرات ضریب اصطکاک

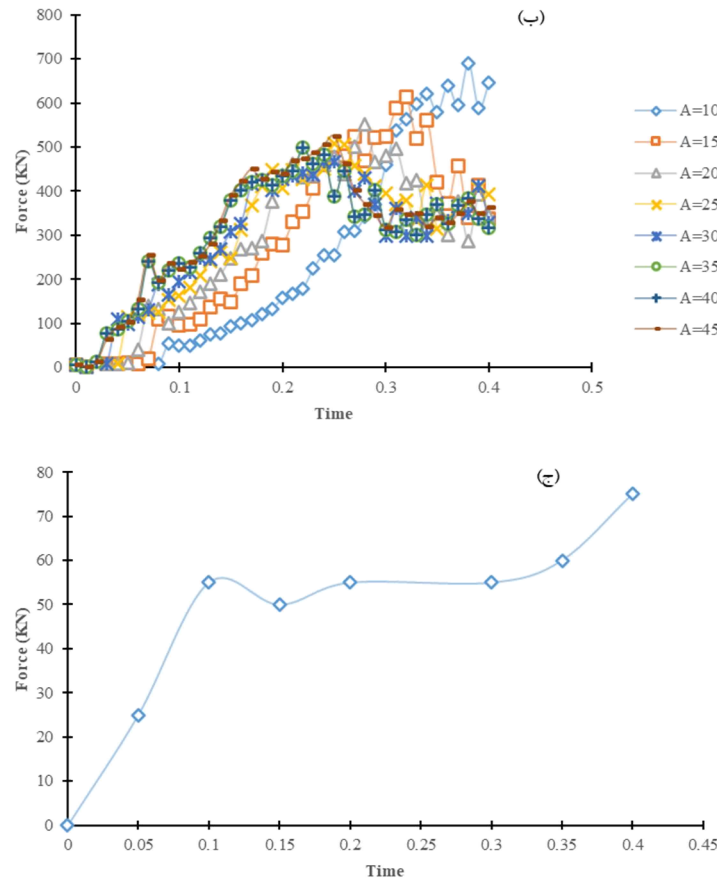
پس از آزمون عملی فرآیند و ساخت نمونه، آزمون کشش و سختی بر روی نمونه آنیل شده و نمونه اتوکشی محدود شده انجام شده است. همچنین متالوگرافی به منظور تغییرات ریزساختار نیز انجام شده تا در نهایت اثر فرآیند بر روی تغییرات خواص مکانیکی پوسته نیز مشخص گردد.

۳- نتایج و بحث

برای شبیه‌سازی اثر زاویه قالب ضریب اصطکاک برابر با از صفر تا ۰/۰۸ در نظر گرفته شده است و همچنین تاثیر ضریب اصطکاک بر نمودار نیرو مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳-الف تاثیر ضریب اصطکاک بر نیروی فرآیند را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب اصطکاک نیروی فرآیند به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. پس از انجام آزمایشات عملی مشخص شد که نیرویی که برای انجام فرآیند مورد نیاز است معادل است با نیرویی که در شبیه‌سازی‌ها برای ضریب اصطکاک ۰/۰۸ به دست آمده است. به همین ترتیب از زاویه ۱۰ الی ۴۵ درجه برای ناحیه شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نمودار نیروی سنبه گزارش شده است. شکل ۲-ب نمودار نیروی سنبه در زوایای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود زاویه ۳۰ درجه زاویه‌ای است که کمترین قله‌ی نیروی سنبه را دارد. این نمودار گویای این است که زاویه قالب مقداری بهینه دارد که کمتر و بیشتر از آن نیرو افزایش می‌یابد. در زوایای کمتر به دلیل بیشتر شدن سطح تماس در ناحیه شکل‌دهی اثر اصطکاک زیاد می‌شود و نیرو نیز افزایش می‌یابد. در زوایای بالاتر نیز دلیل افزایش نیرو جریان ماده است.

به همین ترتیب زاویه قالب نهایی ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است. تاثیر اثر اصطکاک در زاویه قالب ۳۰ درجه نیز بررسی شده است. پس از ساخت قالب و انجام عملی فرآیند مشخص شده است که نیروی سنبه طبق نمودار پیش‌بینی شده پیش نرفته است. بر اساس نمودار نیروی سنبه پس از گذر از قله کاهش می‌یابد اما در واقعیت به دلیل افزایش اثر کار سرد روی نمونه نیرو پس از یکسان بودن در بازه مشخص شده، به صورت صعودی افزایش می‌یابد. شکل ۲-ج نمودار نیرو جابجایی نمونه عملی است. مقایسه نمودار تئوری و عملی بیانگر این است که ضریب اصطکاک در حالت عملی مطابق با ضریب اصطکاک ۰/۰۸ است.





شکل ۲ الف) نمودار نیرو-جابجایی سنبه با زاویه قالب ۳۰ درجه و ضرایب اصطکاک متفاوت، ب) نمودار نیرو-جابجایی سنبه با ضریب اصطکاک ۰/۰۸ و زوایای قالب متفاوت، ج) نمودار نیرو-جابجایی سنبه تجربی

شکل ۳- الف و ب به ترتیب تصویر نمونه اتوکشی محدود شده و نمونه کشش عمیق شده را نشان می‌دهند. شکل ۳- ب نمونه کشش عمیق شده است که پس از فرآیند اتوکشی محدود شده طول آن افزایش یافته و به ۷۲ میلی‌متر رسیده است. بر اساس معادلات حجم ثابت طول نمونه اتوکشی شده باید ۸۸ میلی‌متر باشد اما به دلیل اینکه قسمتی از قطعه در ناحیه تغییر شکل گیر می‌کند و امکان خارج کردن آن وجود ندارد برای به دست آوردن نمونه باید بریده شود.



شکل ۳ الف) نمونه نهایی پس از فرآیند اتوکشی محدود شده (راستای سختی سنجی در تصویر مشخص شده است که نقاط ۱ تا ۷ به ترتیب از پایین تا بالای پوسته تعیین گردیده‌اند)، ب) فنجان کشش عمیق شده

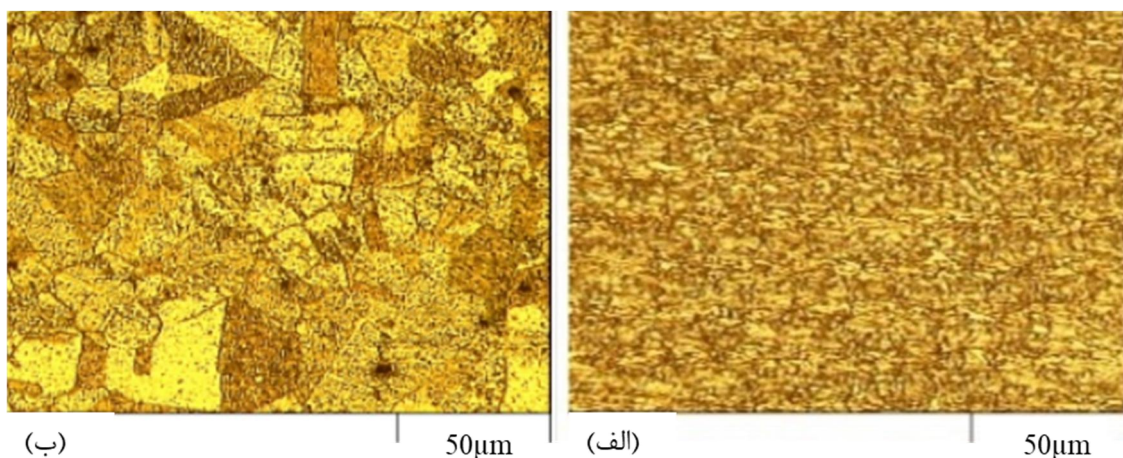
در نهایت نمونه نهایی اتوکشی شده مورد بررسی قرار گرفته است و یک نمونه ورق آنیل شده و دیواره نمونه اتوکشی محدود شده تحت آزمون کشش، سختی و متالوگرافی قرار گرفته‌اند. نتایج آزمون کشش حاکی از آن است که استحکام کششی نمونه به ۴۴۰ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول نسبی آن ۸ درصد رسیده است. این در حالی است که نمونه آنیل شده دارای استحکام کششی ۲۰۹ مگاپاسکال با درصد ازدیاد طول نسبی ۵۰ درصد است. به همین ترتیب آزمون سختی از نمونه گرفته شده است که جدول ۲ نتایج آن را نشان می‌دهد. سختی نمونه اولیه آنیل شده ۴۸ ویکرز بوده است و پس از انجام فرآیند به میانگین ۱۳۰ ویکرز رسیده است.

جدول ۲ نتیجه آزمون میکرو سختی سنجی در راستای طول طبق استاندارد ASTM E 387-17

ردیف	موقعیت سختی سنجی	نیروی اعمالی (kgf)	عدد سختی (HV)
۱	نقطه ۱	۱۰	۱۲۶
۲	نقطه ۲	۱۰	۱۲۵
۳	نقطه ۳	۱۰	۱۲۴
۴	نقطه ۴	۱۰	۱۳۰
۵	نقطه ۵	۱۰	۱۲۴
۶	نقطه ۶	۱۰	۱۳۸
۷	نقطه ۷	۱۰	۱۳۶

پس از بررسی نمونه از لحاظ استحکام کششی و سختی ریزساختار نمونه آنیل شده و اتوکشی شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل کرنش بالایی که به نمونه در فرآیند اتوکشی اعمال می‌شود اندازه دانه‌های نمونه در راستای طول کشیده شده و در راستای ضخامت پوسته دانه‌ها ریزتر شده که در اثر کرنش بالا و فشار هیدرواستاتیک است که در طول فرآیند به پوسته اعمال می‌شود. کرنش اعمالی به قطعه در این فرآیند هم نرمال و هم برشی است.

شکل ۴-ب نتیجه متالوگرافی نمونه آنیل شده و شکل ۴-الف نتیجه متالوگرافی نمونه اتوکشی شده در راستای ضخامت است که تغییر ابعاد دانه‌ها و افزایش مرز دانه کاملاً مشهود است. اندازه دانه نمونه از حدود ۶۰ میکرون اولیه به کمتر از یک میکرون کاهش پیدا کرده است. طبق رابطه هال-پچ [۱۰-۱۲] ریز شدن ساختار و افزایش مرز دانه‌ها و همچنین چگالی نابجایی دلیلی برافزایش استحکام نمونه است که توجیه مناسبی برای نتایج آزمون کشش و سختی نمونه نیز است.



شکل ۴ الف) متالوگرافی سطح مقطع نمونه اتوکشی محدودشده، ب) متالوگرافی نمونه آنیل شده

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، ابتدا شکل دهی فنجان مسی به کمک یک قالب کشش عمیق صورت گرفت، سپس به وسیله یک دست قالب اتوکشی محدود شده فرآیند اتوکشی فنجان مسی انجام گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون‌های مکانیکی و همچنین نتایج حاصل از آزمایشات عملی و شبیه‌سازی فرآیند اتوکشی محدود شده می‌تواند در یک مرحله کاهش ضخامت ۸۰ درصد ایجاد نماید که در مقایسه با روش سنتی فعلی مورد استفاده در صنایع بسیار قابل توجه است از این جهت که در صنایع امروزی برای درصد کاهش ضخامت‌های بالای ۲۵ درصد از قالب‌های چندمرحله‌ای با هزینه گزاف استفاده می‌شود که علاوه بر هزینه‌های مربوط به ساخت قطعات و دقت‌های بالای مورد نیاز برای مونتاژ، زمان انجام فرآیند نیز به دلیل نیاز به آنیل‌های بین‌پاسی نیز بالاتر می‌باشد. همچنین بررسی نتایج نشانگر این است که زاویه قالب بهینه ۳۰ درجه است که در این زاویه نسبت به سایر زوایایی مورد بررسی قرار گرفته، نیرو در کمینه‌ترین حالت خود می‌باشد. پس از انجام آزمایشات عملی مشخص شد که نیرویی که برای انجام فرآیند مورد نیاز است معادل است با نیرویی که در شبیه‌سازی‌ها برای ضریب اصطکاک ۰/۰۸ به دست آمده است. این فرایند از لحاظ دقت ابعادی نیز دقت مناسبی دارد که وابسته به دقت ساخت قالب می‌باشد. نتایج آزمایش‌های مکانیکی و متالورژیکی نشان داد که این فرایند قابلیت بهبود قابل توجه خواص مکانیکی نمونه را نیز دارا می‌باشد که در نمونه آزمایش شده در این پژوهش به دلیل کار سرد اعمال شده بر نمونه استحکام کششی نمونه دستخوش افزایش ۱۱۰ درصدی شده است. همچنین سختی نمونه نیز ۱۷۰ درصد افزایش داشته است. دستیابی به هندسه دلخواه یعنی طول زیاد و ضخامت دیواره کم برای برخی مواد مثل مس که به جهت تولید پوسته‌های بدون درز مورد استفاده در صنایع می‌تواند مفید باشد که پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه اتوکشی محدود شده حاکی از آن است که این روش می‌تواند در صنایع مورد استفاده قرار گیرد.

References

- [1] Handbook A. Forming and forging. ASM international. 1988;14:483.
- [2] Modanloo V, Akhoundi B, Mashayekhi A, Talebi Ghadikolaee H, A.Z. Beygi. The study of forming of steel cups using hydrodynamic deep drawing process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Mar 5;9:56-64. doi: 10.22034/IJME.2023.385634.1748 [In persian]
- [3] Modanloo V, Akhoundi B, Dadgar Asl Y. Minimizing the required forming force in the sheet hydroforming process using a fractional factorial design. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 jun 27;9:1-9. doi: 10.22034/IJME.2023.400065.1788 [In persian]
- [4] Murty S, Sekhar VC. Experimental and theoretical investigation of the flexible-mandrel ironing process. Journal of Materials Processing Technology. 1993 may 5;41(2):213-26. doi: 10.1016/0924-0136(94)90062-0
- [5] Kampuš Z, Nardin B. Improving workability in ironing. Journal of materials processing technology. 2002 oct 11;130:64-8. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00783-5
- [6] Tirosh J, Iddan D, Silviano M. Hydrostatic ironing—analysis and experiments. journal of manufacturing and engineering. 1992 May 1;114(2):237-43. doi: 10.1115/1.2899777
- [7] Shirazi A, Abrinia K, Faraji G. Hydroironing: a novel ironing method with a higher thickness reduction. Materials and Manufacturing Processes. 2014 Sep 29;30(1):99-103. doi: 10.1080/10426914.2014.962659
- [8] Khodsetan M, Faraji G, Abrinia K. A novel ironing process with extra high thickness reduction: constrained ironing. Materials and Manufacturing Processes. 2015 Jun 15;30(11):1324-8. doi: 10.1080/10426914.2015.1037898
- [9] Suchy I. Handbook of die design: McGraw-Hill Education; 2006.
- [10] Faraji G, Kim HS, Kashi HT. Severe Plastic Deformation: Methods, Processing and Properties. Elsevier; 2018 Jul 14. doi: 10.1016/C2016-0-05256-7
- [11] Faregh SM, Faraji G, Mashhadi MM, Eftekhari M. Texture evolution and mechanical anisotropy of an ultrafine/nano-grained pure copper tube processed via hydrostatic tube cyclic expansion extrusion. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2022 Nov 4;29(12):2241-2251. doi: 10.1007/s12613-022-2514-4
- [12] Eftekhari M, Faraji G, Bahrami M. Processing of commercially pure copper tubes by hydrostatic tube cyclic extrusion-compression (HTCEC) as a new SPD method. achives of civil and mechanical engineering. 2021 Jul 28;21(120). doi: 10.1007/s43452-021-00272-w