

پیش‌بینی شکست در شکل‌دهی تانتالوم

علی اکبر شبانی^{۱*}، سید عبدالصمد جوانمرد^۲ و نجمه احمدیان^۳

چکیده

فرآیندهای شکل‌دهی فلزات در بین روش‌های تولید، از جایگاهی ویژه برخوردار است که پیشرفت‌های زیادی در تمام زمینه‌های آن شده است. پیش‌بینی نتایج فرآیندها، منجر به افزایش بهره‌وری و دقت و کاهش هزینه‌ها خواهد شد. یکی از روش‌های پیش‌بینی، نمودار حد شکل‌دهی است که این نمودار ابزاری موثر جهت ارزیابی حد کرنش و تعیین ناحیه شکست در شرایط گوناگون شکل‌دهی می‌باشد. از آنجایی که فلز خالص تانتالوم با دمای ذوب 2996°C یکی از فلزات دیرگداز و بسیار گرانبه‌است، بررسی شکل‌پذیری و استخراج نمودار حد شکل‌دهی آن، در صنعت از اهمیتی بالا برخوردار است. در این پژوهش خواص شکل‌پذیری فلز تانتالوم مورد بررسی قرار گرفته و نمودار حد شکل‌دهی آن بدست آمده است. بدین منظور آزمایش‌های اریکسون و فشار بر روی نمونه‌های تانتالوم انجام شد و با استفاده از نتایج آن‌ها نمودارهای حد شکل‌دهی بدست آمد که این نمودارها هم‌خوانی خوبی با یک‌دیگر داشته و هم‌دیگر را تایید می‌کردند. همچنین آزمایش کشش انجام گردید و نمودار تنش-کرنش حقیقی، ثابت کرنش سختی (n) و ضریب استحکام برای تانتالوم بدست آمد که نزدیک بودن مقدار بدست آمده برای n ، به نقطه کمینه نمودار حد شکل‌دهی تاییدی بر صحت نمودار بدست آمده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تانتالوم، نمودار حد شکل‌دهی، آزمایش اریکسون، آزمایش فشار، آزمایش کشش.

۱- مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهقان، گروه مکانیک، دهقان، ایران

۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت- گروه مهندسی مکانیک، مرودشت، ایران

۳- مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهقان، دهقان، ایران

* نویسنده مسئول مقاله: Ali_Akbar_Shabani@yahoo.com

پیشگفتار

فرآیند شکل‌دهی فلزات یکی از روش‌های اصلی تولید است که در صنعت از اهمیتی ویژه برخوردار است. شکل‌دهی ورق یک کلاس خاص از شکل‌دهی فلزات است و مربوط به حالتی است که ضخامت قطعه فلزی در برابر ابعاد دیگر آن کوچک باشد. شکل‌پذیری ورق قابلیت آن برای تغییر شکل بدون پارگی و گلویی شدن تعریف می‌شود [۱]. از آنجایی که آزمایش، عیب‌یابی و بهینه‌سازی این گونه فرآیندها بسیار با اهمیت است، اما پرهزینه و زمان‌بر است، پیش‌بینی نتیجه عملیات، پیش از ساخت قالب‌ها، سبب کاهش هزینه‌ها و بهبود چرخه تولید خواهد شد. به همین جهت، استفاده از روش‌های پیش‌بینی فرآیندهای شکل‌دهی از جمله پیش‌بینی فرآیند شکل‌دهی ورق سرعت رو به رشدی پیدا کرده است.

از میان ورق‌های فلزی معمولاً ورق‌های فلزات دیر گداز کم‌تر شناخته شده‌اند. از این رو داده‌های کمی در مورد خواص این فلزات و از جمله در مورد خاصیت شکل‌پذیری آنان موجود می‌باشد، اما هر گاه در صنعت منابع حرارتی با دماهای بسیار زیاد بکار رود استفاده از فلزات دیر گداز ضروری می‌باشد. از سوی دیگر، این فلزات بسیار گرانبها بوده و مقدار خراب شدن و دور ریز آن‌ها در فرآیندهای تولید باید به کم‌ترین حد ممکن برسد. بدین منظور، نیاز است که رفتار فلز طی فرآیند، قابل پیش‌بینی باشد تا بتوان بهترین فرآیند را برای تولید محصول در نظر گرفت و با توجه به آن فرآیند، قالب‌ها، ماشین‌آلات و... را به صورت بهینه طراحی، تولید و انتخاب کرد.

تانتالوم فلزی با عدد اتمی ۷۳ از عناصر واسطه با ساختار کریستالی مکعبی مرکز پر^۱ با علامت اختصاری Ta می‌باشد که با داشتن دمای ذوب ۲۹۹۶°C یکی از فلزات دیر گداز بشمار می‌آید که در محیط‌های با دمای بالا مانند پوشش‌های حرارتی و در کاتدهای داغ کاربرد دارد. همچنین، مقاومت به خوردگی بسیار بالای تانتالوم آن را برای استفاده در محیط‌های شیمیایی مناسب گردانیده است [۲].

تاکنون کارهای پژوهشی اندکی در مورد تانتالوم خالص انجام شده است. سندیم و همکاران [۲] تبلور دوباره

دانه‌های تانتالوم را بررسی کردند و هوپالو و همکاران [۳] در مورد رفتار آنیل کاری تانتالوم درشت دانه مطالعه کرده و شبانی [۴] شرایط عملی آنیل کاری تانتالوم خالص را بررسی کرده است، اما تاکنون پژوهشی در مورد شکل‌پذیری تانتالوم خالص انجام نشده است. برای ارزیابی قابلیت شکل‌پذیری باید بتوان رفتار ورق را با یک روش دقیق تعریف نموده و خواص آن را در قالب ریاضی بیان کرد. همچنین، لازم است چگونگی استفاده از آزمایش‌های مکانیکی جهت بررسی خواص ورق را استخراج نمود. آزمون‌های بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی باتوجه به هدف انجام آن به دو گروه دسته‌بندی می‌شود: الف) آزمون‌های مشابه فرآیندهای عملی شکل‌دادن صنعتی (آزمون‌های شباهتی) ب) آزمون‌هایی که خواص مواد را جدای از اصطکاک و آثار دیگر ماده بدست می‌آورد (مانند آزمایش کشش) [۶].

آزمایش اریکسون یکی از آزمون‌های شباهتی است که به قابلیت کشش ورق بر یک سطح گنبدی شکل تا پیش از شکست توجه دارد که این رویکرد به یک روش جهت اندازه‌گیری نمودار حد شکل‌دهی^۲ (FLD) منجر می‌شود.

در این پژوهش خاصیت شکل‌پذیری تانتالوم خالص مورد بررسی قرار گرفته است و هدف این مطالعه بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی به عنوان شاخص اصلی پیش‌بینی شکل‌پذیری می‌باشد. نمودار حد شکل‌دهی مکان هندسی نقاط شکست را در صفحه کرنش‌های اصلی ϵ_1 - ϵ_2 برای مسیرهای کرنش متفاوت نشان می‌دهد. بدین معنی که تا هنگامی که کرنش‌های اصلی پایین منحنی حد شکل‌دهی قرار دارند، در آن ناحیه از فلز، گلویی و پارگی رخ نمی‌دهد و در صورت قرارگرفتن در بالای آن خرابی ایجاد می‌شود. این نمودارها به گونه‌ای گسترده به عنوان یک معیار جهت بهینه‌سازی فرآیندهای ورقکاری و هم‌چنین جهت بهبود طراحی قالب، طراحی قطعه، آزمایش قالب و کنترل کیفیت در حین تولید بکار می‌رود [۵] که این مسئله باعث افزایش اهمیت کارهای علمی و عملی بر روی نمودار حد شکل‌دهی می‌باشد. مفهوم نمودار حد شکل‌دهی در دهه ۱۹۶۰ به وسیله کیلر [۷] و

²- Forming Limit Diagram

¹-Body Center Cubic (B.C.C)

آمده از هر دو روش مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. همچنین، آزمایش کشش جهت بدست آوردن نمودار تنش-کرنش، ثابت کرنش سختی (n) و ضریب استحکام (k) برای تانتالوم انجام می‌شود. در ادامه ابتدا مواد مورد آزمایش و مراحل آماده سازی آن‌ها ارایه می‌شود و سپس به شرح آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

مواد اولیه

ورق تانتالوم در ضخامت‌های ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر برای آزمایش کشش و اریکسون و میله‌های تانتالومی به قطر ۶ میلی‌متر و ارتفاع ۹ میلی‌متر برای آزمایش فشار مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی تانتالوم مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. پیش از انجام آزمایش‌ها و برای رسیدن به نتایج بهتر کلیه مواد تانتالومی مورد عملیات حرارتی آنیل کاری قرار گرفتند. بدین منظور مواد به مدت ۶۰ دقیقه در دمای 1200°C و در اتمسفر خلا قرار گرفت [۴].

آزمایش اریکسون

آزمایش اریکسون آزمایشی است که به قابلیت کشش مواد روی یک سطح گنبدی شکل تا پیش از شکست توجه دارد [۶]. در این آزمون بر اساس روش ارایه شده به وسیله هکر [۱۰] عمل گردید. بدین منظور، ورق‌های تانتالوم در ضخامت‌های ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر بکار رفت. ابتدا نمونه‌ها در ابعاد 60×60 ، 50×60 ، 40×60 ، 30×60 ، 20×60 ، 15×60 و 10×60 میلی‌متر به وسیله روش وایرکات تهیه گردیده و روی آن‌ها دایره‌هایی به قطر ۳ میلی‌متر چاپ گردید (شکل ۲). آزمایش‌ها به وسیله دستگاه پرس ویژه آزمایش اریکسون با ظرفیت ۶ تن و با ماتریس استاندارد و سنبه نیمکره‌ای شکل به قطر ۲۰ میلی‌متر انجام گرفت. روانکار مورد استفاده روغن و نیروی نگه‌دارنده ورق به میزان ۴ تن تنظیم گردید. هر کدام از نمونه‌ها روی دستگاه گذاشته شده و نیرو اعمال می‌گردد تا جایی که نمونه دچار شکست و پارگی گردد. در این لحظه کار متوقف می‌گردد. شکل ۳ برخی از نمونه‌ها را پس از انجام آزمایش نشان می‌دهد.

گودوین ارایه شد [۸]، که پرکاربردترین روش برای نمایش شکل‌پذیری ورق‌های فلزی و گسترده‌ترین مفهوم بوجود آمده برای این منظور طی دهه‌های اخیر است [۹]. سپس در دهه ۱۹۷۰ روش ساده شده‌ای برای ارزیابی نمودار حد شکل دهی به وسیله هکر معرفی گردید [۱۰].

از آن زمان به بعد، کارهای زیادی بر روی نمودار حد شکل دهی انجام گرفته است؛ در سال‌های اخیر شو و جای [۱۱] مطالعاتی در زمینه اثر عیوب مواد بر نمودار حد شکل دهی انجام داده‌اند و چو و خو [۱۲] تاثیر پارامترهای بارگذاری بر پیش بینی نمودار حد شکل دهی در هیدروفرمینگ لوله آلومینیم را بررسی کرده و همچنین، مطالعاتی بر روی نمودار حد شکل دهی در هیدروفرمینگ لوله‌های درزدار به وسیله چن و همکاران [۱۳] انجام گرفته است.

در این پژوهش سه آزمایش اریکسون، فشار و کشش بر روی تانتالوم انجام شد. در ابتدا برای بدست آوردن نمودار حد شکل دهی ورق تانتالوم، آزمایش اریکسون در مورد ورق‌های تانتالومی انجام گرفت. سپس جهت ارزیابی نتایج ناشی از آزمایش اریکسون، آزمایش فشار در مورد نمونه‌های استوانه‌ای شکل از تانتالوم، انجام شد. همچنین، آزمایش کشش بر روی تانتالوم انجام و نمودار تنش-کرنش، ثابت کرنش سختی و ضریب استحکام بدست آمد.

روش پژوهش

در این پژوهش، سه آزمایش گوناگون در مورد تانتالوم انجام شده است. در ابتدا برای بدست آوردن نمودار حد شکل دهی ورق تانتالوم، آزمایش اریکسون روی ورق‌های تانتالومی انجام می‌گیرد. بدین منظور ورق‌های تانتالوم که دایره‌های کوچکی روی آن‌ها چاپ شده در ماشین آزمایش اریکسون تحت تغییر شکل قرار می‌گیرند تا جایی که شکستی در آن‌ها رخ دهد. کرنش‌های اصلی و فرعی در دایره‌های تغییر شکل یافته نزدیک محل شکست محاسبه شده و نمودار حد شکل دهی بدست می‌آید. در ادامه جهت ارزیابی نتایج ناشی از آزمایش اریکسون، آزمایش فشار روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل از تانتالوم، با نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵، انجام می‌شود و نمودار حد شکل دهی از راه این آزمایش نیز بدست می‌آید، که نمودارهای بدست

آزمایش کشش

برای انجام آزمایش کشش از دستگاه کشش اینسترون^۱ مدل ۴۳۰۲ استفاده شد. آزمایش بر روی ورق تانتالوم در دو ضخامت ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر انجام گرفت. ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش بر اساس استاندارد ASTM E8 بوده و آزمایش با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و در دمای ۲۰°C انجام گردید.

نتایج و بحث

آزمایش اریکسون از نخستین آزمون‌هایی است که برای برآورد شکل‌پذیری ورق‌های فلزی، در شرایط کشش بکار می‌رود. از دو راه می‌توان از نتایج این آزمون، جهت ارزیابی شکل‌پذیری استفاده کرد. در روش نخست، بیش‌ترین ارتفاع فنجان ایجاد شده به عنوان شاخص شکل‌پذیری اندازه‌گیری می‌شود. هرچه این ارتفاع بیش‌تر باشد، نشانگر بیش‌تر بودن مقاومت ورق فلزی در برابر گلوئی شدن است [۱۵]. جدول‌های ۲ و ۳ ارتفاع‌های ایجاد شده در آزمون، برای ضخامت‌های ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر در پهنای‌های گوناگون را نشان می‌دهد.

در روش دوم، نمودار حد شکل‌دهی برای ماده مورد آزمون بدست می‌آید. برای بدست آوردن نمودارهای حد شکل‌دهی در آزمایش اریکسون، بیضی‌های ایجاد شده در نزدیکی محل شکست در نمونه‌ها را مورد مطالعه قرار داده و بر اساس روابط (۱) و (۲) کرنش‌های اصلی و فرعی برای هر بیضی بدست می‌آید. هر کدام از این بیضی‌ها دارای دو کرنش است. کرنش اصلی ϵ_1 و کرنش فرعی ϵ_2 و بدین ترتیب یک نقطه بر روی نمودار حد شکل‌دهی که ϵ_1 محور عمودی و ϵ_2 محور افقی این نمودار می‌باشد را تشکیل می‌دهد. با مشخص کردن کرنش‌های اصلی و فرعی برای تمام بیضی‌های مشخص شده در نمونه‌ها با پهنای‌های گوناگون بر روی صفحه نمودار و آنگاه عبور دادن یک خط از این نقاط نمودار حد شکل‌دهی بدست می‌آید. شکل‌های ۴ و ۵ نمودارهای حد شکل‌دهی بوجود آمده برای ضخامت‌های ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر به تفکیک پهنای‌های گوناگون را نشان می‌دهد.

هدف اصلی انجام آزمایش اریکسون در این پژوهش بدست آوردن نمودارهای حد شکل‌دهی می‌باشد. در طی این فرآیند پس از انجام آزمایش، دایره‌هایی که روی نمونه‌ها چاپ شده بود، به بیضی‌هایی با ابعاد متفاوت، بسته به موقعیت قرارگیری آن از محل شکست، تغییر شکل می‌یابد. برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی می‌بایست ابعاد بیضی‌های نزدیک به محل شکست و پارگی تعیین گردد. بدین منظور، از میکروسکوپ دیجیتال Dino-Lite مدل AM-43-T استفاده گردید که قابلیت عکسبرداری از نمونه و سپس اندازه‌گیری ابعاد مورد نظر با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر را، از روی عکس داراست. بدین ترتیب، قطر بزرگ و کوچک بیضی‌ها اندازه‌گیری شده و کرنش اصلی و کرنش فرعی بر اساس روابط (۱) و (۲) بدست می‌آید.

(۱)

$$\epsilon_1 = \ln(\text{big diameter of ellipse/diameter of circle})$$

(۲)

$$\epsilon_2 = \ln(\text{small diameter of ellipse/diameter of circle})$$

آزمایش فشار

آزمایش فشار روی میله‌های تانتالومی به قطر ۶ میلی‌متر و ارتفاع ۹ میلی‌متر (نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵ [۱۴]) انجام گردید. تعداد این نمونه‌ها ۲۰ عدد می‌باشد. پیش از انجام آزمایش مربعی به ضلع یک میلی‌متر روی خط کمر میله‌های استوانه‌ای چاپ می‌شود. هر کدام از نمونه‌ها بین دو فک موازی و صیقلی ماشین آزمایش فشار قرار گرفته و ماشین به دو وجه قطعه فشار وارد می‌کند. این کار تا جایی ادامه می‌یابد که نخستین ترک روی بدنه قطعه مشاهده شود، در این لحظه کار متوقف می‌گردد. پس از انجام آزمایش، از نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ دیجیتالی عکسبرداری شده و ابعاد جدید قطعه و همچنین، ابعاد مربع اولیه که به مستطیل تغییر شکل یافته است، اندازه‌گیری می‌شود و کرنش اصلی و فرعی محاسبه می‌گردد. شکل ۴ یکی از نمونه‌ها را پیش و پس از انجام آزمایش نشان می‌دهد.

^۱ - Instron tensile machine

مقادیر n و k را برای ضخامت 0.1 میلیمتر و معادله ۴ این مقادیر را برای ضخامت 0.2 میلیمتر ارائه می دهد.

$$\sum = 360\epsilon^{0.25} MPa \quad (3)$$

$$\sum = 370\epsilon^{0.23} MPa \quad (4)$$

مقادیر n بدست آمده از آزمایش کشش برای تانتالوم تقریباً برابر با نقطه کمینه روی نمودار حدشکل دهی می باشد. با توجه به نظر مارسینیاک و همکاران [۱۷] که باور دارند نمودار حد شکل دهی محور کرنش اصلی را در نقطه ای تقریباً معادل با ثابت کرنش سختی (n) قطع می کند، پس می توان گفت که این مقدار n بدست آمده تاییدی بر صحت نمودارهای حدشکل دهی بدست آمده می باشد.

نتیجه گیری

همان گونه که بیان شد، ارزیابی شکل پذیری فلزات و پیش بینی شکست در شکل دهی ورق های فلزی باعث کاهش هزینه ها و بهبود چرخه تولید می گردد. تانتالوم با کاربرد در صنایع نظامی، هوا فضا و صنایع شیمیایی از جمله فلزات گرانبها می باشد که با پیش بینی فرآیند شکل دهی و جلوگیری از هدررفت آن، صرفه جویی قابل ملاحظه ای را بدنبال خواهد داشت. در این پژوهش خواص شکل پذیری تانتالوم خالص مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، نمودارهای حد شکل دهی برای تانتالوم بدست آمد. بدین منظور، سه آزمایش اریکسون، فشار و کشش در مورد تانتالوم انجام گرفت. پس از انجام آزمایش اریکسون و تایید نتایج با آزمایش های فشار و کشش، نتایج زیر بدست آمد:

- ۱- نمودارهای حد شکل دهی بدست آمده از آزمایش اریکسون همخوانی بسیار خوبی با نمودارهای بدست آمده از آزمایش فشار دارد. بنابراین، می توان این نمودار را به عنوان نمودار حد شکل دهی تانتالوم در نظر گرفت.
- ۲- نمودارهای تنش-کرنش حقیقی برای تانتالوم در ضخامت های گوناگون بدست آمده که همخوانی خوبی با یکدیگر دارند.
- ۳- مقدار متوسط ثابت کرنش سختی، n و ضریب استحکام، k برای تانتالوم به ترتیب $n=0.24$ و $k=365$ Mpa بدست آمد.

در ادامه جهت ارزیابی درستی نمودارهای حد شکل دهی بدست آمده از آزمایش اریکسون، از روش استاندارد که برای بدست آوردن این نمودارها به وسیله کان [۱۴] معرفی گردیده است، استفاده می شود. در این روش از آزمایش فشار استفاده می شود که در آن طول و عرض مربعی که اکنون به مستطیل تبدیل شده است اندازه گیری شده و به ترتیب کرنش اصلی ϵ_1 و کرنش فرعی ϵ_2 محاسبه می شود. از آنجایی که میان فک ماشین و نمونه تانتالومی اصطکاک وجود دارد، در عمل این اصطکاک به عنوان مانعی برای حرکت در جهت شعاعی ماده زیر فک عمل کرده و سیلان شعاعی ماده در این ناحیه را دشوار می سازد. در نتیجه، وجود اصطکاک باعث توزیع ناهمگن کرنش در نمونه می شود [۱۶] در نتیجه، به ازای هر نمونه مورد آزمایش کرنش های اصلی و فرعی خاصی خواهیم داشت که یک نقطه روی نمودار حدشکل دهی را تشکیل می دهد. با عبور دادن یک خط از این نقاط نمودار حد شکل دهی برای آزمایش فشار بدست می آید. البته، باید توجه کرد که در آزمایش فشار چون همیشه یکی از کرنش ها منفی است، پس در نمودار حد شکل دهی بدست آمده تنها نیمه سمت چپ نمودار بدست می آید و به پستی بلندی های بوجود آمده نیز در اثر ناهمگنی اشاره می شود. در شکل ۶ نمودارهای حد شکل دهی بدست آمده از آزمایش های اریکسون و فشار با هم مقایسه شده اند. همان گونه که مشاهده می شود، این نمودارها همخوانی بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

داده های بدست آمده از آزمایش کشش در بسیاری از تصمیم گیری های مهم مهندسی کاربرد دارد. نتایج آزمایش کشش مربوط به نمونه های مورد آزمایش با ضخامت های 0.1 و 0.2 میلیمتر در جدول ۴ آمده است. در طی فرآیند آزمایش کشش داده های مربوط به نیرو و جابه جایی در هر لحظه از جابه جایی به وسیله ماشین ثبت گردیده که با استفاده از آن نمودار تنش-کرنش حقیقی برای ضخامت های 0.1 و 0.2 میلیمتر رسم می گردد (شکل ۷). آنگاه با استفاده از معادله هولمن $\sigma = k\epsilon^n$ (که σ تنش حقیقی و ϵ کرنش حقیقی می باشد) مقادیر ثابت کرنش سختی (n) و ضریب استحکام (k) بدست می آید. معادله ۳

می‌باشد که این مطلب تاییدی بر نمودارهای حد شکل‌دهی بدست آمده می‌باشد.

۴- مقادیر n بدست آمده از آزمایش کشش برای تانتالوم تقریباً برابر با نقطه کمینه بر روی نمودار حدشکل دهی

References

- 1- F. Ozturk, , and D. Lee, "Experimental and Numerical Analysis of Out-of-Plane Formability Test", J. Mat Proc. Tech., 170, pp. 247–253, 2005.
- 2- H.R.Z. Sandim, J.P. Martins, A.L. Pinto, and A.F. Padilha. Recrystallization of Oligocrystalline Tantalum Deformed by Cold Rolling. Materials Science and Engineering A 392, pp. 209–221, 2005.
- 3- M.F. Hupalo, H.R.Z. Sandim. The Annealing Behavior of Oligocrystalline Tantalum Deformed by Cold Swaging. Materials Science and Engineering A318 pp. 216–223, 2001.
- 4- A.A. Shabani. "The Annealing of Pure Tantalum". 2nd International Conference on Materials Heat Treatment, 2011.
- 5- T. B. Stoughton, and X. Zhu, "Review of Theoretical Models of the Strain-Based FLD and Their Relevance to the Stress-Based FLD", Int. J. of Plasticity, 20, pp. 1463-1486, 2004.
- 6- V. Karthik, R.J. Comstock, D.L. Hershberger, and R.H. Wagoner. "Variability of Sheet Formability and Formability Testing". Journal of Materials Processing Technology, 121, pp.350-362, 2002.
- 7- S.P. Keeler, Determination of Forming Limits in Automotive Stampings. Sheet Met Ind 42, pp. 683–691, 1965.
- 8- G.M. Goodwin, "Application of strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop". Metall Italiana 60, pp. 764–774, 1968.
- 9- M. Strano, and B.M. Colosimo. "Logistic Regression Analysis for Experimental Determination of Forming Limit Diagrams". International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issue 6, pp. 673-682, 2006.
- 10- S.S. Hecker, "Simple Technique for Determining Forming Limit Curves". Sheet Met Ind 53, pp. 671–675, 1975.
- 11- C. L. Chow, and M. Jie. "Forming limits of Al 6022 Sheets with Material Damage Consideration, Theory and Experimental Validation". International Journal of Mechanical Science ,vol 46, pp 99-122, 2004.
- 12- E. Chu, and Y. Xu, "Influences of Generalized Loading Parameters on FLD Predictions for Aluminum Tube Hydroforming". Journal of Materials Processing Technology, Volume 196, Issues 1–3, pp. 1-9, 2008.
- 13- X. Chen, Z. Yu, B. Hou, S. Li, and Z. Lin." A Theoretical and Experimental Study on Forming Limit Diagram for a Seamed tube Hydroforming". Journal of Materials Processing Technology, Volume 211, Issue 12, pp. 2012-2021, 2011.
- 14- P.W. Lee, and H.A.Kuhn. Fracture in cold Upset Forging-A Criterion and Model. Metallurgical Transaction Volume 4, pp. 969-974, 1973.
- 15- K. Narasimhan, M.P. Miles, and R.H. Wagoner." A Better Sheet-Formability Test". Journal of Materials Processing Technology 50, pp. 385-394, 1995.
- ۱۶- ش. مولایی، م. شهباز، ر. ابراهیمی. تأثیر رفتار کارسختی ماده بر مقدار بشکه ای شدن و توزیع تنش و کرنش در آزمایش فشار با استفاده از روش اجزای محدود. مجله مواد نوین، جلد ۳، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۲
- 17- Z. Marciniak J.L. Duncan and S.J. Hu. Mechanics of Sheet Metal Forming. Butterworth-Heinemann, 1992

پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی تانتالوم (%وزنی)

| Fe | Si | Ni | W | Mo | Ti | Nb | O | C | H | N | Ta |
|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|------|
| ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۵ | تعال |

جدول ۲- نتایج خروجی آزمایش اریکسون برای ورق با ضخامت ۰/۱ میلیمتر

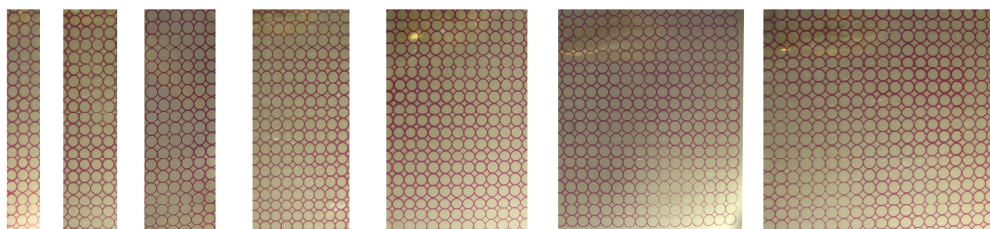
| پهنای نمونه (mm) | ۶۰ | ۵۰ | ۴۰ | ۳۰ | ۲۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۱۰ |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ارتفاع ایجاد شده (mm) | ۴ | ۴ | ۴/۵ | ۵ | ۶/۸ | ۷/۵ | ۷/۹ | ۸/۲ |
| بار (kg) | ۲۲۰ | ۲۰۰ | ۱۵۰ | ۱۴۰ | ۱۳۰ | ۱۱۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |

جدول ۳- نتایج خروجی آزمایش اریکسون برای ورق با ضخامت ۰/۲ میلیمتر

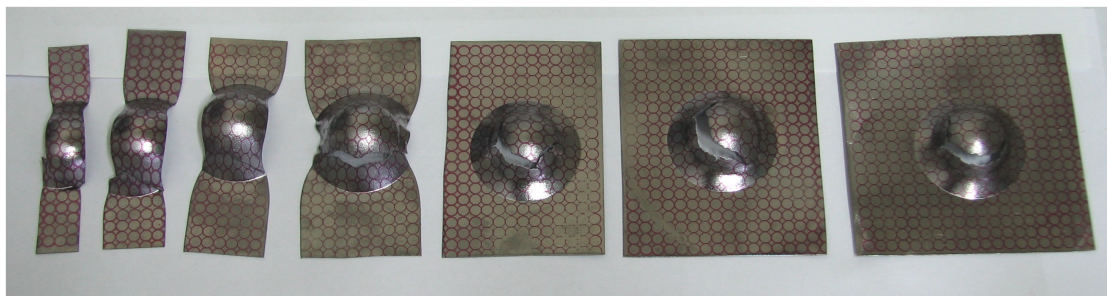
| پهنای نمونه (mm) | ۶۰ | ۵۰ | ۴۰ | ۳۰ | ۲۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۱۰ |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| ارتفاع ایجاد شده (mm) | ۸/۸ | ۸/۶ | ۸/۴ | ۱۱ | ۱۲/۳ | ۱۲/۶ | ۱۲/۲ | ۱۲/۲ |
| بار (kg) | ۳۰۰ | ۲۶۰ | ۲۵۰ | ۲۴۰ | ۲۴۰ | ۱۷۵ | ۱۶۰ | ۱۶۰ |

جدول ۴- نتایج بدست آمده از آزمایش کشش بر روی نمونه با ضخامت ۰/۱ و ۰/۲ میلیمتر

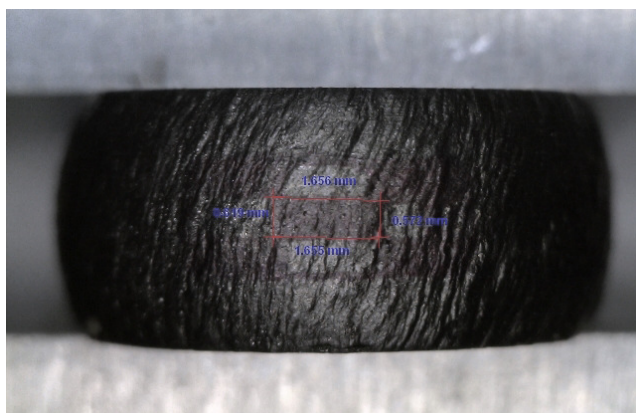
| مدول | تنش | نیرو | کرنش | جابجایی | بیشینه | بیشینه | بیشینه | بیشینه | ضخامت |
|------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----------|-----------|----------|--------------|-------|
| یانگ (MPa) | درشکست (MPa) | درشکست (kN) | درشکست (%) | درشکست (mm) | تنش (MPa) | نیرو (kN) | کرنش (%) | جابجایی (mm) | (mm) |
| ۷۱۲۳۰ | ۱۱۷/۳ | ۰/۱۴۶۶ | ۲۵/۵۸ | ۱۵/۵۱ | ۱۸۶/۴ | ۰/۲۳۳۰ | ۲۰/۹۰ | ۱۲/۵۴ | ۰/۱ |
| ۶۴۴۵۰ | ۱۸۸/۰ | ۰/۴۶۹۸ | ۳۴/۳۲ | ۲۰/۵۹ | ۲۱۵/۴ | ۰/۵۳۸۳ | ۲۷/۰۸ | ۱۶/۲۵ | ۰/۲ |



شکل ۱- نمونه‌های مدرج شده با دایره‌هایی به قطر ۳ میلیمتر جهت آزمایش اریکسون



شکل ۲- نمونه‌ها پس از انجام آزمایش اریکسون

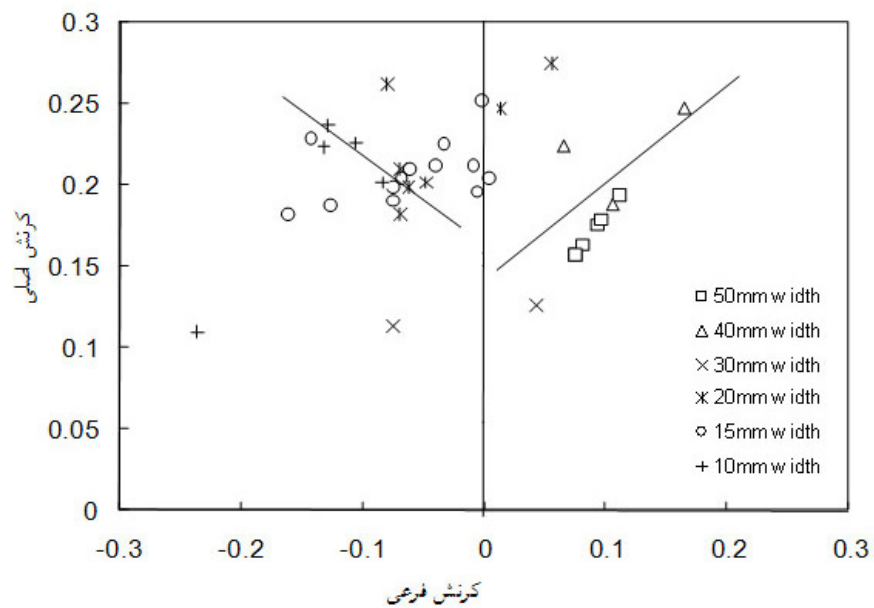


ب

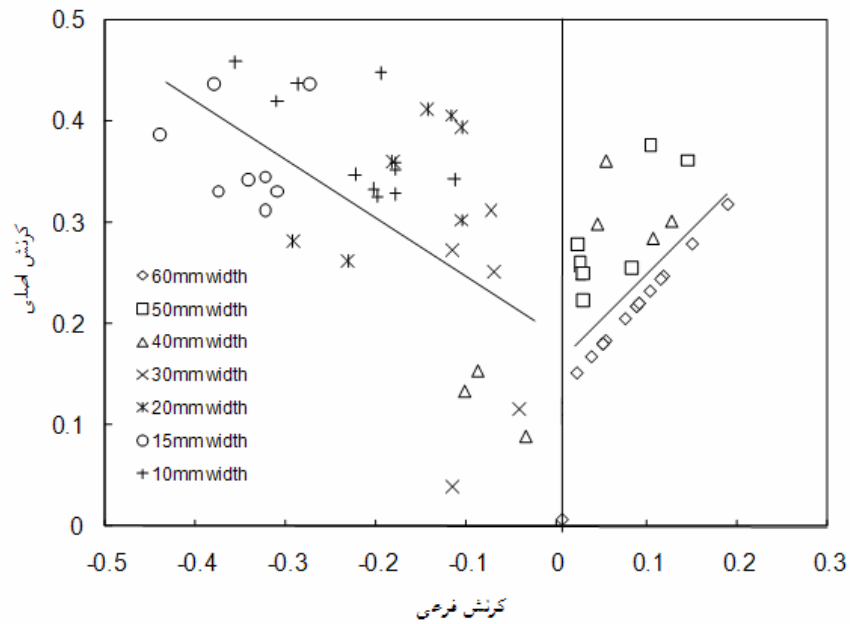


الف

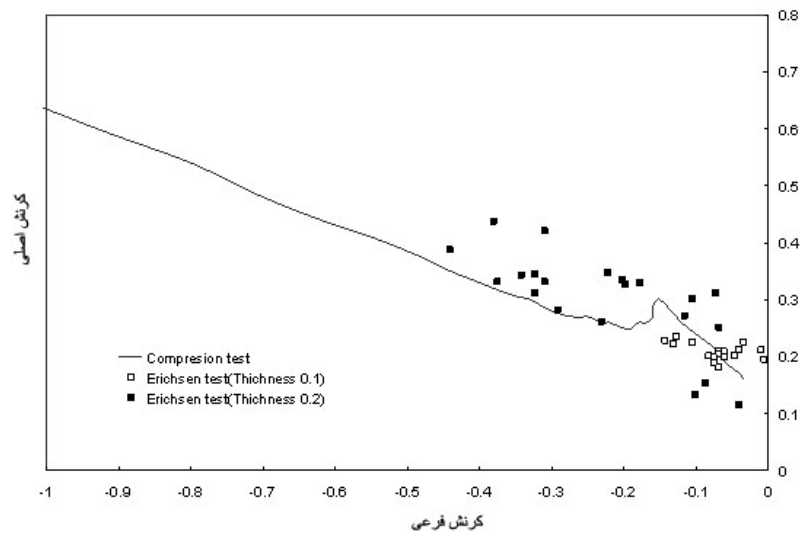
شکل ۳- نمونه آزمایش فشار الف) قبل از آزمایش ب) پس از آزمایش



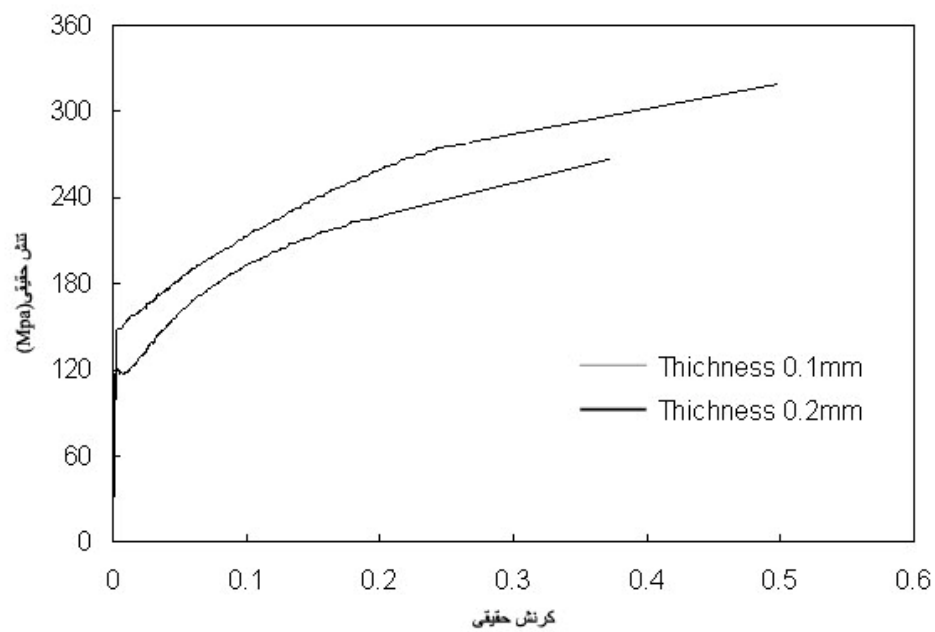
شکل ۴- نمودار FLD به تفکیک پهناهای گوناگون نمونه‌ها برای ضخامت ۰/۱ میلی‌متر



شکل ۵- نمودار FLD به تفکیک پهناهای گوناگون نمونه‌ها برای ضخامت ۰/۲ میلیمتر



شکل ۶- مقایسه نمودارهای FLD برای آزمایشهای فشار و اریکسون



شکل ۷- مقایسه نمودارهای تنش- کرنش حقیقی در ضخامت های ۰/۱ و ۰/۲ میلیمتر