Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۳، جلد ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۸۵-۱۹۰

ارائه نمودار حد شکل‌دهی در نرخ کرنش بالا برای آلیاژ آلومینیوم 6061 به کمک فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک

مهدی ظهور* دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
امین اشرافی تفرشی دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
سید میثم موسوی دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده
فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ یک روش شکل‌دهی فلزات بصورت پالسی می باشد که در آن از تخلیه بار الکتریکی در امتداد دو یا چند الکترود که درون سیال قرار گرفته است، برای شکل دادن ورق فلزی استفاده می شود. با انجام مجموعه ای از تست های تجربی میزان شکل‌پذیری ورق با استفاده از فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ در کنار فرآیند شبه استاتیک مورد محاسبه قرارگرفته است. همچنین یک روش نظری برای مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی بررسی شده است. تست‌های تجربی الکتروهیدرولیک فرمینگ بر روی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم گریدبندی شده بصورت کروی جهت بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی بررسی گردیده است. نه تنها تطابق خوبی فیمابین منحنی های تجربی بدست آمده از تست نیمه استاتیک و روش نظری حاصل شده است، همچنین فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ موجب بهبود شکل پذیری آلیاژ آلومینیوم با توجه به نمودارهای حد شکل‌دهی در کرنش‌های حداکثری تا بیش از ۲۶ درصد در مقایسه با فرآیندهای با سرعت پایین نیز گردیده است.

واژه‌های کلیدی: نمودار حدشکل‌دهی، نرخ کرنش بالا، شکل‌دهی الکتروهیدرولیک.

Development of Forming Limit Diagram Via High Strain Rate Method on Aluminum Alloy 6061 by using Electrohydraulic Forming Process

M. Zohoor Mechanical engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
A. Ashrafi Tafreshi Mechanical engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
S. M. Mousavi Mechanical engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract
Electrohydraulic forming is a pulsed metal forming process that uses the discharge of electrical energy across a pair of electrodes submerged in fluid to form sheet metal. An experimental procedure was developed to quantify the formability in electrohydraulic forming (EHF) that is consistent with the quasi-static formability assessment convention. Furthermore, we investigate the procedure to comparison of theoretical forming limit diagram and experimental results. The experimental EHF forming limit diagram (FLD) was determined for aluminum alloy sheet and circle grids used to determine the minor and major strain in the path of necking on the specimens. Not only good agreement was found between the experimental curve that derived by quasi-static tests and theoretical forming limit curve, but also EHF on aluminum alloy shows formability improvement on major strains including 26% in comparison to low strain rate process.

Keywords: Forming Limit Diagram, High Strain rate, ElectroHydraulic Forming.

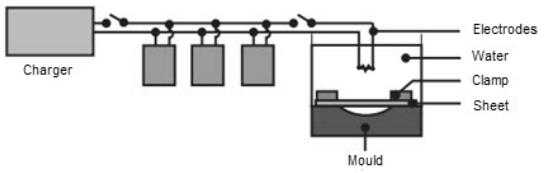
۱- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی با سرعت بالا ، فرآیندی است که در آن مقداری انرژی در زمان کوتاهی آزاد می شود و قطعه کار در برابر فشار زیادی قرار می گیرد. در این روش ماده به سرعت و شتاب بالایی می رسد و فرآیند در کسر بسیار کوچکی از ثانیه پایان می پذیرد. سرعت شکل‌گیری قطعه در این شیوه بیش از 15 m/s می باشد ابزارهای مورد نیاز در این دانش بر پایه روش آزادسازی انرژی دسته بندی می شوند. شکل‌دهی انفجاری، شکل‌دهی الکترومغناطیسی و شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، مهمترین فرایندهای شکل‌دهی با سرعت بالا می‌باشند. شکل‌دادن صفحات فلزی با استفاده از انرژی حاصل از انفجار و به‌کارگیری محیط واسط برای انتقال انرژی را فرآیند شکل‌دهی انفجاری می‌نامند. شکل‌دهی الکترومغناطیس یکی دیگر از روش های شکل‌دهی قطعات فلزی است که از نیروی الکترومغناطیس به عنوان عامل شکل‌دهی استفاده می شود. در این روش شکل‌دهی، میدان مغناطیسی گذرا و شدیدی به عنوان منبع فشار جهت شکل‌دهی به کار گرفته می شود. این روش برای شکل‌دهی و اتصال فلزات و دیگر مواد با دقت و تکرارپذیری بالا بدون اثرگذاری ابزار روی قطعه کار استفاده می شود. در این فرآیند مقدار قابل توجهی از انرژی الکتریکی در بانک خازن ذخیره شده و با استفاده از سوئیچ های ولتاژ بالا به سرعت درون کویل (سیم پیچ) تخلیه می شود. جریان الکتریکی گذرا در کویل یک میدان مغناطیسی گذرای شدیدی را تولید می کند که تغییر شکل قطعه کار را در برابر قالب پیش می برد. شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی یکی دیگر از فرآیندهای شکل‌دهی با سرعت بالا می‌باشد. در این روش از تخلیه‌ی الکتریکی در داخل مایع (آب، نفت و ...) برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی و تغییر شکل ورق استفاده می‌شود. شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی مشابه شکل‌دهی انفجاری

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mzohoor@kntu.ac.ir
تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۲۶
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۹
www.SID.ir

Archive of SID

است با این تفاوت که به جای استفاده از مواد منفجره برای ایجاد موج شوک از تخلیه بار الکتریکی استفاده می‌شود. این فرآیند شامل پدیده های فیزیکی پیچیده ای بوده و ترکیبی از مزایای هر دو تغییر شکل با سرعت بالا و هیدروفرمینگ سنتی است. در شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی مقدار قابل توجهی انرژی الکتریکی ذخیره شده در خازن‌ها در شکاف بین الکترودها در یک محفظه پر از سیال(عموما آب) تخلیه شده که باعث تشکیل یک کانال پلاسما بین دو الکترود می‌شود.(شکل۱) تشکیل کانال و تبخیر آب منجر به ایجاد موج شوک با سرعت و توان بالا می‌شود که در سرتاسر مایع گسترش می‌یابد. انتشار موج شوک موجب حرکت ورق فلزی به سمت قالب شده و شکل‌دهی اتفاق می افتد. دو روش رایج برای ایجاد موج شوک از طریق تخلیه الکتریکی و ایجاد موج مکانیکی وجود دارد: نخست تخلیه خازن از میان شکاف بین دو الکترود و راه دیگر تخلیه خازن از طریق سیم تعبیه شده بین دو الکترود می باشد. در روش دوم، مسیر تخلیه الکتریکی بصورت از پیش تعیین شده است و تبدیل انرژی کارآمدتری صورت می‌گیرد و در نتیجه کنترل بهتری می‌تواند صورت پذیرد. مزیت استفاده از سیم آن است که امکان استفاده از ولتاژهای پایین‌تر را فراهم می‌کند. اما نرخ تولید پایین‌تر را نیز موجب می‌شود (زیرا سیم به‌وسیله تخلیه الکتریکی ذوب می‌شود و مجبور به جایگزینی آن بعد از هر عمل می‌گردیم). مزیت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی نسبت به انفجاری (قابلیت اتوماسیون بیشتر) و الکترومغناطیسی (قابلیت استفاده روی تمام مواد از جمله موادی که دارای هدایت الکتریکی پائینی هستند و ایجاد اشکال پیچیده) باعث شده تا این فرایند بعد از یک افول چند دهه‌ای، مجدداً مورد توجه (مخصوصا صنایع خودرو سازی) قرار گیرد. محققین تلاش می‌کنند با استفاده از الکترودهای بادوام‌تر، آب‌بندی بهتر و مدیریت بهتر فشار ایجاد شده توسط تخلیه الکتریکی، از این فرایند برای تولید با تیراژ بالا در صنایع استفاده کنند.



شکل ۱- طرحواره فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ

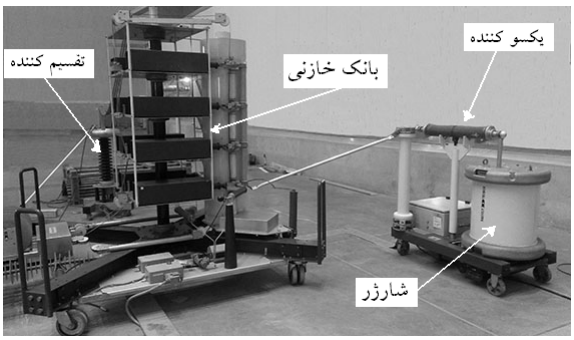
اولین مشاهده‌ها از ایجاد نیروی قوی مکانیکی حاصل از تخلیه الکتریکی در سیال، به گزارشات لین[۱] در سال ۱۷۶۷ و پریستلی در سال ۱۷۶۹مربوط می‌شود [۲].

توسعه اولیه فرایند الکتروهیدرولیکی توسط یوتکین[۳] در روسیه به ثبت رسید. آزمایشات اولیه جهت استفاده از این پدیده در شکل‌دهی به کارهای برونو در سال ۱۹۶۸ [۴]، داویس و آستین در سال ۱۹۷۰ [۵] و چاچین در سال ۱۹۷۸ ورق‌ها برمی‌گردد [۶].

تحقیقات صورت گرفته روی فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی عمدتا در سه زمینه افزایش شکل‌پذیری مواد، بررسی پارامترهای موثر و شبیه‌سازی آن می‌باشد.

دائن و بالانتیرام[۷] از افزایش حدود ۵/۵ برابری شکل پذیری در ورق آلیاژ آلومینیوم سری ۶/۶۱ و بیش از ۳/۵ برابری برای چدن و مس در اثر فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ رسیده اند. گلواشنکو و همکارانش[۸] با مقایسه تجربی بیشترین کرنش بدست آمده از فرایند الکتروهیدرولیکی (در قالب مخروطی و V شکل) با بیشترین کرنش بدست آمده از تست LDH نشان دادند، در فرایند الکتروهیدرولیکی امکان دسترسی به کرنش‌های بالاتری وجود دارد. بررسی‌های آنها حاکی از افزایش ۶۳ تا ۱۹۰ درصدی شکل‌پذیری مواد (بسته به جنس ماده) در فرایند الکتروهیدرولیکی بود. رهتگی و همکارانش[۹] به کمک تکنیک دیجیتالی همبستگی تصویر یکسری توجیه‌های کیفی در مورد علت افزایش شکل‌پذیری ورق آلومینیوم در اثر شکل‌دهی به روش الکتروهیدرولیکی بدست آورده اند. رهتگی و همکارانش در ادامه تحقیقات خود با همان تکنیک‌های قبلی به مقایسه شکل‌دهی بدون قالب و با قالب (مخروطی) از نظر سرعت، کرنش، نرخ کرنش و مسیر کرنش پرداختند. آنها نتیجه گرفتند استفاده از قالب شکل پذیری را افزایش می دهد. همبرگ و همکارانش[۱۰] ، به مقایسه شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی با دیگر فرایندها (هیدروفرمینگ، شکل‌دهی الکترومکانیکی و شکل‌دهی پنومکانیکی) پرداختند. آنها نتیجه گرفتند رسیدن به شعاع‌های کوچک به کمک فرایند الکتروهیدرولیکی میسرتر است. گلواشنکو و همکارانش[۱۱] در پی یافتن علت افزایش شکل‌پذیری مواد در اثر فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی به بررسی تغییر ساختار متالورژیکی ورق‌ها در اثر این فرایند پرداختند. همچنین آن‌ها از افزایش (در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد) شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی، مسی و فولادی در اثر شکل‌دهی به روش الکتروهیدرولیکی در قالب‌های مثلثی، مربعی و شش گوش خبر داده‌اند.

در مقاله حاضر ابتدا نمودارهای حدشکل‌دهی در نرخ کرنش‌های پایین به روش‌های نظری و تجربی بدست آمده، سپس نتایج منحنی های حد شکل‌دهی با کمک فرآیند الکتروهیدرولیک که در نرخ کرنش های بالا رخ می دهد بدست می آید. بررسی میزان افزایش شکل‌پذیری در آلیاژ آلومینیوم با توجه به آزمایشات صورت گرفته نشان می دهد حدود بیست و شش درصد افزایش شکل‌پذیری در ماده بوجود آمده است.



شکل۲- خازن و مجموعه شارژرهای تخلیه بارالکتریکی

۲- آزمایش‌های تجربی

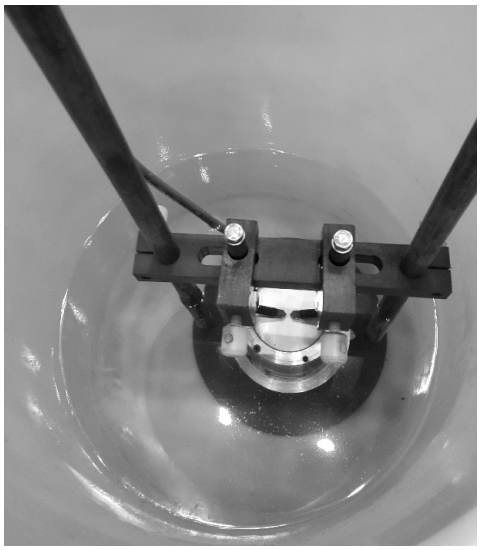
همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، تجهیزات لازم جهت ایجاد ولتاژ بالا و تخلیه بار الکتریکی در فرآیند شامل بانک خازنی، شارژر، یکسوکننده و تقسیم کننده می باشد. در این فرآیند با توجه به میزان ولتاژ و انرژی مورد نیاز تعداد خازن های مورد استفاده تعیین می گردد.

هدف اصلی در انجام آزمایش های تجربی محاسبه حدشکل‌دهی برای آلیاژ آلومینیوم در فرآیند الکتروهیدرولیک می باشد. به این منظور

www.SID.ir

Archive of SID

، نمونه ها باید در مسیر کرنش های مختلفی تا رسیدن به گلویی تغییر شکل داده شوند. قطعات گلویی شده مابین نمونه های سالم و ترک خورده قرار می گیرند برای رسیدن به نمونه های دارای گلویی به صورت تجربی مقدار دقیقی از انرژی باید به قطعه کار وارد شود تا بدون ترک خوردن، گلویی در ورق رخ دهد. مقدار انرژی موردنیاز جهت تغییر شکل در ورق به فاکتورهای زیادی بستگی دارد که شامل اندازه دانه و ضخامت ورق، ابعاد قالب و هندسه آن و هندسه قطعه نمونه می باشد.



شکل۳- محفظه و ادوات فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ

میزان انرژی تخلیه شده در فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ با تغییرمیزان ولتاژ ورودی مشخص می شود که این ولتاژ معمولا مابین ۵ تا ۱۵ کیلوولت می باشد. در مواد با هندسه جدید براساس تجارب پیشین ولتاژ ورودی انتخاب می شود.اگر قطعه نمونه کاملا شکسته شود میزان ولتاژ کاهش پیدا می کند. پس از چندین تست این امکان وجود دارد که بازه ی ولتاژ ورودی از حالت کاملا سالم تا شکست تعیین شود. معمولا ولتاژی که باعث ایجاد گلویی در ورق می شود بین حالت شکست و سالم بودن ورق به دست می آید. این مقدار برای هر ماده با هندسه مشخص به صورت یکتا می باشد. فرایند تعیین این بازه بسیار زمان بر است زیرا در فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ متغیرهای زیادی باعث هدر رفت انرژی می گردد . مقدار انرژی اعمال شده جهت کنترل پروسه از نمونه ای به نمونه ی دیگر مورد استفاده قرار می گیرد. مقدار ولتاژ و جریان ورودی جهت محاسبه انرژی الکتریکی ورودی به محفظه مورد محاسبه قرار می گیرد. شرایط تست تجربی نباید در طول آزمایش تغییر کند. حتی وقتی شرایط نیز ثابت می ماند در طول انجام تست های سعی و خطا ممکن است حالت چالشی رخ دهد زیرا خروجی اعمال شده از فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ ممکن است براثر ناکارآمدی های سیستم تغییر نکند و مقداری از انرژی تلف شود. تکرار پذیری فرآیند با کمک استفاده از سیم رابط بین الکترود ها بهتر می گردد.

سیم مسی واسط می تواند مابین الکترود ها نصب گردد تا انتقال الکترون ها راحت تر انجام شود و میزان پتانسیل ولتاژ ورودی نیز کاهش یابد.(ولتاژ مورد نیاز جهت انجام فرآیند)

سیم با قطر ۰/۳ میلیمتر از جنس مس خالص جهت بالارفتن تکرار پذیری مورد استفاده قرار گرفت.

پارامترهای بعدی در فرآیند، میزان رسانایی سیال شکل‌دهی می باشد. دمای بالا و فشار بالای تخلیه الکتریکی در فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ می تواند موجب تغییر حلالیت اکسیژن وذرات فلز در سیال شود که همه این ها موجب تغییر رسانایی سیال می گردد . انجام تست در هر بار موجب حل شدن سیم مسی در سیال و تغییر رنگ آن و تغییر رسانایی آن می شود . این رخداد باعث تغییر زمان پالس ورودی و شدت آن می گردد لذا قبل از هر تست سیال جهت یکسان شدن حالات فرآیند مجددا تعویض می گردد.

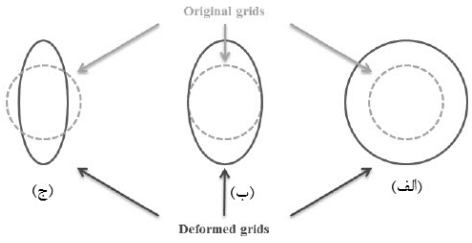
در این تحقیق همانگونه که در شکل شماره ۳ قابل مشاهده است دستگاه تست الکتروهیدرولیک ساخته شده است. در زیر الکترودها ورق آلیاژ آلومینیوم قرارداده شده که در زیر آن می تواند قالب قرار گیرد. با توجه به آنکه در این تحقیق هدف اصلی محاسبه نمودارهای حد شکل-دهی بوده، از حالت شکل‌دهی آزاد جهت بدست آوردن نقط گلویی استفاده شده است. محفظه فرآیند و ادوات اصلی از فیبر استخوانی جهت عدم رسانش و تمرکز جریان در نوک الکترودها استفاده شده است.

۳- محاسبه کرنش

تغییر شکل پلاستیک در فرآیند تغییر شکل فلزات معمولا با همبستگی تصاویر دیجیتالی[1] یا ایجاد گرید بر روی قطعه انجام می شود.

انجام فرآیند الکتروشیمیایی جهت گرید بندی با توجه به خطر استفاده از تجهیزات تصویربرداری در این فرآیند قطعا الویت خواهد داشت. در تغییر شکل پلاستیک، دایره ها بصورت بیضی می گردد. هرچند کرنش حداکثر همواره مثبت است کرنش حداقلی می تواند مثبت، منفی یا صفر باشد(شکل ۴).

روشهای مختلفی جهت گرید بندی قطعات وجود دارد که دو روش آن متداول تر می باشد. نخست گرید های دایروی و دوم گریدهای مربعی. گرید های استفاده شده در این آزمایش از انواع گرد با قطر ۲,۵ میلی متر می باشد(شکل ۵).



شکل۴- حالات مختلف تغییر شکل گرید الف: کرنش کمینه مثبت، ب: کرنش کمینه صفر، ج: کرنش کمینه منفی

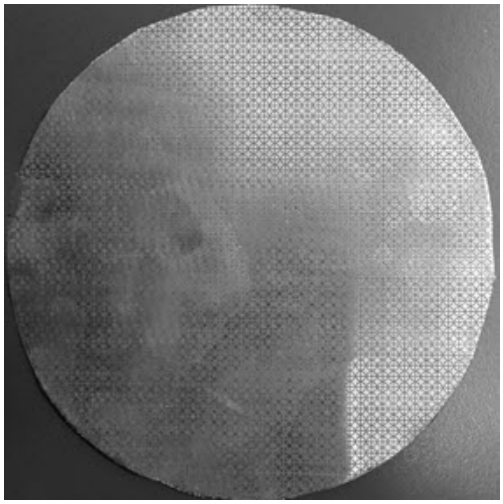
مقدار کرنش پلاستیک در هر گرید می تواند به سرعت با محاسبه قطر بیشینه و کمینه دور بیضی با استفاده از خط کش یا ادوات معمول

[1] Digital Image Correlation technique

www.SID.ir

Archive of SID

محاسبه گردد. گریدهای دایروی شاخص بصری مستقیمی از مسیر تغییرشکل ماده را بیان می کند.

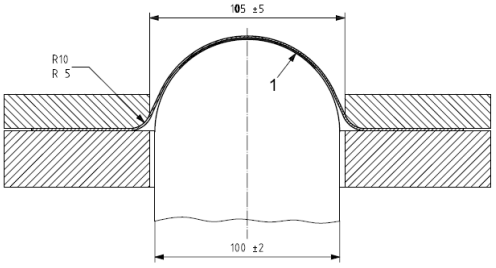


شکل۵- ورق آلیاژ آلومینیومی گرید بندی شده بصورت دایروی

در نمونه ی گلویی شده هر گروه قابل تقسیم به سه حالت مطمئن، حاشیه ای و گلویی میباشد. هر گروه مطمئن در منطقه ای قرار دارد که شواهد گلویی شدن در آن مشاهده نگردد. گروه‌های حاشیه ای در مکانی واقع شده اند که در نزدیکی گلویی قراردارند یا بخشی از آنها در گلویی قرار گرفته است. گرید های گلویی در مکانی واقع شده اند که کاملا در گلویی ورق قراردارند یعنی همه عرض گلویی از آنها عبور می کند. برای ایجاد نمودارهای حد شکل‌دهی تنها از این گروه‌ها باید استفاده نمود. تمام گروه‌های حاشیه ای باید حذف شوند. در واقع گروه‌های حاشیه ای مقداری کمتر از گروه‌های گلویی دچار کرنش شده اند. هرگاه این گروه‌هارا حذف کنیم نمودار حد شکل‌دهی کمی بالاتر می آید.

۴- تست شکل پذیری نیمه استاتیک

حدشکل‌پذیری نیمه استاتیک مواد جهت تعیین میزان تغییر شکل پذیری با روشEHF مورد نیاز می باشد. درصورتی که نمودار FLC بااستفاده از همان مواد محاسبه گردد قطعا مفیدتر خواهدبود.



شکل۶- تصویر مقطع قالب ناکازیما بر اساس استاندارد ISO 12004-2

نمودارFLC نیمه استاتیک براساس تست ناکازیما به دست می آید. نمودار حدشکل‌دهی ماده با کمک استاندارد ISO-12004-2 جهت شناسایی حد کرنش محاسبه می گردد. روش محاسبه کرنش های حدی و پس از آن ایجاد نمودارهای FLC به روش نیمه استاتیک با نمونه گرید بندی شده و تغییرشکل یافته با تست ناکازیما با پرس ۷۵تن جهت تغیرشکل نمونه در سرعت۰,۱میلیمتر بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است. حدشکل‌دهی با همان روشی که نمونه های EHF بررسی شدند محاسبه شده است. شکل پذیری نمونه های گریدبندی شده شکل داده شده توسط تست ناکازیما بدست آمده است.

۵- محاسبه نظری حد شکل‌دهی

برای محاسبه حد شکل‌دهی آلیاژآلومینیوم به روش نظری نیاز به اصول پلاستیسیته و همچنین تئوری های شکست و عدم تعادل وجود دارد. منحنی نظری حد شکل‌دهی بر اساس ضخامت t (میلی متر) و توان کارسختی(n) برای آلیاژ آلومینیوم از معادله های (۲)، (۳) و (۴) بدست می آید. [۱۲]:

$$FLC_0 = \frac{n}{0.21}(0.223 + 0.1413t) \quad (۱)$$

$$\text{for } \varepsilon_2 \le 0 \quad \varepsilon_1 = \left[\frac{1+FLC_0}{1+\varepsilon_2}\right]\text{-}1 \quad (۲)$$

$$\text{For } 0 < \varepsilon_2 \le 0.3 \quad \varepsilon_1 = FLC_0 + 0.6\varepsilon_2 \quad (۳)$$

$$\text{for } 0.3 \le \varepsilon_2 \quad \varepsilon_1 = FLC_0 + 0.18 \quad (۴)$$

۶- ویژگی های مواد

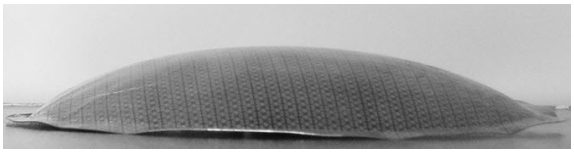
انواع مختلفی از تست‌ها برای تعیین شکل پذیری ورق به کار گرفته شد. مهمترین آزمایش تست کشش تک محوره جهت بدست آوردن خواص رفتار مکانیکی ماده می باشد. ضخامت ورق آلیاژی مورد استفاده ۵ میلی متر می باشد و قطر آن ۱۲ سانتی متر است.(شکل ۷)

جدول۱- خواص رفتار مکانیکی ورق آلیاژ آلومینیوم

پارامتر	مقدار
A(MPa) *تنش تسلیم*	۱۴۰
B(MPa) *تنش نهایی*	۲۷۰
n	۰/۲۸

جدول۲- عناصر تشکیل دهنده آلیاژ آلومینیوم

مواد	درصد ٪
Al	۹۱/۲
Si	۰/۹۳
Mg	۲/۷۳
Mn	۰/۱۸
Cu	۱/۶۱
Fe	۱/۲۵
ناخالصی	۲/۱



شکل۷- ورق آلیاژ آلومینیومی تحت فرآیند قرارگرفته

www.SID.ir

Archive of SID

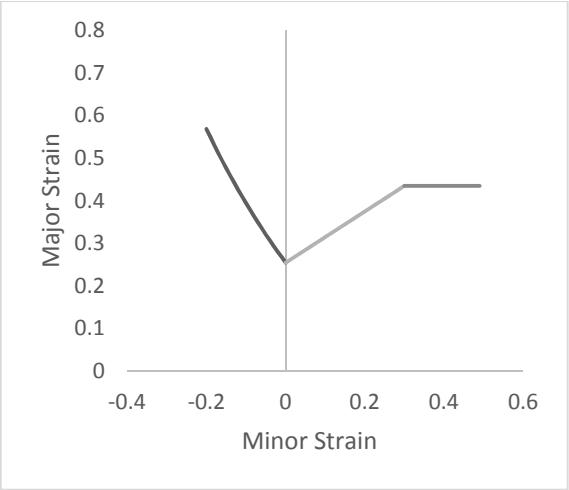
۷- نتایج

۷-۱- نمودارهای حد شکل‌دهی

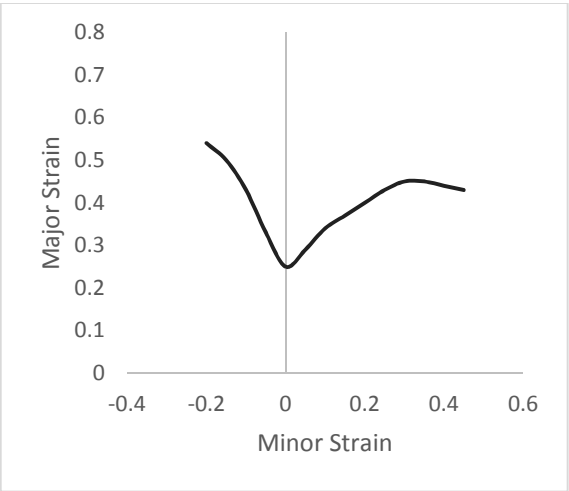
معادلات (۲)، (۳) و (۴) نشان می دهند که نمودار حد شکل‌دهی بر اساس کرنش مهندسی حداقل و حداکثر بدست می آید (شکل۸) بصورتیکه می توان آنرا به کرنش صحیح تبدیل نمود. در شکل ۹ منحنی حد شکل‌دهی ورق آلیاژ آلومینیوم بدست آمده است.

جهت بررسی دقیق تر، تست تجربی جهت بدست آوردن حد شکل-دهی استفاده شد که در شکل ۹ قابل مشاهده می باشد. با مقایسه نمودارهای شکل۸ و ۹ تطابق مناسبی بین آن وجود دارد که بیان گر قابل استفاده بودن نتایج نظری می باشد.

پس از انجام آزمایشات در حالت نرخ کرنش پایین با کمک فرآیند الکتروهیدرولیک ورق آلیاژ آلومینیومی گروه بندی شده را تحت بارگذاری قرارمیدهیم. در ناحیه ای که گلویی شدن رخ می دهد بر روی گرید های در مسیر آن، با استفاده از اندازه گیری اختلاف ابعاد ایجاد شده می توان کرنش نهایی در مسیر های مختلف بر روی ماده تا رسیدن به حد نهایی را بدست آورد. بعبارت کرنش های حداکثر و حداقل روی مسیر گلویی شدن نمودار حد شکل دهی را تعیین می کند.



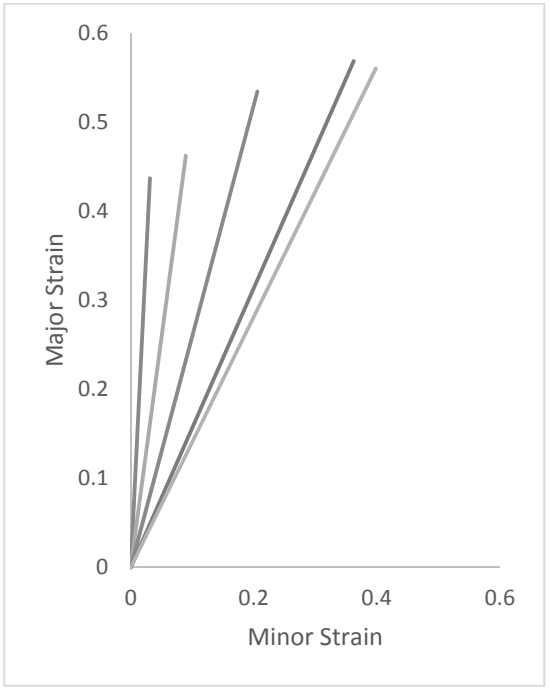
شکل۸- نمودار FLC به روش نظری برای آلیاژ آلومینیوم



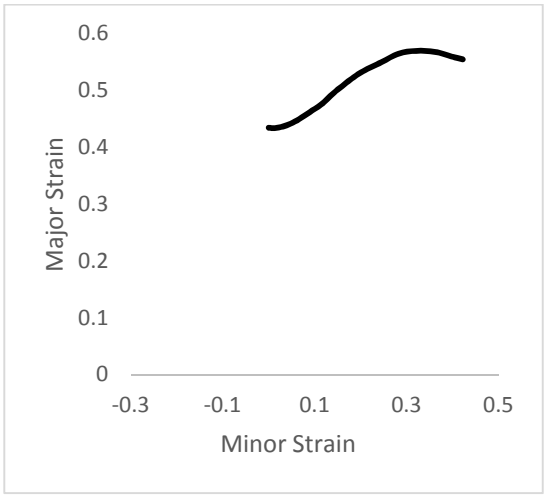
شکل ۹- نمودار FLD نیمه استاتیک در نرخ کرنش های پایین

همانگونه که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است در چند مسیر مختلف کرنش های حدی محاسبه شده. با کمک نقاط بالایی آن می توان نمودار حد شکل‌دهی در حالت نرخ کرنش بالا را بدست آورد.[۱۳]

با کمک نتایج بدست آمده در مسیرهای مختلف گلویی شدن ورق فلزی می توان نمودار حد شکل‌دهی ورق را بصورت تجربی بدست آورد. از آنجائیکه شکل ورق بصورت کامل در فرآیند استفاده شده لذا تغییر شکل بصورت دو محوری بوجود می آید که هر دو کرنش بصورت مثبت خواهند بود. این امکان وجود دارد که با برش اطراف ورق کرنش های صفحه ای و تک محوره نیز محاسبه شده و نمودار در سمت چپ محور عمودی و در حالتی که کرنش های حداقلی منفی باشد نیز محاسبه گردد. شکل ۱۱ نمودار حد شکل‌دهی ماده در حالت نرخ کرنش بالا را نشان می دهد.



شکل۱۰- مسیر های کرنش مختلف در امتداد گلویی



شکل۱۱- نمودار حدشکل‌دهی تجربی با کمک فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ

www.SID.ir

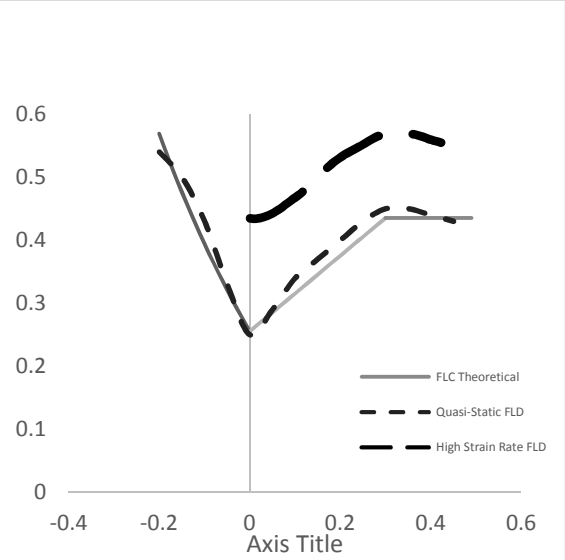
Archive of SID

با مقایسه نتایج بدست آمده در شکل ۱۲ از سه حالت فوق مشاهده می گردد که میزان حد شکل پذیری در فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ برای آلیاژ آلومینیوم به میزان ۲۶ درصد افزایش می یابد.

این افزایش با توجه نرخ کرنش بالاتر فرآیند الکتروهیدرولیک بدست آمده و بهبود شکل پذیری ورق را موجب خواهد شد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله نمودار حد شکل‌دهی در سه حالت بررسی گردید. نخست به کمک روش تئوری نمودار شکل‌دهی بدست آمده سپس به روش تجربی در حالت نیمه استاتیک و همچنین در نرخ کرنش بالا به کمک فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ محاسبه شده است. با توجه به تست های انجام گرفته نتایج ذیل بدست آمده است:



شکل ۱۲- حد شکل‌دهی سه حالت نظری، نیمه استاتیک و نرخ کرنش بالا

- با بررسی نتایج بدست آمده از معادله تئوری و تجربی نیمه استاتیک تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده است. بر این اساس می توان از معادله فوق جهت بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی استفاده نمود.
- فرآیند های نرخ کرنش بالا موجب بهبود شکل پذیری در بسیاری از مواد می گردد. هر چند در برخی از مواد طبق گزارش های انجام شده مانند آلیاژهای استیل بهبود زیادی در شکل پذیری رخ نداده است.
- بر روی ورق های آلیاژ آلومینیوم در مسیرهای مختلف جهت بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی در نرخ کرنش بالا مشاهده شد که بهبود شکل پذیری در ورق رخ خواهد داد.

۹- مراجع

[1] Lane T., Description of an Electrometer Invented by Mr. Lane; with an Account of Some Experiments Made by Him with It: In a Letter to Benjamin Franklin, LL. DFRS, *Philosophical Transactions,* Vol. 57, pp. 451-460, 1767.

[2] Priestley J., Experiments on the Lateral Force of Electrical Explosions. By Joseph Priestley, L LDFRS, *Philosophical Transactions,* Vol. 59, pp. 57-62, 1769.

[3] Yutkin L., Electrohydraulic Effect, Mashgiz, Moscow, 1955; Translation No, *AD-722, Armed Services Technical Information Agency, Arlington Hall Station, Arlington, Va*.

[4] Bruno E., *High-velocity forming of metals*: American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1968.

[5] Davies R., Austin E. R., *Developments in high speed metal forming*: Industrial Press, 1970.

[6] Chachin V., Electrohydraulic treatment of structural materials, Minsk, Nauka i Texnika, 1978.

[7] Balanethiram V., Daehn G. S., Hyperplasticity: increased forming limits at high workpiece velocity, *Scripta Metallurgica et Materialia,* Vol. 30, No. 4, pp. 515-520, 1994.

[8] Golovashchenko S. F., Gillard A. J., Mamutov A. V., Formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 213, No. 7, pp. 1191-1212, 2013.

[9] Rohatgi A., Stephens E. V., Soulami A., Davies R. W., Smith M. T., Experimental characterization of sheet metal deformation during electro-hydraulic forming, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 211, No. 11, pp. 1824-1833, 2011.

[10] Homberg W., Beerwald C., Pröbsting A., Investigation of the electrohydraulic forming process with respect to the design of sharp edged contours, in *Proceeding of,* 58-64, 2010

[11] Golovashchenko S. F., Mamutov V. S., Dmitriev V. V., Sherman A. M., Formability of sheet metal with pulsed electromagnetic and electrohydraulic technologies, 2003.

[12] Raghavan K., Van Kuren R., Darlington H., *Recent progress in the development of forming limit curves for automotive sheet steels,* 0148-7191, SAE Technical Paper, pp. 1992.

[13] Ilinich A. M., Golovashchenko S. F., Smith L. M., Material anisotropy and trimming method effects on total elongation in DP500 sheet steel, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 211, No. 3, pp. 441-449, 2011.

www.SID.ir