

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

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مهدی ظهور*
امین اشرفی تفرشی
سید میثم موسوی

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 شکل پذیری ورق با استفاده از فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ در کنار فرآیند شبه استاتیک مورد محاسبه قرار گرفته است. همچنین یک روش نظری برای مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی بررسی شده است. تست‌های تجربی الکتروهیدرولیک فرمینگ بر روی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم گردبندی شده بصورت کروی جهت بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی بررسی گردیده است. نه تنها تطابق خوبی فیما بین 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 حد شکل‌دهی، 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.

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 کوئل (سیم پیچ) تخلیه می شود. جریان الکتریکی گذرا در کوئل 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 می باشد. در این روش از تخلیه الکتریکی در داخل مایع (آب، نفت و ...) برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی و تغییر شکل ورق استفاده می شود. شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی مشابه شکل‌دهی انفجاری

۱- مقدمه

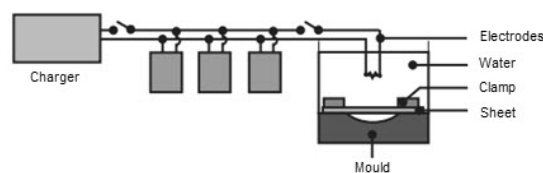
فرآیند شکل‌دهی با سرعت بالا، فرآیندی است که در آن مقداری انرژی در زمان کوتاهی آزاد می شود و قطعه کار در برابر فشار زیادی قرار می گیرد. در این روش ماده به سرعت و شتاب بالایی می رسد و فرآیند در کسر بسیار کوچکی از ثانیه پایان می پذیرد. سرعت شکل‌گیری قطعه در این شیوه بیش از 15 m/s می باشد ابزارهای مورد نیاز در این دانش بر پایه روش آزادسازی انرژی دسته بندی می شوند. شکل‌دهی انفجاری، شکل‌دهی الکترومغناطیسی و شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، مهمترین فرآیندهای شکل‌دهی با سرعت بالا می باشند. شکل‌دهی صفحات فلزی با استفاده از انرژی حاصل از انفجار و به کارگیری محیط واسط برای انتقال انرژی را فرآیند شکل‌دهی انفجاری می نامند. شکل‌دهی الکترومغناطیسی یکی دیگر از روش های شکل‌دهی قطعات فلزی است که از نیروی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mzohoor@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۹

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 شکل دهی 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 الکتروده می‌شود. (شکل ۱) 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 شکل دهی اتفاق می‌افتد. 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 الکتروده و راه دیگر تخلیه خازن از طریق سیم تعبیه شده بین دو الکتروده می‌باشد. 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 به وسیله تخلیه الکتریکی ذوب می‌شود و مجبور به جایگزینی آن بعد از هر عمل می‌گردیم). مزیت فرآیند شکل دهی 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 فرآیند بعد از یک افول چند دهه‌ای، مجدداً مورد توجه (مخصوصاً 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 فرآیند برای تولید با تیراژ بالا در صنایع استفاده کنند.

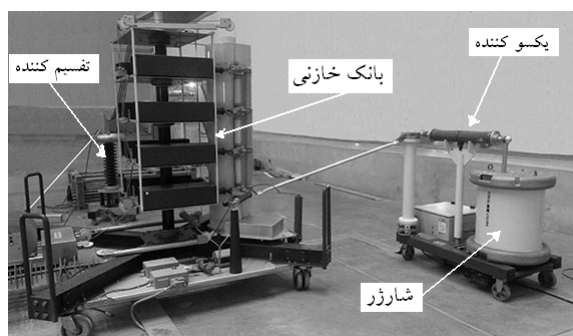


شکل ۱- طرحواره فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ

اولین مشاهده‌ها از ایجاد نیروی قوی مکانیکی حاصل از تخلیه الکتریکی در سیال، به گزارشات لین [۱] در سال ۱۷۶۷ و پریستلی در سال ۱۷۶۹ مربوط می‌شود [۲]. توسعه اولیه فرآیند الکتروهیدرولیکی توسط یوتکین [۳] در روسیه به ثبت رسید. آزمایشات اولیه جهت استفاده از این پدیده در شکل دهی به کارهای برونو در سال ۱۹۶۸ [۴]، داویس و استین در سال ۱۹۷۰ [۵] و چاچین در سال ۱۹۷۸ ورق‌ها برمی‌گردد [۶]. تحقیقات صورت گرفته روی فرآیند شکل دهی الکتروهیدرولیکی عمدتاً در سه زمینه افزایش شکل پذیری 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 ۶۰۶۱/۶۱ و بیش از ۳/۵ برابری برای چدن و مس در اثر فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ رسیده اند. گلوآشکو و

همکارانش [۸] با مقایسه تجربی بیشترین کرنش بدست آمده از فرآیند الکتروهیدرولیکی (در قالب مخروطی و V شکل) با بیشترین کرنش بدست آمده از تست LDH نشان دادند، در فرآیند الکتروهیدرولیکی امکان دسترسی به کرنش‌های بالاتری وجود دارد. بررسی‌های آنها حاکی از افزایش ۶۳ تا ۱۹۰ درصدی شکل پذیری مواد (بسته به جنس ماده) در فرآیند الکتروهیدرولیکی بود. رهتگی و همکارانش [۹] به کمک تکنیک دیجیتالی همبستگی تصویر یکسری توجیه‌های کیفی در مورد علت افزایش شکل پذیری ورق آلومینیوم در اثر شکل دهی به روش الکتروهیدرولیکی بدست آورده اند. رهتگی و همکارانش در ادامه تحقیقات خود با همان تکنیک‌های قبلی به مقایسه شکل دهی 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 می‌دهد. همبرگ و همکارانش [۱۰]، به مقایسه شکل دهی الکتروهیدرولیکی با دیگر فرایندها (هیدروفرمینگ، شکل دهی الکترومکانیکی و شکل دهی پنومکانیکی) پرداختند. آنها نتیجه گرفتند رسیدن به شعاع‌های کوچک به کمک فرآیند الکتروهیدرولیکی میسرتر است. گلوآشکو و همکارانش [۱۱] در پی یافتن علت افزایش شکل پذیری مواد در اثر فرآیند شکل دهی الکتروهیدرولیکی به بررسی تغییر ساختار متالورژیکی ورق‌ها در اثر این فرآیند پرداختند. همچنین آن‌ها از افزایش (در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد) شکل پذیری لوله‌های آلومینیومی، مسی و فولادی در اثر شکل دهی به روش الکتروهیدرولیکی در قالب‌های مثلثی، مربعی و شش گوش خبر داده‌اند.

در مقاله حاضر ابتدا نمودارهای حد شکل دهی در نرخ کرنش‌های پایین به روش‌های نظری و تجربی بدست آمده، سپس نتایج منحنی‌های حد شکل دهی با کمک فرآیند الکتروهیدرولیک که در نرخ کرنش‌های بالا رخ می‌دهد بدست می‌آید. بررسی میزان افزایش شکل پذیری در آلیاژ آلومینیوم با توجه به آزمایشات صورت گرفته نشان می‌دهد حدود بیست و شش درصد افزایش شکل پذیری در ماده بوجود آمده است.



شکل ۲- خازن و مجموعه شارژرهای تخلیه بار الکتریکی

۲- آزمایش‌های تجربی

همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تجهیزات لازم جهت ایجاد ولتاژ بالا و تخلیه بار الکتریکی در فرآیند شامل بانک خازنی، شارژر، یکسوکننده و تقسیم کننده می‌باشد. در این فرآیند با توجه به میزان ولتاژ و انرژی مورد نیاز تعداد خازن‌های مورد استفاده تعیین می‌گردد. هدف اصلی در انجام آزمایش‌های تجربی محاسبه حد شکل دهی برای آلیاژ آلومینیوم در فرآیند الکتروهیدرولیک می‌باشد. به این منظور

یابد. (ولتاژ مورد نیاز جهت انجام فرآیند)

سیم با قطر 0.3 میلیمتر از جنس مس خالص جهت بالارفتن تکرار پذیری مورد استفاده قرار گرفت.

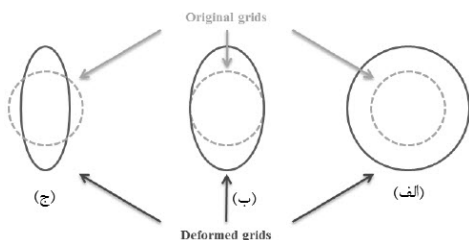
پارامترهای بعدی در فرآیند، میزان رسانایی سیال شکل‌دهی می باشد. دمای بالا و فشار بالای تخلیه الکتریکی در فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ می تواند موجب تغییر حلالیت اکسیژن و ذرات فلز در سیال شود که همه این‌ها موجب تغییر رسانایی سیال می گردد. انجام تست در هر بار موجب حل شدن سیم مسی در سیال و تغییر رنگ آن و 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 مجدداً 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 نقطه گلوبی 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 معمولاً با همبستگی تصاویر دیجیتالی^۱ 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 قطعاً الویت خواهد داشت. در تغییر شکل پلاستیک، دایره‌ها بصورت بیضی می گردد. هرچند کرنش حداکثر همواره مثبت است کرنش حداقلی می تواند مثبت، منفی یا صفر باشد (شکل ۴).

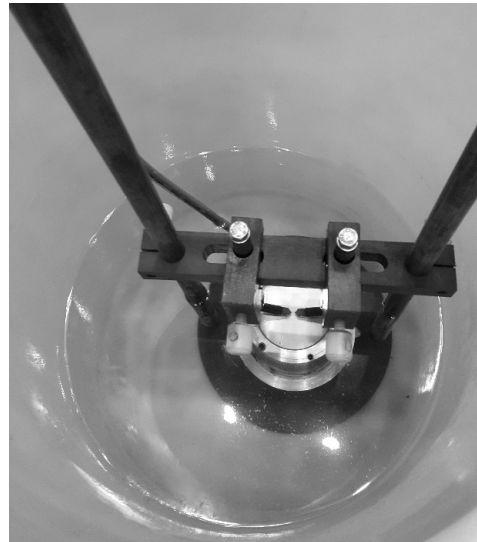
روشهای مختلفی جهت گرید بندی قطعات وجود دارد که دو روش آن متداول تر می باشد. نخست گریدهای دایروی و دوم گریدهای مربعی. گریدهای استفاده شده در این آزمایش از انواع گرد با قطر 2.5 میلی متر می باشد (شکل ۵).



شکل ۴- 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

، نمونه‌ها باید در مسیر کرنش‌های مختلفی تا رسیدن به گلوبی تغییر شکل داده شوند. قطعات گلوبی شده مابین نمونه‌های سالم و ترک خورده قرار می گیرند برای رسیدن به نمونه‌های دارای گلوبی به صورت تجربی مقدار دقیقی از انرژی باید به قطعه کار وارد شود تا بدون ترک خوردن، گلوبی در ورق رخ دهد. مقدار انرژی مورد نیاز 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.



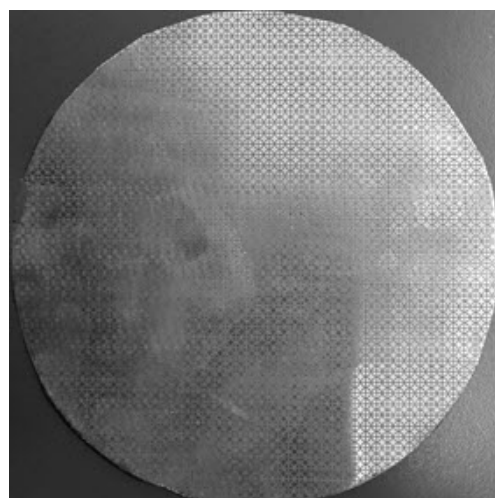
شکل ۳- محفظه و ادوات فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ

میزان انرژی تخلیه شده در فرآیند الکتروهیدرولیک فرمینگ با تغییر میزان ولتاژ ورودی مشخص می شود که این ولتاژ معمولاً مابین ۵ تا ۱۵ کیلوولت می باشد. در مواد با هندسه جدید براساس تجارب پیشین ولتاژ ورودی انتخاب می شود. اگر قطعه نمونه کاملاً شکسته شود میزان ولتاژ کاهش پیدا می کند. پس از چندین تست این امکان وجود دارد که بازه ی ولتاژ ورودی از حالت کاملاً سالم تا شکست تعیین شود. معمولاً ولتاژی که باعث ایجاد گلوبی 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. فرآیند 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 بر اثر ناکارآمدی های سیستم تغییر نکند و مقداری از انرژی تلف شود. تکرار پذیری فرآیند با کمک استفاده از سیم رابط بین الکترودها بهتر می گردد.

سیم مسی واسط می تواند مابین الکترودها نصب گردد تا انتقال الکترون‌ها راحت تر انجام شود و میزان پتانسیل ولتاژ ورودی نیز کاهش

¹ Digital Image Correlation technique

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



شکل ۵- ورق آلیاژ آلومینیومی گرید بندی شده بصورت دایروی

بندی شده و تغییر شکل یافته با تست ناکازیمبا با پرس ۷۵ تن جهت تغییر شکل نمونه در سرعت ۰٫۱ میلیمتر بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است. حد شکل دهی با همان روشی که نمونه های EHF بررسی شدند محاسبه شده است. شکل پذیری نمونه های گرید بندی شده شکل داده شده توسط تست ناکازیمبا بدست آمده است.

۵- محاسبه نظری حد شکل دهی

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

$$FLC_0 = \frac{n}{0.21} (0.223 + 0.1413t) \quad (1)$$

$$\text{for } \varepsilon_2 \leq 0 \quad \varepsilon_1 = \left[\frac{1+FLC_0}{1+\varepsilon_2} \right] - 1 \quad (2)$$

$$\text{For } 0 < \varepsilon_2 \leq 0.3 \quad \varepsilon_1 = FLC_0 + 0.6\varepsilon_2 \quad (3)$$

$$\text{for } 0.3 \leq \varepsilon_2 \quad \varepsilon_1 = FLC_0 + 0.18 \quad (4)$$

۶- ویژگی های مواد

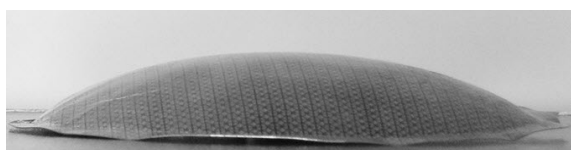
انواع مختلفی از تست ها برای تعیین شکل پذیری ورق به کار گرفته شد. مهمترین آزمایش تست کشش تک محوره جهت بدست آوردن خواص رفتار مکانیکی ماده می باشد. ضخامت ورق آلیاژی مورد استفاده ۵ میلی متر می باشد و قطر آن ۱۲ سانتی متر است. (شکل ۷)

جدول ۱- خواص رفتار مکانیکی ورق آلیاژ آلومینیوم

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

جدول ۲- 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

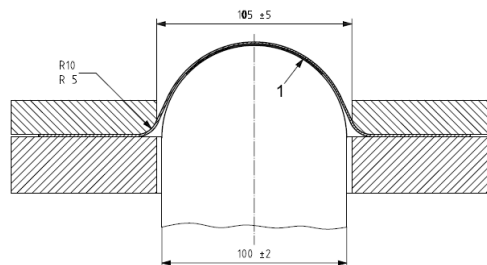


شکل ۷- ورق آلیاژ آلومینیومی تحت فرآیند قرار گرفته

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

۴- تست شکل پذیری نیمه استاتیک

حد شکل پذیری نیمه استاتیک مواد جهت تعیین میزان تغییر شکل پذیری با روش EHF مورد نیاز می باشد. در صورتی که نمودار FLC با استفاده از همان مواد محاسبه گردد قطعاً مفیدتر خواهد بود.



شکل ۶- تصویر مقطع قالب ناکازیمبا بر اساس استاندارد ISO 12004-2

نمودار FLC نیمه استاتیک بر اساس تست ناکازیمبا به دست می آید. نمودار حد شکل دهی 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

۷- نتایج

۷-۱- نمودارهای حد شکل‌دهی

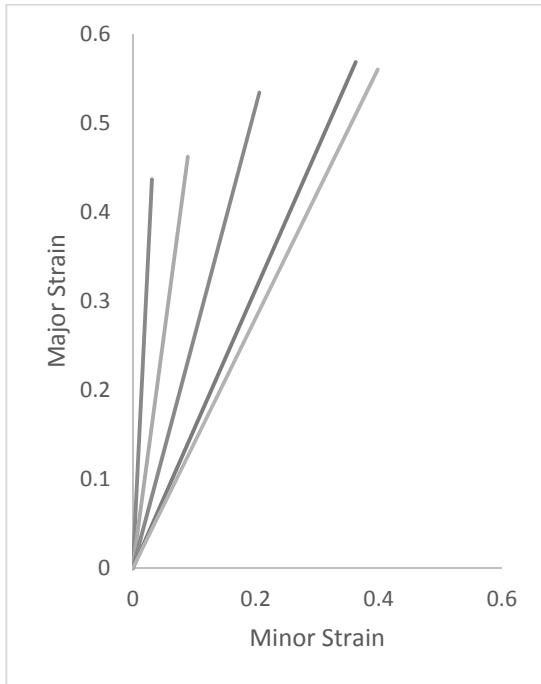
معادلات (۲)، (۳) و (۴) نشان می‌دهند که نمودار حد شکل‌دهی بر اساس کرنش مهندسی حداقل و حداکثر بدست می‌آید (شکل ۸). صورتیکه می‌توان آنرا به کرنش صحیح تبدیل نمود. در شکل ۹ منحنی حد شکل‌دهی ورق آلیاژ آلومینیوم بدست آمده است.

جهت بررسی دقیق تر، تست تجربی جهت بدست آوردن حد شکل-دهی استفاده شد که در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد. با مقایسه نمودارهای شکل ۸ و ۹ تطابق مناسبی بین آن وجود دارد که بیان‌گر قابل استفاده بودن نتایج نظری می‌باشد.

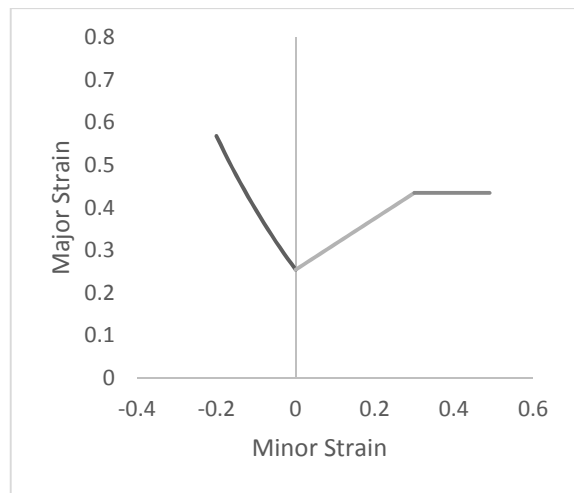
پس از انجام آزمایشات در حالت نرخ کرنش پایین با کمک فرآیند الکترویهیدرولیک ورق آلیاژ آلومینیومی گروه بندی شده را تحت بارگذاری قرار میدهم. در ناحیه ای که گلوپی شدن رخ می‌دهد بر روی گرید های در مسیر آن، با استفاده از اندازه گیری اختلاف ابعاد ایجاد شده می‌توان کرنش نهایی در مسیر های مختلف بر روی ماده تا رسیدن به حد نهایی را بدست آورد. بعبارت کرنش های حداکثر و حداقل روی مسیر گلوپی شدن نمودار حد شکل‌دهی را تعیین می‌کند.

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

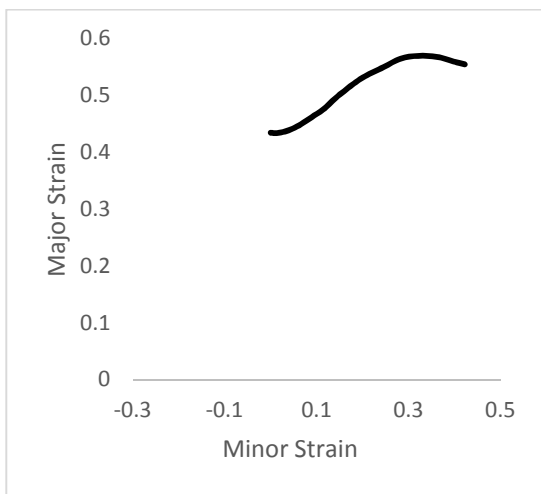
با کمک نتایج بدست آمده در مسیرهای مختلف گلوپی شدن ورق فلزی می‌توان نمودار حد شکل‌دهی ورق را بصورت تجربی بدست آورد. از آنجائیکه شکل ورق بصورت کامل در فرآیند استفاده شده لذا تغییر شکل بصورت دو محوری بوجود می‌آید که هر دو کرنش بصورت مثبت خواهند بود. این امکان وجود دارد که با برش اطراف ورق کرنش های صفحه 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 می‌دهد.



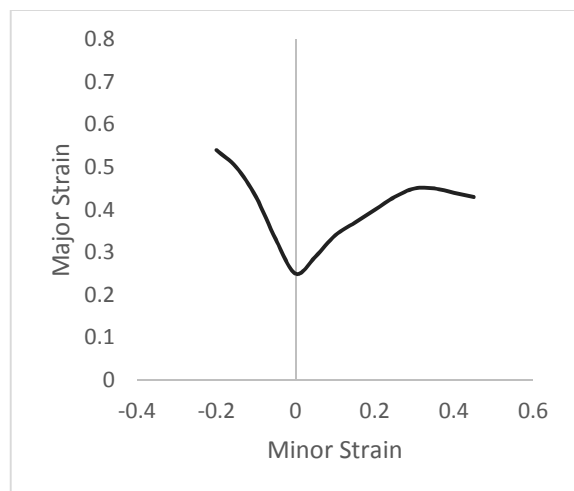
شکل ۱۰- مسیر های کرنش مختلف در امتداد گلوپی



شکل ۸- نمودار FLC به روش نظری برای آلیاژ آلومینیوم



شکل ۱۱- نمودار حد شکل‌دهی تجربی با کمک فرآیند الکترویهیدرولیک فرمینگ



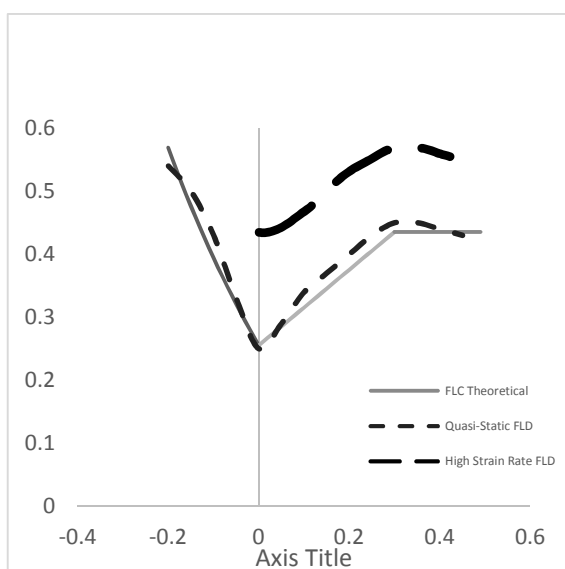
شکل ۹- نمودار FLD نیمه استاتیکی در نرخ کرنش های پایین

- [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., Soulamy 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.

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- نتیجه گیری

در این مقاله نمودار حد شکل‌دهی در سه حالت بررسی گردید. نخست به کمک روش تئوری نمودار حد 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.