



بررسی حد شکل دهی آلیاژ برنج c260 در نرخ کرنش بالا به کمک فرآیند شکل دهی الکتروهیدرولیکی

مهدی ظهور^{1*}، سید میثم موسوی²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 19395-1999، mzhoor@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 شهریور 1396
پذیرش: 21 مهر 1396
ارائه در سایت: 19 آبان 1396
کلید واژگان:
نمودار حد شکل دهی
نرخ کرنش بالا
فرایند الکتروهیدرولیکی
شبیه سازی عددی

چکیده

نمودارهای حد شکل دهی ابزاری مناسب برای پیش بینی ناپایداری ورق در فرایندهای شکل دهی است. هدف از این تحقیق ارزیابی شکل پذیری ورق برنج 260 تحت نرخ کرنش های مختلف (به ویژه نرخ کرنش بالا) است. برای این منظور سه سری آزمایش تجربی طراحی شده است: آزمون ناکازیم (جهت تعیین نمودار حد شکل دهی در شرایط شبه استاتیکی)، شکل دهی هیدرودینامیکی (جهت تعیین نمودار حد شکل دهی در شرایط نرخ کرنش متوسط) و شکل دهی الکتروهیدرولیکی (جهت تعیین نمودار حد شکل دهی در شرایط نرخ کرنش بالا). شکل دهی الکتروهیدرولیکی یک فرایند شکل دهی ورق فلزی با سرعت بالاست که در آن دو یا تعداد بیشتر الکترود در محفظه ای پر از آب قرار دارند و تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا بین آن ها، فشار بالایی جهت شکل دادن ورق ایجاد می کند. از کوپل فرمولاسیون لاگرانژی- اویلری انتخابی با الگوریتم اندرکنش سیال و سازه (در نرم افزار آلس دینا در دسترس است) جهت شبیه سازی عددی این فرایند و طراحی هندسه ورق ها استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که حد شکل دهی ورق برنجی در فرایند الکتروهیدرولیکی تقریباً 11% نسبت به حالت شبه استاتیکی افزایش می یابد، همچنین شکل پذیری این ماده تحت فرایند هیدرودینامیکی 4% بیش از مقدار شبه استاتیکی است.

Investigation of forming limit of brass alloy c260 at high strain rate by using electrohydraulic forming process

Mehdi Zohoor*, Seyed Meysam Mousavi

Faculty of Mechanical Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, mzhoor@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 September 2017
Accepted 13 October 2017
Available Online 10 November 2017

Keywords:
Forming limit diagram (FLD)
High strain rate
Electrohydraulic process
Numerical simulation

ABSTRACT

Forming limit diagrams (FLDs) are useful tools for prediction of the instability of sheet in metal forming. The goal of this study is to evaluate the formability of 260 brass alloy sheets under various strain rates (particularly at high strain rate). Three types of experimental procedure were developed: Nakazima test (for determination of the FLD at quasi-static condition), hydrodynamic forming (for determination of the FLD at intermediate strain rate) and Electrohydraulic forming (for determination of high strain rate FLD). Electrohydraulic forming (EHF) is a high velocity sheet metal forming process in which two or more electrodes are positioned in a water filled chamber and a high-voltage discharge between the electrodes generates a high pressure to form the sheet. Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) formulations coupled with fluid-structure interaction (FSI) algorithms (that are available in the advanced finite element code LS-DYNA) were used to the numerical simulation of process and design of sheet metal specimen geometries. It was found that the forming limits of brass 260 in EHF increased more than 11% relative to the quasi-static. In addition, the formability of this material under the hydrodynamic loading is 4% higher than quasi-static values.

1- مقدمه

قسمت چپ نمودار حد شکل دهی را نیز در نظر گرفته بود. از جمله پارامترهای مؤثر بر منحنی های حد شکل دهی ورق، نرخ کرنش ایجاد شده در آن است. نخستین تحقیقات در زمینه افزایش شکل پذیری ورق در اثر افزایش نرخ کرنش به کارهای کلارک [3] و وود [4] برمی گردد.

در سال های اخیر مجدداً برخی گزارش ها مبنی بر افزایش شکل پذیری مواد طی فرایندهای با نرخ کرنش بالا² منتشر شده است. این امر موجب اقبال

منحنی های حد شکل دهی¹ در حقیقت محدوده کرنش هایی است که یک ورق می تواند تحمل کند. مقاله ای که در سال 1965 توسط کیلر [1] منتشر شد را می توان سرآغاز رسم نمودارهای حد شکل دهی با شکل کنونی دانست. نمودارهای کیلر کرنش های حدی منفی (سمت چپ نمودار FLD) را نداشت. در سال 1968 گودوین مقاله ای را منتشر کرد [2] که کرنش های حدی در

² High Strain Rate/Velocity Forming

¹ Forming Limit Diagram (FLD)

Please cite this article using:

M. Zohoor, S. M. Mousavi, Investigation of forming limit of brass alloy c260 at high strain rate by using electrohydraulic forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 207-216, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

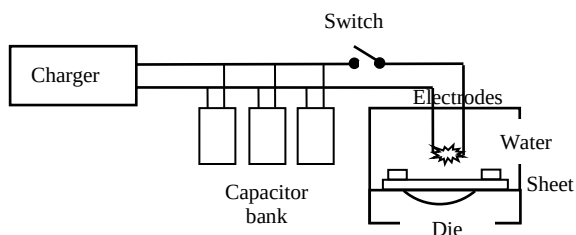


Fig. 1 Schematic of sheet metal forming with EHF [20]

شکل 1 شماتیک شکل دهی ورق فلزی توسط فرایند الکترو هیدرولیکی [20]

برخلاف نتایج برخی تحقیقات که حکایت از افزایش شکل پذیری ورق دارد، آزمایش های انجام شده توسط ایمبرت [6]، اولیویرا [7] و گولواشنکو [21] با استفاده از فرایند شکل دهی الکترومغناطیسی حاکی از عدم افزایش شکل پذیری مواد در نرخ کرنش بالاست.

در این تحقیق سعی شده است منحنی حد شکل دهی ورق برنجی 260 در نرخ کرنش های متفاوت (به خصوص نرخ کرنش بالا طی فرایند الکترو هیدرولیکی)، به صورت تجربی ارائه شود. جهت طراحی هندسه قطعات مورد استفاده در آزمایش ها، بررسی مسیر کرنش آن ها در طی فرایند و همچنین تخمین نرخ کرنش، شبیه سازی فرایند شکل دهی الکترو هیدرولیکی نیز انجام شده است.

2- آزمایش های تجربی

جهت به دست آوردن منحنی حد شکل دهی در نرخ کرنش های متفاوت سه سری آزمایش تجربی انجام شد.

- آزمایش های سری اول: تعیین منحنی حد شکل دهی در شرایط شبه استاتیکی توسط آزمون ناکازیم،
- آزمایش های سری دوم: تعیین منحنی حد شکل دهی در شرایط نرخ کرنش پائین توسط فرایند شکل دهی هیدرودینامیکی،
- آزمایش های سری سوم: تعیین منحنی حد شکل دهی در شرایط نرخ کرنش بالا توسط فرایند شکل دهی الکترو هیدرولیکی،

2-1- ورق مورد تحقیق

در این تحقیق از ورق برنجی 260 به شکل دایره (به ترتیب با قطر و ضخامت 110 و 1 میلی متر) استفاده شده است. این آلیاژ بهترین ترکیب شکل پذیری و استحکام را در بین برنج ها داراست و انتخاب مناسبی برای کشش عمیق است. ترکیب شیمیایی این ماده در جدول 1 بیان شده است. نتایج آزمون کشش سنتی که مطابق استاندارد ASTM-E8 انجام شده در جدول 2 و شکل 2 قابل مشاهده است.

2-2- آزمون ناکازیم^۳

در این تحقیق جهت تعیین نمودار حد شکل دهی در شرایط شبه استاتیکی از

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق برنجی

Table 1 Chemical composition of brass 260 in weight percentage

مقدار	پارامتر
68.5-71.5	Cu
<=0.05	Fe
<=0.07	Pb
28.5-31.5	Zn

³ Nakazima test

دوباره محققین به فرایندهای شکل دهی با سرعت بالا شده است. از جمله محققینی که در سال های اخیر به این موضوع پرداخته اند، گروه هایی به سرپرستی ورس ویک [5-7]، دائن [8-10]، داریانی [11، 12]، رهنکی [13، 14]، گولواشنکو [15-17]، زمانی [18] و هاشمی [19] است.

شکل دهی انفجاری، الکترومغناطیسی و الکترو هیدرولیکی مهم ترین فرایندهای شکل دهی با سرعت بالاست. شکل دادن با استفاده از انرژی حاصل از انفجار و به کارگیری محیط واسط (آب، هوا و...) برای انتقال انرژی را فرایند شکل دهی انفجاری می نامند. شکل دهی الکترومغناطیسی یکی دیگر از روش های شکل دهی قطعات فلزی با سرعت بالاست که در آن از نیروی الکترومغناطیس به عنوان عامل شکل دهی استفاده می شود. در فرایند شکل دهی الکترومغناطیس مقدار قابل توجهی انرژی الکتریکی در بانک خازنی ذخیره شده و با استفاده از سوئیچ های ولتاژ بالا به سرعت درون سیم پیچی تخلیه می شود. جریان الکتریکی در سیم پیچ یک میدان مغناطیسی گذرای شدید تولید می کند. جریان گردابی القا شده درون قطعه کار با میدان مغناطیسی اولیه تعامل کرده و سبب دفع متقابل قطعه کار و سیم پیچ می شود. نیروی دافعه به قدری زیاد است که تنش بزرگ تر از استحکام تسلیم ماده اعمال می کند و سبب تغییر شکل دائمی آن می گردد. شکل دهی الکترو هیدرولیکی یکی از فرایندهای منحصربه فرد شکل دهی با سرعت بالاست. این فرایند مشابه شکل دهی انفجاری است با این تفاوت که برای ایجاد موج شوک به جای استفاده از مواد منفجره از انفجار الکتریکی استفاده می شود. در این فرایند تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا بین دو الکترود (بیشتر) در یک محفظه پر از سیال موجب ایجاد کانال پلاسما بین آن ها می شود. انبساط این کانال پلاسما منجر به ایجاد موج شوک در سیال و شکل دهی ورق می گردد. شماتیک فرایند شکل دهی الکترو هیدرولیکی در شکل 1 نشان داده شده است.

دائن و بالانتیرام [9] نتایج بسیار خوش بینانه ای از افزایش شکل پذیری ورق (در حدود 5.5 برابر برای AA6061-T4 و 3.5 برابر برای چدن و مس) توسط فرایند الکترو هیدرولیکی در مقایسه با فرایندهای سنتی گزارش کرده اند. تحقیقات رهنکی و همکاران [14] (با به دست آوردن میزان سرعت، کرنش و نرخ کرنش به کمک تکنیک دیجیتال همبستگی تصویر^۱) یک سری توجیه های کیفی در مورد دلیل افزایش شکل پذیری ورق آلومینیوم در اثر شکل دهی به روش الکترو هیدرولیکی در اختیار خواننده قرار می دهد.

گولواشنکو و همکاران از افزایش (در حدود 10% - 15%) شکل پذیری لوله های آلومینیومی، مسی و فولادی در اثر شکل دهی به روش الکترو هیدرولیکی در قالب های مختلف خبر داده اند [16]. آن ها همچنین با مقایسه تجربی بیشترین کرنش به دست آمده از فرایند الکترو هیدرولیکی (در قالب مخروطی و V شکل) با بیشترین کرنش به دست آمده از آزمون LDH نشان دادند [15] در فرایند الکترو هیدرولیکی امکان دسترسی به کرنش های بالاتری وجود دارد. بررسی های آن ها حاکی از افزایش 63 تا 190 درصدی شکل پذیری مواد (بسته به جنس ماده) در فرایند الکترو هیدرولیکی بود.

انگیزه اصلی گولواشنکو و همکاران از انجام این تحقیق در پژوهشگاه اتومبیل سازی فرد^۲ بررسی امکان ساخت قطعاتی از بدنه خودرو با استفاده از آلیاژهایی سبک تر و مستحکم تر از پیش (که به دلیل نداشتن خاصیت مغناطیسی مناسب امکان شکل دهی آن ها به روش الکترومغناطیسی وجود نداشت) بوده است.

¹ Digital Image Correlation technique

² Ford Motor Company

مکانیکی است. اجزاء الکتریکی شامل سیستم کنترل، واحد تولید پالس، الکترودها و نگه دارنده آنهاست. کنترل زمان و میزان شارژ خازن ها، همچنین رسم نمودارهای ولتاژ و جریان تخلیه الکتریکی از طریق سیستم کنترل میسر است. واحد تولید پالس از چهار طبقه خازن با ظرفیت حداکثر 20 میکرو فاراد (که قابلیت شارژ تا حداکثر 50 کیلوولت را دارند) تشکیل شده است. اجزای جانبی واحد تولید پالس شامل شارژر، یکسوکننده، مقاومت های پیشانی و پشت موج و تقسیم کننده است (شکل 5).

در این تحقیق الکت رودها از جنس مس (که با چندلایه عایق الکتریکی ولتاژ بالا پوشیده شده اند) است. تنظیم فاصله الکترودها از یکدیگر و الکترودها از ورق از طریق سیستم نگه دارنده امکان پذیر است. شکل پذیری ورق در حالت شکل دهی بدون قالب و با قالب (به دلیل برخورداری از نرخ کرنش بالاتر و وجود تنش فشاری و برشی در راستای ضخامت در حالت با قالب) متفاوت است. فرایند شکل دهی ورق در این پژوهش در واقع شکل دهی بدون قالب² است. صرفاً جهت کلمپ کردن ورق از یک استوانه تو خالی از جنس فولاد ضدزنگ در زیر ورق استفاده شده است (شکل 6).

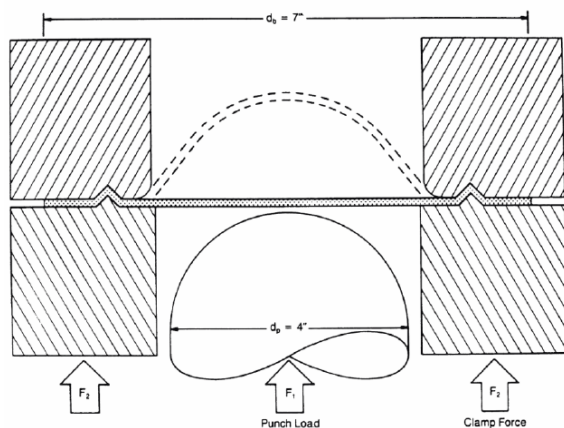


Fig. 3 Schematic of the Nakazima test

شکل 3 شماتیک آزمون ناکازیم

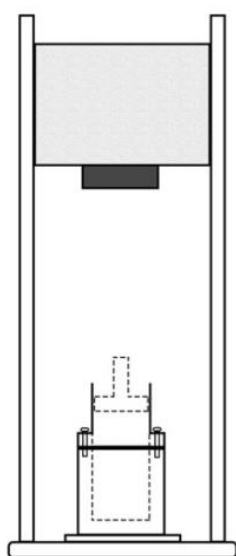


Fig. 4 Schematic of the Hydrodynamic Forming

شکل 4 شماتیک فرایند شکل دهی هیدرودینامیکی

جدول 2 خواص مکانیکی ورق برنجی 260 (آزمون کشش سنتی)

Table 2 Mechanical properties of Brass 260 (conventional tensile test)

پارامتر	مقدار
Ultimate Tensile Strength (MPa)	550
Yield Strength (MPa)	185
Elastic Modulus (GPa)	110
Strain at Break (%)	30

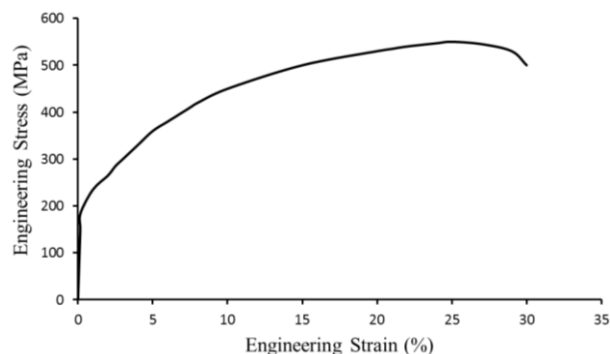


Fig. 2 Engineering stress - strain curve for Brass 260

شکل 2 نمودار تنش - کرنش برنج 260

آزمون ناکازیم (مطابق استاندارد ISO-12004) استفاده شده است [22]. هر چند بعضی تحقیقات از ایجاد اختلاف در نتایج در اثر استفاده از سنبه سرکروی یا صاف حکایت دارند [23]، ولی در این تحقیق آزمون ناکازیم ترجیح داده شده است. این آزمون شامل کشش ورق تا پارگی با استفاده از سنبه سرکروی است (شکل 3). جهت تغییر شکل نمونه پرس 75 تن با سرعت 0.1 میلی متر بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است. ورق (جهت جلوگیری از کشیده شدن) در تمامی این آزمایش ها کاملاً کلمپ شد.

2-3- فرایند شکل دهی هیدرودینامیکی¹

در این تحقیق جهت تعیین نمودار حد شکل دهی در شرایط نرخ کرنش پایین از فرایند شکل دهی هیدرودینامیکی استفاده شده است. در این روش ورق با به کارگیری انرژی حاصل از رها کردن وزنه و انتقال آن به سیال تغییر شکل می یابد. به عبارت دیگر فشار ناشی از ضربه در یک فرایند کنترل شده بر قطعه کار منتقل گشته و عمل شکل دهی صورت می گیرد [24]. پارامترهای مؤثر این فرایند بر نمودار حد شکل دهی به طور تحلیلی و تجربی در [25] بیان شده است.

دلیل عدم استفاده از پرتاب مستقیم سنبه استفاده شده در مرحله قبل (و به کارگیری سیال واسطه) هر چه شبیه تر شدن این فرایند به فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی است. آزمایش ها با استفاده از وزنه ای به جرم 50.8 کیلوگرم که تا ارتفاع مورد نیاز (جهت ایجاد تغییر شکل لازم) بالا برده انجام شده است. حداکثر انرژی جنبشی و سرعت چکش سقوط آزاد به ترتیب 2.54 کیلوژول و 10 متر بر ثانیه است. شماتیک این فرایند در شکل 4 قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که سعی شد تا با حداقل تغییرات از همان محفظه ای که در فرایند الکتروهیدرولیکی جهت مهار ورق به کار گرفته می شود، استفاده شود.

2-4- فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی

تجهیزات فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی شامل دو قسمت الکتریکی و

² Free Forming

¹ Hydrodynamic Forming

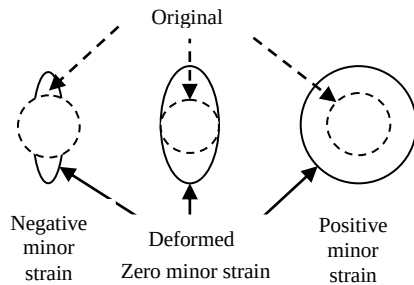


Fig. 8 Original and deformed grids for strain measurement

شکل 8 شبکه دایروی اولیه و تغییر شکل یافته جهت اندازه گیری کرنش

شرایط زیر را مهیا کنند.

- با ایجاد پراکندگی مناسب از نقاط گلولی شده، اطلاعات لازم جهت ترسیم محدوده وسیعی از کرنشها (اعم از مثبت و منفی) در نمودار حد شکل دهی را ایجاد کنند.
- در طول فرایند بیشینه تنشها در محل مورد مطالعه قطعه ایجاد شوند تا ورق از محل ناخواسته پاره نشود.
- در طول فرایند مسیر کرنشهای ایجاد شده در محل مورد مطالعه قطعه خطی (شبه خطی) باشند.

جهت رسیدن به این الزامات با استفاده از شبیه سازی فرایند و آزمودن هندسه های مختلف برای قطعات بهترین ابعاد انتخاب گردید. این روش توسط دیگر محققین نیز استفاده شده است [2717]. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار ال اس داینه⁵ فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی در دیدگاه لاگرانژی-اویلری انتخابی⁶ شبیه سازی شده است. مشخصات هندسی فرایند در شبیه سازی دقیقاً مطابق آزمایش های تجربی در نظر گرفته شده است.

میزان انرژی تزریق شده به کانال پلاسما جهت اعمال اثر تخلیه الکتریکی با اندازه گیری مقادیر ولتاژ و جریان تخلیه در آزمایش های تجربی محاسبه می گردد. توان الکتریکی تزریق شده به کانال پلاسما برابر با رابطه (1) است

$$N(t) = I(t) \cdot U(t) \quad (1)$$

در آن $I(t)$ و $U(t)$ به ترتیب جریان و ولتاژ تخلیه اندازه گیری شده بین دو الکترود است. شماتیک نمودارهای $I(t)$ و $U(t)$ که از آزمایش به دست می آید. در این رویکرد کانال پلاسما (ایجاد شده بین دو الکترود در اثر تخلیه الکتریکی) به عنوان حباب گاز ایده آلی که منبسط می شود، در نظر گرفته می شود. امکان استفاده از حباب گاز ایده آل برای مدل کردن رفتار کانال پلاسما به اثبات رسیده است [28]. انرژی الکتریکی محاسبه شده از رابطه (1) به طور یکنواخت در کل حجم کانال پلاسما وارد شده است. فشار هر یک از المان های کانال پلاسما با استفاده از معادله حالت رابطه (2) محاسبه می گردد.

$$P_{ch} = (\gamma - 1) \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) E \quad (2)$$

که در آن P_{ch} فشار، ρ چگالی جرمی لحظه ای، ρ_0 چگالی جرمی اولیه و E انرژی تولید شده در گاز درون کانال است. γ شاخص آدیاباتیک پلاسما که برابر 1.26 است [29].

برای کانال پلاسما از ماده بلاثر⁷ و معادله حالت خطی چند جمله ای همراه نشت انرژی⁸ (رابطه (3)) استفاده شده است.



Fig. 5 Electrohydraulic forming apparatus

شکل 5 تجهیزات فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی



Fig. 6 Electrode system in the water chamber

شکل 6 سیستم الکترود در محفظه آب

2-5- اندازه گیری کرنشها و تعیین وضعیت دایره های شبکه

جهت اندازه گیری میزان کرنش ورقها از روش تحلیل شبکه بندی¹ استفاده گردید. براساس استاندارد انجمن مواد و آزمون آمریکا² الگویی با شبکه بندی دایروی به قطر 2.54 میلی متر به روش الکتروشیمیایی بر نمونه ها حکاکی شد. دایره های طی فرایند شکل دهی به بیضی هایی با اندازه متفاوت تبدیل می شوند (شکل 7). پس از انجام آزمایش با اندازه گیری قطرهای کوچک و بزرگ بیضی ها و مقایسه آنها با دایره های اولیه، کرنش های بیشینه³ و کمینه⁴ محاسبه شدند (شکل 8). پس از انجام آزمایش ها هر یک از دایره های حکاکی شده روی ورق سه وضعیت خواهند داشت؛ دایره هایی که شکست در آنها رخ داده، دایره ای که شکست در آنها روی نداده و دایره هایی از شبکه بندی که به شکست بسیار نزدیک شده اند. با استفاده از روش پیشنهادی گرین و بلک [26] وضعیت دایره های محل مورد مطالعه قطعه، تعیین وضعیت شد. نحوه شبکه بندی، اندازه گیری و تحلیل کرنشها در هر سه آزمایش یکسان انجام شد.

2-3- شبیه سازی عددی فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی

هندسه قطعات مورد استفاده در آزمایش های تجربی باید به گونه ای باشند که

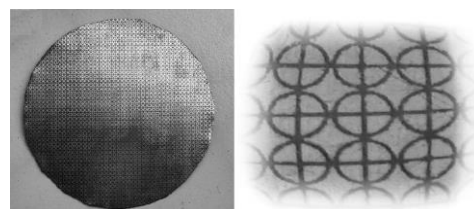


Fig. 7 Initial & after deformation circular grids

شکل 7 شبکه دایروی روی ورق قبل و بعد از تغییر شکل

⁵ LS-DYNA

⁶ Arbitrary Lagrangian-Eulerian

⁷ NULL

⁸ LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK

¹ Grid Analysis

² ASTM E2218

³ Major Strain

⁴ Minor Strain

4- نتایج و بحث

نهایتاً در این تحقیق جهت انجام آزمایش‌ها سه شکل برای قطعه کارها انتخاب گردید که به خوبی شرایط لازم برای ورق را ارضاء می‌کنند (شکل 9). مسیر کرنش این سه قطعه (در ناحیه گلوئی شدن) طی فرایند در شکل 10 قابل مشاهده است. بسته به شرایط آزمایش نرخ کرنش‌هایی در حدود 3500 بر ثانیه برای ورق پیش‌بینی شد (شکل 11).

هر چند شبیه‌سازی فرایند این امکان را فراهم می‌کند که در آزمایش‌های تجربی با سعی و خطای کمتری (در تخمین میزان انرژی تخلیه لازم) به کرنش‌های بحرانی، نائل شویم، ولی جهت رساندن ورق به شرایط مطلوب تعدادی آزمایش اولیه انجام شد (شکل 12). رفتار ورق طی فرایند (از جمله مقدار کرنش‌ها، محل وقوع شکستگی و...) دقیقاً مطابق با پیش‌بینی‌های انجام شده توسط شبیه‌سازی است (شکل 13). این موضوع تأییدی بر صحت هندسه تعیین شده برای قطعه کارهاست.

از مزایای این تحقیق نسبت به کارهای مشابه، تلاش در شبیه کردن هر

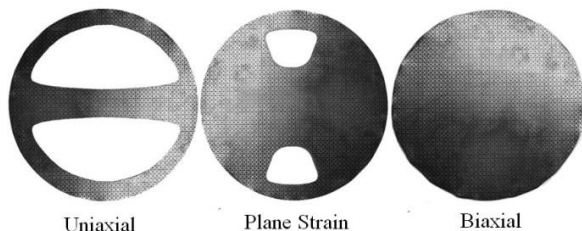


Fig. 9 Designed Specimen for the Experiments

شکل 9 قطعات طراحی شده برای آزمایش‌ها

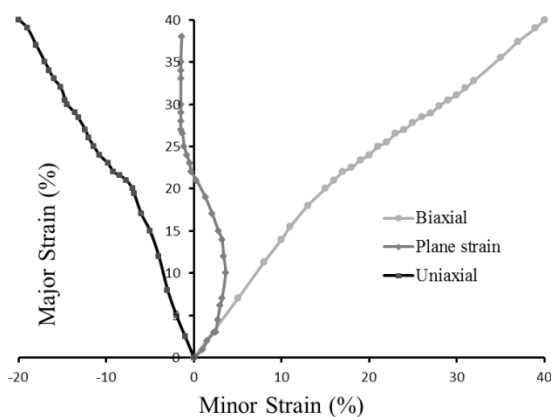


Fig. 10 Predicted strain path for each specimen

شکل 10 مسیر کرنش پیش‌بینی شده هریک از قطعات

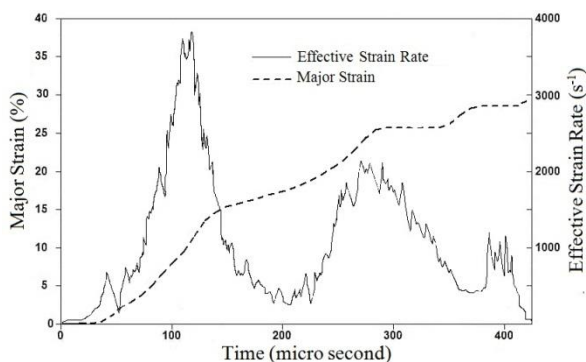


Fig. 11 Predicted strain rate

شکل 11 نرخ کرنش پیش‌بینی شده

$$P_{ch} = C_0 + C_1\mu^2 + C_2\mu^3 + C_3\mu + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)\dot{\epsilon} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

C_0 الی C_6 ضرایب‌های ثابتی هستند که با انجام یک محاسبه ساده می‌توانند طوری تعیین شوند که رابطه (2) را به (3) تبدیل کند.

مدل توصیف‌کننده رفتار ورق نقش بسزایی در کیفیت شبیه‌سازی دارد. ناهمسانگردی و نرخ کرنش در رفتار ورق تحت فرایند شکل‌دهی الکترو هیدرولیکی بسیار مؤثر هستند. در این تحقیق از ناهمسانگردی در مقابل نرخ کرنش صرف‌نظر شده است. ورق به روش المان محدود و به صورت پوسته¹ با المان‌های مربعی به طول تقریبی 1.3 میلی‌متر مدل‌سازی شده است. برای توصیف رفتار ورق مدل جانسون-کوک² (رابطه 4) انتخاب شده است (جدول 3). در این رابطه σ تنش و ϵ کرنش پلاستیک مؤثر ماده است. $\dot{\epsilon}_0$ و n به ترتیب نرخ کرنش لحظه‌ای و نرخ کرنش مرجع هستند. T دمای لحظه‌ای ماده، T_0 دمای اتاق و T_m دمای ذوب ماده است.

$$\sigma = [A + B(\epsilon)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (4)$$

رفتار آب توسط ماده بلاثر و معادله حالت گرونینز³ (رابطه 5) مدل‌سازی شده است. پارامترهای موردنیاز جهت مدل کردن رفتار آب در جدول 4 آورده شده است که در آن P فشار، μ نسبت تراکم، C سرعت صوت و E انرژی داخلی است.

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_2 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) \quad (5)$$

انتقال موج شوک از آب به ورق توسط قیدی که به همین منظور تعبیه شده⁴ صورت گرفته است، همچنین برای تعریف تماس المان‌های کانال پلاسما و آب از فرمولاسیون چند ماده‌ای⁵ استفاده شده است. المان‌های آب از نوع توپر⁶ و مکعبی است. لبه‌های ورق مطابق شرایط آزمایش تجربی کاملاً کلمپ شده است. جزئیات بیشتر از این شبیه‌سازی در [20] قابل مطالعه است. رویکردهای متفاوت در پیش‌بینی عددی نمودارهای حد شکل‌دهی در [30] قابل مطالعه است.

جدول 3 پارامترهای مورد استفاده در مدل ورق برنجی [31]

Table 2 Material parameters used for brass sheet [31]

پارامتر	مقدار
A (MPa)	112
B (MPa)	505
C	0.009
m	1.68
n	0.42

جدول 4 پارامترهای مورد استفاده در ماده و معادله حالت آب

Table 3 Material and equation of state parameters for water

پارامتر	مقدار
چگالی اولیه ρ_0	1000
سرعت صوت C	1480
γ_0	0.5
a	0
S_1	2.56
S_2	1.986
S_3	1.2268

¹ SHELL

² JOHNSON_COOK

³ GRUNEISEN

⁴ CONSTRAINED-LAGRANGE-IN-SOLID

⁵ ALE-MULTI-MATERIAL-GROUP

⁶ Solid

معادله ساختاری ماده (در نرخ کرنش بالا) [4] نسبت می‌دهند. نرخ کرنش بالا سبب به تعویق افتادن ناپایداری² و در نتیجه تأخیر در گلوئی شدن و شکست می‌شود. از طرف دیگر نیروی اینرسی با پراکنده کردن تغییر شکل در سراسر قطعه موجب تأخیر در گلوئی شدن و شکست می‌شود. برخی از محققین معتقدند اثر عامل اینرسی نسبت سایر عوامل پررنگ‌تر است [34,33].

تغییر ریزساختار در ورق‌های تحت شکل دهی الکتروهیدرولیکی در [36,35] به طور مفصل مورد مطالعه قرار گرفته است.

5- نتیجه گیری

انگیزه اصلی از بررسی رفتار مواد تحت شکل دهی با سرعت بالا، بهره‌گیری از افزایش شکل‌پذیری آن‌ها در این شرایط است. هدف از این پژوهش ارائه نمودار حد شکل دهی آلیاژ برنج 260 تحت نرخ کرنش‌های مختلف (به ویژه نرخ کرنش بالا) است. جهت نیل به این هدف ورق با استفاده از آزمون ناکازیم (شبه استاتیکی)، بارگذاری هیدرودینامیکی (نرخ کرنش پائین) و بارگذاری الکتروهیدرولیکی (نرخ کرنش بالا) شکل داده شد. از شبیه‌سازی برای طراحی قطعه کارها، اطمینان از خطی بودن مسیر کرنش و محل وقوع شکست، تخمین نرخ کرنش و همچنین کاهش سعی و خطا در رسیدن به شرایط موردنیاز (جهت وقوع گلوئی شدن در قطعه) استفاده شد. در نهایت نتایج زیر قابل استخراج است:

- استفاده از اصول طراحی آزمایش‌ها³ در انجام آزمایش‌ها این امکان را می‌دهد که با حداقل تعداد آزمایش (در این حالت مجموعاً 10 آزمایش مجزا) نتایجی قابل اطمینان و با حداقل خطا حاصل شود. طبق نتایج به‌دست‌آمده شکل‌پذیری ورق در بارگذاری هیدرودینامیکی هرچند کم (در حدود 4%)، ولی نسبت به حالت شبه استاتیکی بهبود می‌یابد.

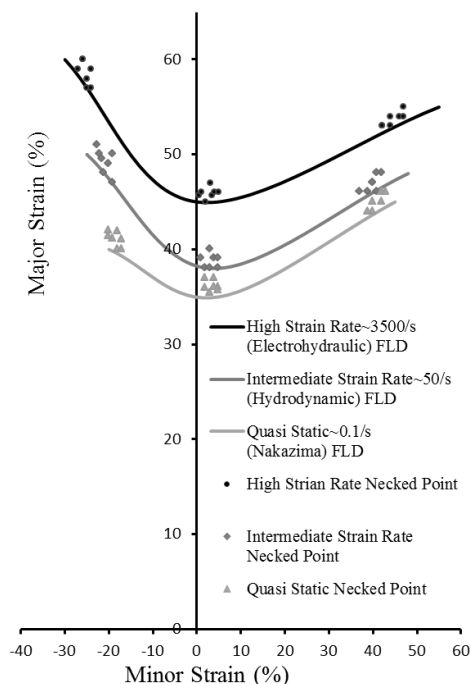


Fig. 14 FLDs of Brass 260 sheet under various strain rates

شکل 14 نمودارهای حد شکل دهی برنج 260 در نرخ کرنش‌های مختلف

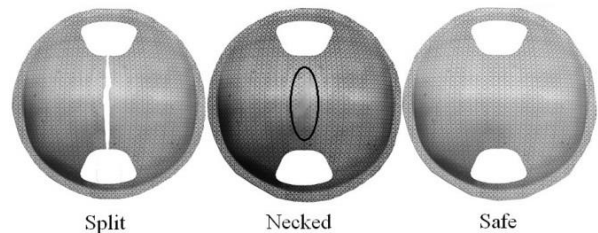


Fig. 12 safe, necked and split specimens

شکل 12 قطعات سالم، گلوئی شده و شکافته شده

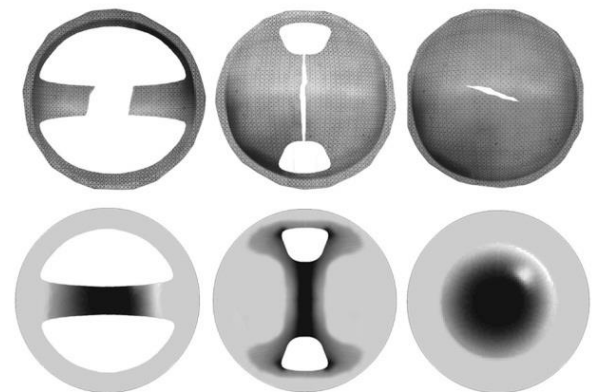


Fig. 13 Comparison of experimental and numerical specimens

شکل 13 مقایسه قطعات در شبیه‌سازی و آزمایش

چه بیشتر شرایط آزمایش (از نظر شکل قطعه کار، محفظه نگهدارنده ورق، نحوه شبکه‌بندی ورق، تحلیل آن و...) در هر سه سری آن است. همین شباهت است که کشیدن نمودارهای حاصل در یک شکل را منطقی می‌کند. از دیگر مزایای این مطالعه عدم استفاده از ورق واسط¹ بین سیال و قطعه کار است. دلیل این موضوع آن است که از شرایط غیریکنواخت اصطکاک (که ممکن است ایجاد شود) بین ورق واسط و قطعه کار جلوگیری به عمل آید. فرار سیال در حالت‌هایی که ورق سوراخ دارد، موجب می‌شود که برای رسیدن به حالت گلوئی شدن انرژی بیشتری (نسبت به حالتی که ورق کامل است) لازم باشد. پارامترهای مؤثر این فرایند (جهت نیل به گلوئی شدن) در [32] مورد مطالعه قرار گرفته است. وقوع گلوئی و شکافته شدن ورق درست در محل مورد انتظار یکی دیگر از امتیازات این تحقیق در مقایسه با کار دیگران است. چنانچه قطعه پیش از رسیدن به حالت گلوئی در مرکز آن از جای دیگری شکافته شود (مانند [11])، حالت تنش و کرنش به طور ناگهانی تغییر می‌کند و امکان استفاده از آن قطعه در ترسم نمودار حد شکل دهی وجود نخواهد داشت.

نمودار حد شکل دهی برای آلیاژ برنج 260 (در نرخ کرنش‌های متفاوت) در شکل 14 ارائه شده است. منحنی ارائه شده بهبود شکل‌پذیری این جنس را در شرایط بارگذاری الکتروهیدرولیکی (به میزان تقریبی 7%) نسبت به بارگذاری هیدرودینامیکی و (به میزان تقریبی 11%) نسبت به بارگذاری شبه استاتیکی نشان می‌دهد.

در صورت استفاده از قالب میزان بهبود شکل‌پذیری افزایش بیشتری نشان خواهد داد. یافتن دلایل افزایش شکل‌پذیری برخی مواد تحت شکل دهی‌های با سرعت بالا هنوز مورد تحقیق بسیاری از محققین است. بطور کلی در حالت بدون قالب بهبود شکل‌پذیری مواد را به اینرسی [9] و تغییر در

² Instability

³ Design of Experiments

¹ Driver sheet

- Vol. 213, No. 7, pp. 1191-1212, 2013
- [16] S. F. Golovashchenko, V. S. Mamutov, V. V. Dmitriev, A. M. Sherman, Formability of sheet metal with pulsed electromagnetic and electrohydraulic technologies, *Proceeding of Aluminum Conference*, San Diego, United States, June 18-20, 2003.
- [17] C. Maris, A. Hassannejadasl, D. E. Green, J. Cheng, S. F. Golovashchenko, A. J. Gillard, Y. Liang, Comparison of quasi-static and electrohydraulic free forming limits for DP600 and AA5182 sheets, *Materials Processing Technology*, Vol. 235, No. 1, pp. 206-219, 2016.
- [18] E. Etemadi, J. Zamani, M. Jafarzadeh, Theoretical model to investigate response of aluminum 6061 alloy under high strain rate loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 153-162, 2015. (In Persian)
- [19] S. Mirfalah-Nasiri, A. Basti, R. Hashemi, Forming limit curves analysis of aluminum alloy considering the through-thickness normal stress, anisotropic yield functions and strain rate, *Mechanical Sciences*, Vol. 117, No. 1, pp. 93-101, 2016.
- [20] M. Zohoor, S. M. Mousavi, A. A. Tafreshi, Study of electrohydraulic forming process by using experimental observations and numerical simulation with ALE method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 301-308, 2017. (in Persian)
- [21] S. F. Golovashchenko, Material formability and coil design in electromagnetic forming *Materials Engineering and Performance*, Vol. 16, No. 3, pp. 314-320, 2007.
- [22] K. Nakazima, T. Kikuma, K. Hasuka, Study on the formability of steel sheets, *Yawata Technical Report*, New York, pp. 11-28, 1968.
- [23] S. Sriram, G. Huang, B. Yan, J. Geoffroy, Comparison of forming limit curves for advanced high strength steels using different techniques, *Materials and Manufacturing*, Vol. 2, No. 1, pp. 472-481, 2009.
- [24] H. Babaei, A. Darvizeh, M. Alitavoli, T. M. Mostofi, Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 305-312, 2015. (In Persian)
- [25] H. Azodi, H. M. Naeini, M. Parsa, G. Liaghat, Analysis of rupture instability in the hydromechanical deep drawing of cylindrical cups, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, No. 7-8, pp. 734, 2008.
- [26] D. E. Green, K. C. Black, A visual technique to determine the forming limit for sheet materials, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, Detroit, pp. 1-13, 2002.
- [27] A. Rohatgi, A. Soulam, E. V. Stephens, R. W. Davies, M. T. Smith, An investigation of enhanced formability in AA5182-O Al during high-rate free-forming at room-temperature: Quantification of deformation history, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 3, pp. 722-732, 2014.
- [28] A. Kaklyugin, G. Norman, Electrical conductivity of a non-Debye plasma, *Institute of High Temperatures*, Vol. 11, No. 2, pp. 205-210, 1973.
- [29] K. A. Naugolnykh, N. Roli, Electrical discharges in water. A hydrodynamic description, *Defense Technical Information Center Document*, New York, pp. 12-20, 1974.
- [30] R. S. Korouyeh, H. M. Naeini, G. Liaghat, Forming limit diagram prediction of tailor-welded blank using experimental and numerical methods, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, No. 10, pp. 2053-2061, 2012.
- [31] X. Jin, Y. Altintas, Slip-line field model of micro-cutting process with round tool edge effect, *Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 3, pp. 339-355, 2011.
- [32] M. Zohoor, S. M. Mousavi, Evaluation and optimization of drawing depth in electrohydraulic forming (with bridge wire between electrodes), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 137-144, 2017. (in Persian)
- [33] M. Altynova, X. Hu, G. S. Daehn, Increased ductility in high velocity electromagnetic ring expansion, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 27, No. 7, pp. 1837-1844, 1996.
- [34] E. El-Magd, M. Abouridane, High speed forming of the light-weight wrought alloys, *Proceeding of the 1st International Conference on High Speed Forming*, Dortmund, Germany, March 30-31, 2004.
- [35] J. Samei, *Multi-scale Characterization of Hyperplasticity and Failure in Dual Phase Steels Subject to Electrohydraulic Forming*, PhD Thesis, University of Windsor, Canada, 2013.
- [36] J. Samei, D. E. Green, S. Golovashchenko, A. Hassannejadasl, Quantitative microstructural analysis of formability enhancement in dual phase steels subject to electrohydraulic forming, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, No. 7, pp. 2080-2088, 2013.
- آزمایش‌های انجام شده (با احتساب سه قطعه کار، آزمایش‌های اولیه جهت نیل به حالت گلوئی شدن و دوبار تکرار جهت اطمینان از تکرارپذیری نتایج) برای به‌دست آوردن نمودار حد شکل‌دهی در نرخ کرنش بالا مجموعاً 13 آزمایش مجزاست. طبق این آزمایش‌ها نمودار حد شکل‌دهی در بارگذاری الکترو هیدرولیکی نسبت به شبه استاتیکی در حدود 11% به سمت بالا منتقل می‌شود.
- شبیه‌سازی (در صورتی که منطبق با واقعیت باشد) ابزار کمک‌کننده‌ای در طراحی و انجام آزمایش‌های تجربی است. نرخ کرنش مؤثر پیش‌بینی شده (توسط شبیه‌سازی) فرایند الکترو هیدرولیکی در این تحقیق در حدود 3500 بر ثانیه است.
- مزایای این تحقیق نسبت به کارهای مشابه، تلاش در شبیه کردن هر چه بیشتر هر سه سری آزمایش‌ها، عدم استفاده از ورق واسط و وقوع گلوئی در محل مورد انتظار است.

6- مراجع

- [1] S. P. Keeler, Determination of forming limits in automotive stampings, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, New York, pp. 1-8, 1965.
- [2] G. M. Goodwin, Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, New York, pp. 767-774, 1968.
- [3] D. Clark, The tensile impact properties of some metals and alloys, *Transactions of American Society for Metals*, Vol. 42, No. 1, pp. 1-45, 1950.
- [4] W. Wood, Experimental mechanics at velocity extremes—very high strain rates, *Experimental Mechanics*, Vol. 7, No. 10, pp. 441-446, 1967.
- [5] J. Imbert, S. Winkler, M. Worswick, S. Golovashchenko, Formability and damage in electromagnetically formed AA5754 and AA6111, *Proceedings of 1st International Conference on High Speed Forming*, Dortmund, Germany, March 30-31, 2004.
- [6] J. Imbert, S. Winkler, M. Worswick, D. Oliveira, S. Golovashchenko, The effect of tool-sheet interaction on damage evolution in electromagnetic forming of aluminum alloy sheet, *Engineering Materials and Technology*, Vol. 127, No. 1, pp. 145-153, 2005.
- [7] D. Oliveira, M. Worswick, M. Finn, D. Newman, Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: free-form and cavity fill experiments and model, *Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 1, pp. 350-362, 2005.
- [8] V. Balanethiram, G. S. Daehn, Enhanced formability of interstitial free iron at high strain rates, *Scripta Metallurgica Et Materialia*, Vol. 27, No. 12, pp. 1783-1788, 1992.
- [9] V. Balanethiram, G. S. Daehn, Hyperplasticity: increased forming limits at high workpiece velocity, *Scripta Metallurgica Et Materialia*, Vol. 30, No. 4, pp. 515-520, 1994.
- [10] M. Seth, V. J. Vohnout, G. S. Daehn, Formability of steel sheet in high velocity impact, *Materials Processing Technology*, Vol. 168, No. 3, pp. 390-400, 2005.
- [11] B. Dariani, G. Liaghat, M. Gerdooei, Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates, *Engineering Manufacture*, Vol. 223, No. 6, pp. 703-712, 2009.
- [12] M. Gerdooei, B. Dariani, Strain-rate-dependent forming limit diagrams for sheet metals, *Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 12, pp. 1651-1659, 2008.
- [13] A. Rohatgi, E. V. Stephens, R. W. Davies, M. T. Smith, A. Soulam, S. Ahzi, Electro-hydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming, *Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 5, pp. 1070-1079, 2012.
- [14] A. Rohatgi, E. V. Stephens, A. Soulam, R. W. Davies, M. T. Smith, Experimental characterization of sheet metal deformation during electrohydraulic forming, *Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 11, pp. 1824-1833, 2011.
- [15] S. F. Golovashchenko, A. J. Gillard, A. V. Mamutov, Formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *Materials Processing Technology*,