

Effect of Strain Rate Investigation on Forming Limit Diagram of Al-Cu Two-Layer Sheet

ARTICLE INFO

Article Type Original Research

Authors Shabanpour M.¹ MSc, Fallahi Arezoodar A.*1 PhD

How to cite this article Shabanpour M, Fallahi Arezoodar A. Effect of Strain Rate Investigation on Forming Limit Diagram of Al-Cu Two-Layer Sheet. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(8):2159-

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Hafez Street, Tehran, Iran. Postal Code: 158754413. Phone: -Fax: afallahi@aut.ac.ir

Article History

Received: April 12, 2020 Accepted: June 09, 2020 ePublished: August 15, 2020

ABSTRACT

The use of two-layer sheets to improve mechanical properties such as ductility and strength and to improve chemical properties such as corrosion resistance has led to an increasing number of such materials in the industry. In this study, the formability of aluminum-copper two-layer sheets at a high strain rates is investigated by electromagnetic forming method. The simulation of electromagnetic forming of the two-layer sheet was performed at high strain rate using Maxwell and Abaqus software. By making coil and die and using sheets with different geometries and grids on the sheets, the forming limit diagrams (FLD) was also extracted experimentally. The simulation results showed that the electromagnetic pressure applied on the sheet in CA lay-up was 19% higher than in AC lay-up. Using the second derivative of strain criterion, the FLD of aluminum-copper two-layer sheet was derived. The FLD of aluminumcopper two-layer sheet with an initial thickness of 0.5mm is 30% higher in the AC lay-up than in CA lay-up. The reason for this improvement is that in the AC lay-up the sheet with more ductility (copper) is in the outer layer and has greater resistance to tensile stress and necking. The outer layer with better ductility can improve the ductility of the two-layer sheet. The FLD of aluminum-copper two-layer sheets has improved 120% in right-hand side and 55% in lefthand side at high strain rates compared to static conditions. There is about a 6% differences between the simulation and experimental results for forming limit diagram.

Keywords Two-Layer Sheet; Aluminum-Copper; Forming Limit Diagram; Formability; High Strain Rate

CITATION LINKS

[1] Forming limit diagram of aluminum-copper two-layer sheets: Numerical simulations and experimental verifications [2] Forming limit diagram of Al-Cu two-layer metallic sheets considering the Marciniak and Kuczynski theory [3] Theoretical and experimental formability study of two-layer metallic sheet (Al1100/St12) [4] Strain-rate-dependent forming limit diagrams for sheet metals [5] Formability of steel sheet in high velocity impact [6] Multi-objective optimization of the depth of bead and tearing in electromagnetic tube compression forming [7] Electromagnetic forming-a review [8] High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force [9] A simple model to simulate electromagnetic sheet free bulging process [10] Material formability and coil design in electromagnetic forming [11] Research on formability of 5052 aluminum alloy sheet in a quasi-static-dynamic tensile process [12] Prediction of forming limit in deep drawing of Fe/Al laminated composite sheets using ductile fracture criterion [13] Multi-layer sheet hydroforming: Experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle [14] An analysis of the formability of aluminum/copper clad metals with different thicknesses by the finite element method and experiment [15] Numerical and experimental investigations of hydromechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets [16] Investigation into the effect of material properties and arrangement of each layer on the formability of bimetallic sheets [17] Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model [18] Numerical and experimental investigation of electromagnetic inward tube forming in coupled method [19] A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: American Defense Preparedness Association [20] Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [21] Validation of numerical codes for impact and explosion cratering: Impacts on strengthless and metal targets [22] Prediction of shearinduced fracture in sheet metal forming [23] Effect of annealing on the interfacial structure of aluminum-copper joints

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۲۱۶۰ میلاد شبانپور و علیرضا فلاحی آرزودار ــ

بررسی اثر نرخ کرنش بر منحنی حد شکلدهی دولایه آلومینیوم- مس

میلاد شبانپور MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

عليرضا فلاحي آرزودار^{*} PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیدہ

استفاده از ورقهای دولایه بهمنظور بهبود خواص مکانیکی نظیر شکلپذیری، استحکام و بهبود خواص شیمیایی نظیر مقاومت در برابر خوردگی، باعث افزایش روزافزون این نوع مواد در صنعت شده است. در این پژوهش شکلپذیری ورق دولایه آلومینیوم- مس در نرخ کرنش بالا بهکمک روش شكلدهی الكترومغناطیس بررسی میشود. شبیهسازی شكلدهی الكترومغناطيس ورق دولايه در نرخ كرنش بالا بهكمك نرمافزار ماكسول و آباکوس انجام شد. با ساخت سیمپیچ و قالب و استفاده از ورق با هندسههای متفاوت و شبکهبندی ورق، نمودار حد شکلدهی در حالت تجربی نیز استخراج شد. نتایج شبیهسازی نشان داد که فشار الکترومغناطیس وارد بر ورق در چینش AC از چینش AC بزرگتر است. با استفاده از معیار مشتق دوم كرنش، نمودار حد شكلدهى ورق دولايه آلومينيوم- مس استخراج شد. سطح نمودار حد شکلدهی ورق دولایه آلومینیوم- مس با ضخامت اولیه ۵/۰میلیمتر در چینش AC نسبت به CA حدود ۳۰% بالاتر است. دلیل این بهبود این است که در چینش AC ورق با شکلپذیری بیشتر (مس) در لایه خارجی است و در مقابل تنش کششی وارده، مقاومت بیشتری در برابر گلوییشدن دارد. لایه بیرونی با شکلپذیری بهتر میتواند باعث بهبود شکلپذیری ورق دولایه شود. سطح نمودار حد شکل دهی ورق دولایه آلومینیوم- مس در نرخ کرنش بالا نسبت به حالت استاتیک در سمت راست حدود ۱۲۰ و در سمت چپ حدود ۵۰% بهبود داشته است. نتایج تجربی برای نمودار حد شکلدهی با نتایج شبیهسازی حدود ۶% اختلاف دارد.

کلیدواژهها: ورق دولایه، ورق آلومینیوم- مس، نمودار حد شکلدهی، شکلپذیری، نرخ کرنش بالا

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۰ *نویسنده مسئول: afallahi@aut.ac.ir

مقدمه

فرآیند شکلدهی ورق یکی از فرآیندهای مهم در صنایع خودروسازی و هوایی است. روشهای مختلفی مانند برشکاری، خمکاری، اتساع، کشش عمیق، چرخکاری و نورد از جمله فرآیندهای شکلدهی سنتی و مرسوم ورق است.

در سالهای اخیر استفاده از ورقهای چندلایه در صنعتهایی نظیر خودروسازی الکتریکی و حرارتی افزایش یافته است^[1]. از مزیتهای این ورقها، میتوان به مقاومت به سایش و خوردگی و رسانایی الکتریکی و حرارتی نام برد. اما مهمترین مزیت این ورقها نسبت استحکام به وزن بالا است^[2]. بهطور کلی ورقهای چندلایه به سه دسته اصلی چندلایه کامپوزیتی، چندلایه فلزی و

چندلایه فلزی کامپوزتی تقسیمبندی میشوند. در میان این ورقهای چندلایه، ورقهای چندلایه فلزی که متشکل از دو فلز متفاوت با خواص و ضخامتهای متفاوت هستند، در صنعت از اهمیت ویژهای برخوردار هستند. این ورقها را میتوان به روش انفجاری، نورد گرم و سرد و استفاده از چسب تولید کرد^[3]. ورق دولایه آلومینیوم- مس یکی از پرکاربردترین ورقهای دولایه در صنعت است. آلومینیوم نسبت به مس شکل پذیری کمتری دارد و بنابراین با ایجاد یک ورق دولایه، شکلپذیری ورق آلومینیوم افزایش مییابد. یکی دیگر از روشهای افزایش شکلپذیری، افزایش نرخ کرنش فرآیند است[4]. در روشهایی مانند شکلدهی انفجاری، شکلدهی الکترومغناطیسی و الکتروهیدرولیکی بهدلیل بالابودن نرخ کرنش نسبت به روشهای سنتی، شکلپذیری ورق افزایش مییابد^[5]. روش شکلدهی الکترومغناطیس یک روش شکلدهی سرعت بالا است. از این فرآیند برای انقباض و انبساط لوله و تغییر شکل ورق استفاده می شود^[6]. شکل ۱ اساس کار شكلدهى الكترومغناطيس ورق را نشان مىدهد.

مدار الکتریکی مجموعه متشکل از یک منبع تغذیه و بانک خازن است. با شارژ خازن و تخلیه یکباره آن، جریان شدید در سیمپیچ بهوجود مىآيد. بنابر قانون لنز نيز، يک جريان القايى در ورق بهوجود میآید که با عامل بهوجودآورنده خود مخالفت میکند و در نتیجه ورق از سیمپیچ دور میشود. نیروی وارد بر ورق که در اثر این دفع متقابل به آن وارد میشود بهعنوان نیروی لورنتس شناخته میشود^[7]. *تاکوتسا* و همکاران، معادلات حاکم بر شکلدهی الکترومغناطیس ورق را استخراج کردند و یک حل عددی برای آن ارایه دادند^[8]. *کوریا* و همکاران، دو قسمت الکترومغناطیس و سازهای این فرآیند را مستقل از هم فرض کردند و با حل عددی معادلات ماکسول برای هندسه ورق تخت، فشار الکترومغناطیس را استخراج نمودند^[9]. *گالواشچنکو* با استفاده از یک کویل مارپیچ مسطح حالت کرنش کششی دومحوری برای شکلدهی یک ورق مربعیشکل را بهکمک شکلدهی الكترومغناطيس ايجاد كرد. او با استفاده از نمونههايى با عرضهای مختلف حالت کشش تکمحوری و کرنش صفحهای را ایجاد نمود^[10]. /ی و همکاران نیز حالت کرنش کششی دومحوری را همانند روش گالواشچنکو ایجاد کردند اما برای ایجاد حالت کشش تکمحوری و کرنش صفحهای از سیمپیچ دولایه و ورقهای با عرض مختلف استفاده نمودند^[11]. *تاکودا* و همکاران اولین مطالعات در زمینه شکلدهی ورقهای دولایه را انجام دادند. آنها به بررسی حد شکلدهی ورق دولایه فولاد- آلومینیوم در فرآیند کشش عمیق پرداختند. نتایج نشان داد که شکلپذیری ورق دولایه نسبت به ورق تکلایه آلومینیوم افزایش داشته است^[12]. لانگ و همکاران از روش هیدروفرمینگ و همچنین ورق سهلایه برای بررسی شکلپذیری استفاده نمودند. آنها بیان کردند که با افزایش اصطکاک میان لایهها، شکلیذیری افزایش مییابد^[13]. تیسنگ و همکاران کرنش حدی ورق دولایه آلومینیوم- مس را در فرآیند

كشش عميق بهدست آوردند. نتايج آنها نشان داد كه تنش پسماند بین لایهها تأثیر منفی روی شکلیذیری ورق دارد^[14]. *گردویی* و *مولایی داریانی* به بررسی تأثیر نرخ کرنش بر روی دیاگرام حد شکلدهی ورق پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در نرخ کرنش بالا (از ۱۰۰ به بالا) رشد گلویی به تاخیر افتاده و این بهدلیل اثر اینرسی جرم است. آنها همچنین بیان کردند که در نرخ کرنش بالا نمودار حد شکل دهی نسبت به حالت استاتیک بالاتر است[4]. جلالی آقاچایی و همکاران به صورت تئوری نمودار حد شکل دهی ورق دولایه آلومینیوم و فولاد متصل شده با چسب را بهدست آوردند. آنها با استفاده از روش لایه مجزا و لایه معادل در روش حل مارسینیاک- کوزینسکی، نمودار حد شکلدهی ورق دولایه را استخراج كردند. نتايج نشان داد كه روش لايه مجزا تطابق بهترى با نتایج تجربی دارد^[3]. *باقرزاده* و همکاران به بررسی شکلدهی ورق دولایه آلومینیوم- فولاد در کشش عمیق هیدرومکانیکی پرداختند. آنها بیان کردند که شکلپذیری ورق دولایه زمانی که ورق با استحکام و شکلپذیری بالاتر در سمت قالب باشد افزایش مییابد^[15]. هاشمی و کرجیبانی با استفاده از روش مارسینیاک-کوزینسکی منحنی حد شکلدهی ورق دولایه آلومینیوم- مس را بهدست آوردند. آنها به کمک حل همزمان چهار معادله در روش مارسینیاک- کوزینسکی توانستند منحی حد شکلدهی ورق دولایه را استخراج كنند. نتايج بهدست آمده بهوسيله اين روش تطابق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشت^[2]. *کرجیبانی* و همکاران نیز نمودار حد شکلدهی ورق دولایه آلومینیوم- مس را در سه حالت عددی، شبیهسازی و تجربی بهدست آوردند. آنها برای پیشبینی گلوییشدن از دو معیار مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل و كرنش اصلى استفاده كردند. نتايج بهدست آمده از اين روش تطابق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشت اما روش آنها زمانبر بود و صحت کافی نیز نداشت^[1]. *دارابی* و همکاران به بررسی خواص مواد و نحوه چینش لایهها در ورق دولایه فولاد- آلومینیوم پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش ضخامت لایه آلومینیوم باعث کاهش حد شکلدهی ورق دولایه می شود. همچنین با افزایش نسبت ضخامت فولاد به ضخامت آلومینیوم در ضخامت کل ثابت، شکلپذیری بهبود مییابد^[16]. *زاهدی* و همکاران نیز به بررسی گلویی و کرنش شسکت ورق دولایه آلومینیوم- مس با استفاده از معیار آسیب پلاستیک پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که تجمع کرنش در لایه بیرونی باعث تجمع خسارت در لایه بیرونی و منشاگرفتن شکست در این لایه میشود. آنها بیان کردند که حد شکلدهی ورق دولایه آلومینیوم- مس در شکلدهی تدریجی در حالتی که مس لایه بیرونی باشد بهبود مىيابد^[17].

همان طور که با مرور پژوهشهای قبلی مشخص شد، شکلپذیری ورق دولایه در نرخ کرنش بالا بررسی نشده است. ضروری است اثر نرخ کرنش بر شکلپذیری ورق دولایه بهمنظور بهبود شکلپذیری یک ورق با شکلپذیری پایین تر مورد بررسی قرار گیرد. در این

ـ بررسی اثر نرخ کرنش بر منحنی حد شکلدهی دولایه آلومینیوم- مس ۲۱۶۱

پژوهش به بررسی شکلپذیری ورق دولایه آلومینیوم- مس در نرخ کرنش بالا به کمک شکلدهی الکترومغناطیس پرداخته میشود. ابتدا فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس ورق در نرمافزار المان محدود شبیهسازی میشود. سپس برای ایجاد حالتهای مختلف کرنش، از ورق با عرض و هندسههای متفاوت در فرآیند شکلدهی استفاده میشود. از روش مشتق دوم کرنش برای پیشبینی گلویی استفاده میشود تا زمان دقیق گلوییشدن در شبیهسازی مشخص شود. به کمک نتایج شبیهسازی و پیشبینی گلویی، نمودار حد شکلدهی ورق رسم میشود. برای صحهگذاری نتایج نیز از آزمون تجربی و شبکهبندی ورقها استفاده خواهد شد و نتایج شبیهسازی با نتایج تجربی و همچنین نتایج شکلپذیری این ورق در حالت استایک مقایسه خواهد شد.



شکل ۱) نمایی از شکلدهی الکترومغناطیس ورق

شبيەسازى

فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس متشکل از دو قسمت مغناطیسی و سازه است. از اینرو، برای شبیهسازی فرآیند، باید دو قسمت گفتهشده مورد تحلیل قرار گیرد. بهطور کلی دو حالت شبیهسازی غیرکوپل و شبیهسازی کوپل برای این فرآیند وجود دارد. در شبیهسازی غیرکوپل دو قسمت مغناطیس و سازه جدای از هم حل میشوند. در شبیهسازی کوپل ضعیف ابتدا قسمت مغناطیسی فرآیند حل شده و در نهایت فشار الکترومغناطیس وارد بر لوله بهعنوان یک ورودی در شبیهسازی قسمت سازه استفاده میشود^[18]. ابتدا حل قسمت مغناطیسی فرآیند با نرمافزار ماکسول انجام می شود. بدین صورت که با مدل کردن ورق، قالب و سیمپیچ، حل قسمت مغناطیسی فرآیند انجام شده و فشار الکترومغناطیس وارد بر ورق در زمان بیشینه شدت جریان از نرمافزار استخراج میشود. روند چگونگی شبیهسازی با نرمافزار ماکسول در پژوهشهای قبلی آمده است^[18]. مطابق شکل ۲، صفحه بالایی روی سیمپیچ و ورق روی آن و سپس قالب روی ورق قرار دارد. برای عدم کشیدهشدن ورق در حفره قالب، ترمز مکانیکی روی قالب و صفحه بالایی تعبیه شده است. برای بررسی تأثير چينش لايهها بر فشار الكترومغناطيس، يكبار از چينش آلومینیوم- مس (AC) و بار دیگر از چینش مس- آلومینیوم (CA) استفاده شد. لایه اول نزدیک به سیمپیچ و لایه دوم در تماس با

۲۱۶۲ میلاد شبانپور و علیرضا فلاحی آرزودار ــ

قالب است. مشخصات سیمپیچ استفادهشده در شبیهسازی در جدول ۱ و مشخصات مغناطیسی و الکتریکی مورد استفاده برای ورق، قالب و سیمپیچ در جدول ۲ آمده است^[3].



شکل ۲) شماتیک ساختار فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس

جدول ۱) پارامترهای سیمپیچ استفاده شده در شبیه سازی

مقدار	پارامتر
٢	تعداد لايهها
٩	تعداد دور
۵/۵	گام
۳۰×۳میلیمتر	سطح مقطع

جدول ۲) مشخصات الکتریکی و مغناطیسی سیمپیچ و ورق^[6]

رسانایی الکتریکی (S/m)	تراوایی مغناطیسی (H/m)	مادہ
٣/۵∘e۲	1/402220e-2	آلومينيوم
۵/۹۶e۷	1/2088296-8	مس

پس از پایان شبیهسازی قسمت مغناطیسی، فشار الكترومغناطيس وارد بر ورق از نرمافزار استخراج شد. اين فشار بهعنوان یک فشار ورودی در نرمافزار تحلیل مکانیکی آباکوس استفاده شد. برای حل قسمت مکانیکی، ورق بهصورت شکلپذیر و پوسته مدل شده است. ضخامت اولیه لایه آلومینیوم و مس بهترتیب ۲۷/۰۰ و ۲۳/۰میلیمتر در نظر گرفته شد و بهصورت کامپوزیت در نرمافزار آباکوس مدل شد. تعداد پنج نقطه انتگرالگیری در ضخامت هر لایه تعریف شد. مدلسازی ورق دولایه بهصورت کامپوزیت دو مزیت دارد؛ یکی زمان حل را کاهش میدهد و دیگر اینکه امکان تعریف خواص مواد بهصورت جداگانه و تعریف آن با هر ضخامتی بدون تغییر در هندسه ورق وجود دارد. قالب و صفحه بالایی به صورت صلب مدل سازی شدند. یکی از مهمترین بخشها در نرمافزار آباکوس تعریف خواص مواد است. چون فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس یک فرآیند نرخ کرنش بالا است به همین دلیل از معادله ویسکوپلاستیک جانسون- کوک مطابق معادله ۱ برای تعریف خواص مواد استفاده شد^[19].

 $\sigma = [A + B\bar{\varepsilon}^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\hat{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m \right]$ (1) $\Delta s \text{ cr} \quad \overline{\sigma} \text{ trim } \pi \text{ crubi } alcondown \\ A e d n e d$

جدول ۳) پارامترهای ثابت معادله ویسکوپلاستیک جانسون- کوک^[21,22]

مادہ		1	
مس ۱۱۰۰	آلومينيوم ١٠٥٠	معدار	
٩٥	kd	A (مگاپاسکال)	
K dK	۱۵Y	(مگاپاسکال) B	
۰/۳۱	∘/۱۶Y	n	
∘/۰۲۵	۰/۰۱۶	С	
١/٥٩	1/Y	m	

ضریب اصطکاک استفاده شده برای مس- فولاد ۱۸/۰ و برای آلومنیوم-فولاد ۲۱/۰ در نظر گرفته شد. روش استخراج ضریب اصطکاک بدین صورت است که ابتدا ضریب اصطکاک برای مس-فولاد و آلومینیوم- فولاد بهترتیب از مطالعه *کرجیبانی* و همکاران^[1] استخراج و سپس شبیه سازی انجام شد و توسط سعی و خطا و در نظرگرفتن ارتفاع گنبدی به عنوان تابع هدف، ضرایب اصطکاک کالیبره شد. این روش توسط *لی* و همکاران^[22] پیشنهاد شده است.

طبق تحقیقات قبلی مشخص شده است که حداقل اندازه المان باید بزرگتر از ضخامت ورق باشد. با توجه به اینکه بیشینه ضخامت هر ورق ۲۷/۰میلیمتر است، اندازه المان ۳/۰میلیمتر درنظر گرفته شد^[2]. نمودار ۱ نتیجه آنالیز حساسیت مش را نشان میدهد. نمودار نشان میدهد که مناسبترین اندازه المان برای رسیدن به نتیجه دقیقتر وصرف زمان کمتر حدود ۳/۰میلیمتر است.

برای بهدست آوردن نمودار حد شکل دهی باید موضع گلویی شدن مشخص شود. این مکان یک مکان ناپایدار همراه با کاهش ضخامت در ورق است. بعد از ایجاد ناپایداری، همه کرنش های پلاستیک در این منطقه متمرکز می شود. کرنش های اصلی در یک مقطع عمود بر ناحیه گلویی در شکل ۳ آورده شده است. منطقه گلویی با حرف A و نقاط B، C و D نقاط خارج از این موضع هستند. برای به دست آوردن زمان مربوط به گلویی شدن از مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل استفاده می شود. مشتق دوم کرنش پلاستیک در یک زمان خاص به بیشینه مقدار خود می رسد و پس از آن به یک باره مطابق نمودار ۱ کاهش می یابد. زمان مربوط به این اتفاق دقیقاً زمان گلویی شدن فرآیند را مشخص می کند.



شکل ۳) شماتیک معیار گلوییشدن برحسب زمان



نمودار ۱) منحنی اعتبارسنجی اندازه مش

آزمون تجربى

برای ساخت سیمپیچ از تسمه مسی دقیقاً مطابق با سطح مقطع سیمپیچ جدول ۱ استفاده شد. این تسمه بهصورت دو سیمپیچ به تعداد ۹ دور پیچیده شد و سپس بهصورت دولایه روی هم قرار گرفت و از مرکز به همدیگر متصل شد. سپس درون یک بستر از جنس پلیاتیلن برای عایق,ودن قرار گرفت. برای نگهداشتن صفحه بالایی روی سیمپیچ مطابق شکل ۴ از چهار میل راهنما استفاده شد تا صفحه بالایی بتواند دقیقاً روی سیمپیچ قرار گیرد. در مرکز مفتاطیسی تعبیه شد. ورق روی صفحه بالایی قرار گرفت و قالب نیز به وسیله چهار پیچ به صفحه بالایی بسته شد. از ترمز مکانیکی نیز برای جلوگیری از کشیده شدن ورق به درون قالب استفاده شده است.

مجموعه دستگاه شکلدهی مغناطیسی در شکل ۵ آورده شده است. این مجموعه متشکل از قالب و سیمپیچ، بانک خازن، سوئیچ، منبع تغذیه و قسمت کنترل است.

برای تولید ورق دولایه آلومینیوم- مس از روش اتصال انفجاری استفاده شد. ضخامت ابتدایی ورق تولیدی یک میلیمتر بود اما بهدلیل محدودیت تولید فشار مغناطیسی توسط دستگاه شکلدهی الکترومغناطیس موجود برای تغییر شکل در ورق با ضخامت یک میلیمتر، ضخامت کل ورق طی نورد سرد به ۵/میلیمتر رسید.

Volume 20, Issue 8, August 2020

ـــ بررسی اثر نرخ کرنش بر منحنی حد شکلدهی دولایه آلومینیوم- مس ۲۱۶۳

بعد از انجام فرآیند نورد بهدلیل وجود کار سختی در ورق، انعطاف پذیری ورق دولایه کاهش یافت و ورق خاصیت فنری پیدا کرد. برای بازگشت خواص ورق دولایه به خواص ورق ابتدایی قبل از نورد، فرآیند آنیل ورق دولایه در دمای ۰۰۳درجه و زمان ۳۰دقیقه طبق مطالعه چن و ه*وانگ*^[23] انجام شد. برای تشخیص میزان دقیق ضخامت لایههای آلومینیوم و مس، مقطع ورق در زیر میکروسکوپ نوری قرار گرفت و بهوسیله دوربین عکاسی، عکس مقطع ورق ثبت شد. سپس بهوسیله نرمافزار دیجی مایزر ضخامت آلومینیوم و مس بهترتیب ۲۷/۰ و ۲۳/۰میلیمتر طبق شکل ۶ بهدست آمد.

برای ایجاد حالتهای مختلف کرنش از ورقهایی با عرض و هندسه متفاوت بر پایه روش ناکازیما (Nakajima) مطابق شکل ۷ طبق تحقیق *هاشمی* و *کرجیبانی*^[2] استفاده شد. سپس دوایر به قطر ۳میلیمتر بر روی ورقها توسط رنگ فلز چاپ شد. فرآیند چاپ نسبت به فرآیند حک الکتروشیمیایی باعث میشود که هیچ آسیبی به سطح وارد نشود. برای بررسی میزان شکلپذیری در چینشهای مختلف ورق دولایه، یکبار از چینش AC (آلومینیوم نزدیک به سیمپیچ و مس نزدیک به قالب) و بار دیگر از چینش CA (مس نزدیک به سیمپیچ و آلومینیوم نزدیک به قالب) استفاده شد. بعد از انجام فرآیند شکلدهی برای بهدستآوردن کرنشهای اصلی و فرعی، قطر دوایر تبدیلشده به بیضی توسط میکروسکوپ دینولایت و نرمافزار مربوط به آن اندازهگیری شد.



شکل ۴) سمپیچ، قالب و ساختار شکلدهی الکترومغناطیس ورق



شکل ۵) دستگاه شکلدهی الکترومغناطیس استفادهشده در آزمون تجربی؛ ۱-قالب و سیمپیچ، ۲- بانک خازن، ۳- سوئیچ، ۴- منبع تغذیه، ۵- قسمت کنترل

Modares Mechanical Engineering

۲۱۶۴ میلاد شبانپور و علیرضا فلاحی آرزودار ـ



شکل ۶) تعیین ضخامت لایههای آلومینیوم و مس با بزرگنمایی ۵۰ در زیر میکروسکوپ



شکل ۲) هندسههای متفاوت قطعات برای ایجاد حالات مختلف کرنش طبق روش ناکازیما

نتايج و بحث

ميدان الكترومغناطيس واردشده به ورق دولايه آلومينيوم- مس در ولتاژ ۵۵۰۰ولت برای دو چینش AC و CA، در نمودار ۲ نشان داده شده است. منحنی میدان مغناطیسی ارایهشده در پژوهش *کوریا* و همکاران^[9] نیز در این نمودار ترسیم شده است. بهدلیل تلاقی دو میدان مغناطیس در سمت چپ و راست ورق، فشار الكترومغناطيس دقيقاً در مركز ورق كاهش يافته و با دورشدن به سمت خارج ورق افزایش و سپس به صفر میرسد. *کوریا* و همكاران نيز با استفاده از حل معادلات ماكسول منحنى ارايهشده در نمودار ۲ را ارایه نمودند^[9]. منحنی آنها نیز در وسط قطعهکار دارای یک کمینه بود. تفاوت در اندازه میدانها ناشی از اختلاف در سیمپیچ، تعداد دور و تعداد لایهها است. در نهایت باید متذکر شد که شکلدهی مرکز ورق بهواسطه اینرسی وارد از طرف نقاط نزدیک به مرکز ورق است و در نتیجه مرکز ورق در سمت فشار مغناطیسی وارده حرکت میکند و شکل گنبدی بهوجود میآید. نمودار ۳، فشار الکترومغناطیس واردشده به ورق در ولتاژ ۵۵۰۰ولت در دو چینش AC و CA را نشان میدهد. فشار الکترومغناطیس در چینش CA نسبت به چینش AC حدود ۱۹% بیشتر است. این اختلاف ناشی از کمتربودن مقاومت الکتریکی مس نسبت به

آلومینیوم و در نتیجه گردش راحتتر جریان القایی در لایه مس است. بنابراین زمانی که مس به سیمپیچ نزدیک است فشار الکترومغناطیس بیشتر به ورق دولایه وارد میشود.



نمودار ۲) میدان مغناطیسی وارد بر ورق در چینش AC و CA و میدان ارایهشده در پژوهش *کوریا* و همکاران^[9]



نمودار ۳) توزیع فشار مغناطیسی بر نیمی از ورق در دو چینش AC و CA

تفاوت فشار مغناطیسی در دو چینش AC و CA باعث میشود که ارتفاع گنبدی در تغییر شکل ورق متفاوت از هم باشد. برای مقایسه بهتر میزان شکلپذیری ورق دولایه با توجه به تفاوت فشار الکترومغناطیس وارد بر ورق برحسب نوع چینش، از یک ورق محرک در زیر ورق اصلی و روی سیمپیچ استفاده شد. ورق محرک روی سیمپیچ و در زیر ورق اصلی قرار میگیرد و فشار الکترومغناطیس بر ورق محرک وارد میشود و برخورد آن به ورق اصلی باعث ایجاد شکلدهی روی ورق اصلی میشود. با استفاده از ورق محرک اثر چینش متفاوت لایهها بر فشار مغناطیسی حذف نرمافزار آباکوس از دو ورق محرک طبق شکل ۸ استفاده شد. فشار واردشده به ورق دولایه در هنگام استفاده از دو ضخامت مختلف

برای ورق محرک، بررسی شد تا ضخامت مطلوبتر برای ورق محرک مشخص شود.



شکل ۸) ورق محرک استفاده شده روی سیم پیچ و زیر ورق اصلی

تفاوت در فشار الکترومغناطیس واردشده به ورق در دو حالت استفاده از ورق ۵/۰ و یک میلیمتر مسی بهعنوان ورق محرک، در نمودار ۴ نشان داده شده است. در این حالت ورق دولایه اصلی دارای ضخامت ثابت ۵/۰میلیمتر و چینش یکسان است. در حالتی که از ورق محرک با ضخامت یک میلیمتر استفاده شود، فشار الکترومغناطیس وارد به ورق محرک حدود ۹% افزایش میابد اما چون جرم ورق محرک دو برابر شده، سرعت برخورد ورق محرک با ضخامت یک میلیمتر به مراتب کمتر از ورق با ضخامت (۵/۰میلیمتر است. به همین دلیل برای ادامه شبیهسازیها و آزمون تجربی از ورق محرک با ضخامت ۵/۰ و قطر ۱۴۵میلیمتر بهعنوان ضخامت مطلوبتر استفاده شد.



نمودار ۴) فشار مغناطیسی وارد به ورق محرک با ضخامت ۵/۵ و یک میلیمتر

برای بررسی زمان فرآیند گلوییشدن و استخراج کرنشهای اصلی و فرعی همان طور که گفته شد از مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل استفاده شد. نمودار ۵، مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل را برای یک نمونه ورق با هندسه W200 نشان میدهد. معیار مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل که بهعنوان معیار پیشربینی گلوییشدن مشخص شد بهخوبی توانسته است زمان گلوییشدن را

Volume 20, Issue 8, August 2020

برسی اثر نرخ کرنش بر منحنی حد شکلدهی دولایه آلومینیوم- مس ۲۲۶۵ پیش بینی نماید. زمان دقیق گلویی شدن برای ورق با هندسه W200 حدود ۸۰میکروثانیه است. المانی که بیشینه مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل در آن اتفاق افتاده به عنوان المان ناپایدار شناخته می شود.

نمودار ۶، کرنشهای اصلی و فرعی را برای ورق دولایه با هندسه W200 با چینش AC نشان میدهد. قبل از زمان گلوییشدن مسیر کرنش، خطی است و این نشان میدهد که نمودار حد شکلدهی استخراجشده در روش مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل قابل قبول است. باید توجه کرد که نمودارهای حد شکلدهی مبتنی بر کرنش باید در تحت شرایط بارگذاری خطی استخراج شوند.



نمودار ۵) مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل برای ورق W200



جدول ۴ نتایج بیشینه ارتفاع گنبدی ورق دولایه آلومینیوم- مس در شکلدهی الکترومغناطیس در دو چینش متفاوت در حالت شبیهسازی و آزمون تجربی را در ولتاژ تخلیه ۵۵۰۵ولت و استفاده از ورق محرک برای ورق با هندسههای متفاوت نشان میدهد. همان طور که از جدول ۴ مشخص است، میزان ارتفاع گبندی در دو چینش در یک ولتاژ تخلیه یکسان تفاوتی حدود یک درصد دارد و این امر تنها به ضریب اصطکاک ورق درگیر با قالب ربط دارد. نتایج ارتفاع گنبدی نشان میدهد که با افزایش عرض ورق دولایه (عرض مرکز ورق) تا حدود ۱۵میلیمتر در یک ولتاژ تخلیه یکسان، میزان ارتفاع گنبدی افزایش مییابد. دلیل این امر این است که در

۲۱۶۶ میلاد شبانپور و علیرضا فلاحی آرزودار ــ

ورق با عرض کمتر از ۱۵۰میلیمتر بهدلیل کوچکتربودن عرض ورق از قطر ورق محرک، با افزایش عرض ورق دولایه مقدار نیرویی که ورق محرک به ورق اصلی وارد میکند، افزایش مییابد. اما بعد از عرض ۱۵۰میلیمتر تفاوتی در سطح برخورد ورق محرک با ورق دولایه وجود ندارد زیرا کل ورق محرک به ورق اصلی برخورد دارد. میزان اختلاف نتایج تجربی و شبیهسازی برای ارتفاع گنبدی حدود ۶% است که نشان میدهد روش و نتایج شبیهسازی قابل تایید است. این اختلاف ناشی از بهکاربردن ثابتهای جانسون- کوک ارایهشده در تحقیقات پیشین است.

جدول ۴) ارتفاع گنبدی ورق دولایه آلومینیوم- مس در دو چینش AC و CA در شبیهسازی و آزمون تجربی

	ارتفاع گنبدی					
بيسترين دصد	آزمون	شبيەسازى	آزمون	شبيەسازى	هندسه ورق	
اختلاف	تجربى	در چینش	تجربى	در چینش		
	چینش CA	СА	چینش AC	AC		
۵/۲	₩ ¢ /¢	٣۶/٢	٣۴/١	۳۵/۸	W25	
۵/۳	۳γ/٨	۳٩/٨	۳۲/۵	$\mu d \setminus k$	W50	
۵/۵	۳۸/۲	۴۰/۳	٣٧/٩	٣٩/٩	W75	
۵/۵	۴١/٣	۴٣/۶	m1/k	٣٩/۵	W100	
۶/۱	۳γ/۸	4∘/۱	۳۲/۵	$\mu d \setminus k$	W125	
۶/۱	۳γ/۸	۴./۱	٣٧/۴	٣٩/۵	W150	
۶/۳	٣٧/٧	۴./۱	۳۲/۵	٣٩/۵	W175	
۵/۲	۳۸/۱	۴./۱	۳۷/۶	٣٩/۵	W200	
۵/۸	٣٧/٩	4∘/۱	۳۷/۵	٣٩/۵	W250	

کرنش پلاستیک معادل برای ورق با هندسه W200 برای دو حالت چینش متفاوت و برای هر کدام از لایهها، در نمودار ۲ نشان داده شده است. کرنش پلاستیک معادل در لایه بیرونی بیشنه است. دلیل این امر این است که لایه بیرونی تحت تنش کششی و لایه داخل تحت تنش فشاری است. پس لایه بیرونی میتواند بهعنوان کنترلکننده میزان شکلپذیری ورق دولایه باشد. هر چه لایه بیرونی شکلپذیری بیشتری داشته باشد در نتیجه شکلپذیری ورق دولایه بیشتر خواهد شد. چون مس دارای شکلپذیری بهتری نسبت به آلومینیوم است در نتیجه چینش AC شکلپذیری بهتری نسبت به چینش CA خواهد داشت. نوسانهای موجود در نمودار ناشی از نوسانهای فشار مغناطیسی وارد بر ورق است.

کرنش لگاریتمی اصلی برای ورق با ضخامت اولیه ۵/میلیمتر و دو هندسه متفاوت و برای چینش AC و لایه آلومینیوم بههمراه قطعهکار بعد از شکلدهی، در شکل ۹ نشان داده شده است. همان طور که شکل ۹ نشان میدهد محل گلوییشدن نیز نزدیک به مرکز ورق است و ترک از المانی که گلویی از آن اتفاق افتاده منشا یافته و سپس در امتداد عرض ورق رشد میکند. محل ایجاد بیشینه کرنش در مرکز ورق و همچنین در یک نوار دایرهای نزدیک به مرکز ورق است. مطابق شکل ۹ این نوار یک منطقه با کرنش زیاد است که محل واردشدن بیشینه فشار مغناطیسی وارد بر ورق

است. این منطقه با محل اعمال فشار مغناطیسی بیشینه نمودار ۲ از نظر هندسی تطبیق دارد. محل گلوییشدن برخلاف فرآیند بالج با تغییر هندسه ورق جابهجا نمیشود چون که توزیع فشار الکترومغناطیس ورق به هندسه سیمپیچ و ورق محرک بستگی دارد اما در فرآیند بالج به نحوه تماس سنبه و ورق و محل جداشدن سنبه از روی ورق بستگی دارد^[17].



نمودار ۷) کرنش پلاستیک معادل برای هر لایه در دو چینش متفاوت برای ورق با هندسه W200



شکل ۹) کرنش لگاریتمی اصلی ورق دولایه آلومینیوم- مس برای دو هندسه متفاوت برای لایه آلومینیوم بههمراه قطعهکار بعد از شکلدهی

نتایج تجربی محل گلوییشدن در سه ورق W150، W125 و W175، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. محلهای گلوییشدن با دایره بر روی ورق مشخص شدهاند.

یکی از مشکلات شکلدهی الکترومغناطیس رسیدن دقیق به حالت گلویی و قطع نیرو است که عملاً این امکان وجود ندارد چون زمان شکلدهی بسیار محدود است و امکان قطع نیرو حین فرآیند وجود ندارد. بنابراین فقط با شبیهسازی پیشبینی میشود که ورق در چه ولتاژی به حالت گلویی و نزدیک به پارگی میرسد و آزمون تجربی انجام میشود. اما اختلاف بین ثابتهای جانسون-کوک استخراجشده، برای ورق بهکاررفته و همچنین بازده سیمپیچ و مدار استفاده در آزمون تجربی باعث اختلاف در پیشبینی دقیق خاص و هندسه خاص در شبیهسازی، گلوییشدن اتفاق میافتد اما ورق پاره نمیشود. اما در آزمون تجربی با همین ولتاژ و همین هندسه ممکن است گلویی اتفاق نیفتد یا حتی ورق پاره شود. مشخص است که همزمان در ورق می توان به حالت شکست در یک نقطه و حالت گلویی و ایجاد ترک اولیه در نقطه دیگر رسید.



شکل ۱۰) محلهای ایجاد گلویی در سه هندسه متفاوت ورق W125، W150 و W175 و دو چینش متفاوت

توزیع ضخامت ورق از مرکز ورق به سمت بیرون ورق برای ورق دولایه آلومینیوم- مس با هندسه W200 و ضخامت اولیه ۵/۰میلیمتر برای دو چینش متفاوت، در نمودار ۸ نشان داده شده است. نمودار ۸ نشان میدهد که نازکشدگی دقیقاً در مرکز اتفاق نمیافتد و در یک نقطه نزدیک به مرکز ورق اتفاق افتاده است. این نقطه دقیقاً محل اعمال فشار بیشینه الکترومغناطیس است. گلوییشدن نیز در محل نازکشدگی اتفاق میافتد. تفاوت ضخامت در آزمون تجربی و شبیهسازی حدود ۷% است.

نتایج مربوط به نمودار حد شکلدهی ورق دولایه در حالت استاتیک و در حالت نرخ کرنش بالا برای ورق با ضخامت اولیه ۵/۰میلیمتر برای دو چینش AC و CA در نمودار ۹ آمده است. برای حالت استاتیک از پژوهش *زاهدی* و همکاران^[17] استفاده شده که نمودار حد شکلدهی برای ورق دولایه آلومینیوم- مس با ضخامت اولیه یک میلیمتر گزارش شده است.



نمودار ۸) توزیع ضخامت ورق دولایه آلومینیوم- مس با هندسه W200 برای چینش AC و CA بعد از شکلدهی در شبیهسازی و آزمون تجربی



نمودار ۹) منحنی حد شکلدهی در حالت نرخ کرنش بالا و استاتیک برای ورق دولایه آلومینیوم- مس در دو چینش متفاوت

سطح نمودار حد شکلپذیری در چینش AC حدود ۳۰% از چینش CA بالاتر است، که این نتیجه در نمودار ۹ نشان داده شده است. این درصد با میانگینگیری از نقاط سمت راست و چپ و وسط منحنی حد شکلدهی استخراج شده است. دلیل این بهبود این است که در شکلدهی ورق دولایه، لایه بیرون تحت تنش کششی و لایه درونی تحت تنش فشاری است. چون استحکام و شکلپذیری مس از آلومینیوم بیشتر است وقتی که مس لایه بیرونی باشد توانایی تحمل بیشتری نسبت به آلومینیوم برای حالت گلوییشدن دارد و گلوییشدن به تعویق میافتد. لایه مس روی لایه آلومینیوم باعث مقاومت بیشتر در برابر گلوییشدن میشود. از نمودار ۹ مشخص است که حد شکلدهی ورق دولایه آلومینیوم- مس در حالت نرخ کرنش بالا روندی شبیه به پژوهش شکلدهی در نرخ کرنش بالا نسبت به حالت استاتیکی بهبود یافته

۲۱۶۸ میلاد شبانپور و علیرضا فلاحی آرزودار ــــ

و نمودار آن در این حالت بالای حد شکلدهی استاتیک قرار گرفته است. در حالت نرخ کرنش بالا، سمت راست نمودار حد شکلدهی حدود ۱۲۰% بهبود و سمت چپ حدود ۵۰% بهبود نسبت به پژوهش *زاهدی* و همکاران^[17] داشته است. این امر بهدلیل وجود نیروی اینرسی بر روی ورق در فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس است. نیروی اینرسی باعث به تاخیرافتادن زمان گلویی در ورق و در نتیجه باعث پایداری بیشتر در برابر رشد ترک خواهد شد^[4]. لازم به ذکر است اندازه ضخامت ورق بهکاررفته در پژوهش *زاهدی* و همکاران^[17] دو برابر رست.

تفاوت کرنشهای گلوییشدن در دو حالت شبیهسازی و آزمون تجربی برای حالت کرنش صفحهای، در جدول ۵ آمده است. نتایج جدول ۵ همراه با نتایج نمودار ۹ نشان میدهد که بهبود سطح نمودار (حدود ۱۶۰%) حد شکل دهی در نرخ کرنش بالا نسبت به حالت استاتیک در حالت کرنش صفحهای قابل توجه است. میزان بهبود حد شکلپذیری در حالت نرخ کرنش بالا برای ورق دولایه آلومینیوم- مس در حالت کرنش صفحهای نسبت به حالت کشش تکمحوری و دومحوری بیشتر قابل توجه است. نتایج مربوط به شبیهسازی با آزمون تجربی برای شرایط نرخ کرنش بالا حدود ۶% اختلاف دارد. این اختلاف ناشی عدم کنترل در رسیدن به حال گلویی در آزمون تجربی شکلدهی الکترومغناطیس است. زیرا تنها پارامتر قابل کنترل در شکلدهی الکترومغناطیس ولتاژ تخلیه است و نمیتوان در حین فرآیند قبل از رسیدن به حالت گلویی شبیه به فرآیند بالج، حرکت را قطع و نیرو را کنترل کرد. اندکی تغییر در ولتاژ تخلیه میتواند حال گلویی را به پارگی تبدیل کند یا اصلاً ورق به حالت گلویی نرسد.

جدول ۵) مقایسه کرنشهای اصلی ورق دولایه آلومینیوم- مس در نرخ کرنش بالا و شرایط استاتیک درحالت کرنش صفحهای برای دو چینش AC و CA

نوع چينش		بارامت	
CA	AC	y	
∘/۲۹	°\kk	کرنش اصلی تجربی	شرايط نرخ كرنش
۰/۳۱	°/48	کرنش اصلی شبیهسازی	بالا
۰/۱۱	۰/۱۷	کرنش اصلی تجربی	شرايط استاتيک
۰/۱۲	۰/۱۸	کرنش اصلی شبیهسازی	
184	۱۵۸	درصد اختلاف نتایج نرخ کرنش بالا با استاتیک	

نتيجهگيرى

شبیهسازی فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس ورق دولایه آلومینیوم- مس در نرخ کرنش بالا بهکمک روش المان محدود انجام شد. با معیار مشتق دوم کرنش، گلوییشدن ورق دولایه پیشبینی شد. با استفاده از هندسههای متفاوت حالات مختلف کرنش در آزمون تجربی نیز حاصل شد و نتاج زیر بهدست آمد:

۱- در فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس ورق دولایه آلومینیوم-مس بدون استفاده از ورق محرک، فشار الکترومغناطیس وارد بر ورق در چینش CA نسبت به چینش AC حدود ۱۹% بیشتر است.

این امر بهدلیل اختلاف در رسانایی الکتریکی مس و آلومینیوم و در نتیجه تفاوت در میدان و فشار مغناطیسی وارد بر ورق است. ۲- کرنش پلاستیک در ورق دولایه آلومینیوم- مس بدون در نظرگرفتن چینش لایهها همیشه در لایه بیرونی بیشینه است. الکترومغناطیس، در مرکز ورق و یک نوار دایرهای نزدیک به مرکز ورق اتفاق میافتد که محل اعمال فشار مغناطیسی بیشینه است. ۳- سطح منحنی حد شکلپذیری ورق دولایه آلومینیوم- مس در چینش AC نسبت به چینش AC حدود ۳۰% بالاتر است. این ام بهدلیل این است که در چینش AC ورق مس که شکلپذیری بیشتری نسبت به آلومینیوم دارد روی ورق آلومینیوم قرار دارد و بیشتری نسبت به آلومینیوم دارد روی ورق آلومینیوم قرار دارد و می در مقابل گلوییشدن ورق دولایه مقاومت بیشتری از خود نشان

۴- نمودار حد شکلدهی در فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس نسبت به حالت استاتیک بهبود چشمگیری داشته بهصورتی که سمت راست نمودار حدود ۱۲۰ و سمت چپ نمودار حدود ۵۵% افزایش داشته است. این بهبود برای حالت کرنش صفحهای حدود ۱۶۰۰ است.

تشکر و قدردانی: از مسئولین آزمایشگاه متالورژی و عملیات حرارتی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر با حمایت آقای دکتر *علیرضا فلاحی آرزود/ر*، برای انجام آزمونهای تجربی، کمال تشکر را دارم.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان تعهد مینمایند این مقاله در زمان ارسال، در هیچ مجله داخلی یا خارجی در حال بررسی نبوده و تا تعین تکلیف برای سایر مجلات ارسال نخواهد شد.

تعارض منافع: این پژوهش حاصل پایاننامه دکتری آقای *میلاد شبانپور* تحت راهنمایی جناب آقای دکتر *علیرضا فلاحیآرزودار* است.

سهم نویسندگان: میلاد شبان پور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روششناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)؛ علیرضا فلاحیآرزودار (نویسنده دوم)، روششناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%).

منابع مالی: هزینهها از امکانات دانشگاه امیرکبیر و گرنت استاد برای دانشجویان دکتری استفاده شده است.

فهرست علايم

A	تنش تسليم اوليه ماده (MPa)
В	ضریب کار سختی در دمای محیط
С	ضریب حساسیت به نرخ کرنش
m	ضریب نرمشوندگی در دماهای بالا
n	ضریب کار سختی
Т	دما (K)
علايم يونانى	
ε	نرخ کرنش
σ^-	تنش جریان مادہ (MPa)
زيرنويسها	
m	ذوب
r	تبديل

(MPa)

13- Lang L, Danckert J, Nielsen KB. Multi-layer sheet hydroforming: Experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle. Journal of Materials Processing Technology. 2005;170(3):524-535. 14- Tseng HC, Hung C, Huang CC. An analysis of the formability of aluminum/copper clad metals with different thicknesses by the finite element method and experiment. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;49(9):1029-1036.

15- Bagherzadeh S, Mirnia MJ, Mollaei Dariani B. Numerical and experimental investigations of hydromechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets. Journal of Manufacturing Processes. 2015;18:131-140.

16- Darabi R, Deilami Azodi H, Bagherzadeh S. Investigation into the effect of material properties and arrangement of each layer on the formability of bimetallic sheets. Journal of Manufacturing Processes. 2017;29:133-148.

17- Zahedi A, Mollaei Dariani B, Mirnia MJ. Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model. International Journal of Mechanical Sciences. 2019;153-154:341-358.

18- Shabanpour M, Fallahi Arezoodar A. Numerical and experimental investigation of electromagnetic inward tube forming in coupled method. Journal of Mechanical Engineering Amirkabir. 2016;48(2):215-226. [Persian]

19- Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: American Defense Preparedness Association. Seventh International Symposium on Ballistics: Proceedings: The Hague, the Netherlands, 19-21 April 1983. Unknwon City: American Defense Preparedness Association; 1983.

20- Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering Fracture Mechanics. 1985;21(1):31-48.

21- Pierazzo E, Artemieva NA, Asphaug E, Baldwin EC, Cazamias J, Coker RF, et al. Validation of numerical codes for impact and explosion cratering: Impacts on strengthless and metal targets. Meteoritics & Planetary Science. 2008;43(12):1917-1938.

22- Li Y, Luo M, Gerlach J, Wierzbicki T. Prediction of shear-induced fracture in sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology. 2010;210(14):1858-1869.

23- Chen CY, Hwang WS. Effect of annealing on the interfacial structure of aluminum-copper joints. Materials Transactions. 2007;48(7): 1938-1934.

1- Karajibani E, Hashemi R, Sedighi M. Forming limit diagram of aluminum-copper two-layer sheets: Numerical simulations and experimental verifications. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;90(9-12):2713-2722.

2- Hashemi R, Karajibani E. Forming limit diagram of Al-Cu two-layer metallic sheets considering the Marciniak and Kuczynski theory. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2018;232(5):848-854.

3- Jalali Aghchai A, Shakeri M, Mollaei-Dariani B. Theoretical and experimental formability study of twolayer metallic sheet (Al1100/St12). Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2008;222(9):1131-1138.

4- Gerdooei M, Mollaei Dariani B. Strain-rate-dependent forming limit diagrams for sheet metals. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2008;222(12):1651-1659.

5- Seth M, Vohnout VJ, Daehn GS. Formability of steel sheet in high velocity impact. Journal of Materials Processing Technology. 2005;168(3):390-400.

6- Shabanpour M, Fallahi Arezoodar A. Multi-objective optimization of the depth of bead and tearing in electromagnetic tube compression forming. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;87(1-4):867-875.

7- Psyk V, Risch D, Kinsey BL, Tekkaya AE, Kleiner M. Electromagnetic forming-a review. Journal of Materials Processing Technology. 2011;211(5):787-829.

8- Takatsu N, Kato M, Sato K, Tobe T. High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force. JSME International Journal Ser 3, Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry. 1988;31(1):142-148.

9- Correia JPM, Siddiqui MA, Ahzi S, Belouettar S, Davies R. A simple model to simulate electromagnetic sheet free bulging process. International Journal of Mechanical Sciences. 2008;50(10-11):1466-1475.

10- Golovashchenko SF. Material formability and coil design in electromagnetic forming. Journal of Materials Engineering and Performance. 2007;16(3):314-320.

11- Li C, Liu D, Yu H, Ji Z. Research on formability of 5052 aluminum alloy sheet in a quasi-static-dynamic tensile process. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2009;49(2):117-124.

12- Takuda H, Mori K, Fujimoto H, Hatta N. Prediction of forming limit in deep drawing of Fe/Al laminated composite sheets using ductile fracture criterion. Journal of Materials Processing Technology. 1996;60(1-4):291-296.