



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):2159-2169.

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 aluminum-copper 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 left-hand 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 hydro-mechanical 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 shear-induced fracture in sheet metal forming
- [23] Effect of annealing on the interfacial structure of aluminum-copper joints

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

علیرضا فلاحی آرزودار PhD

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

چکیده

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 شکل‌دهی الکترومغناطیس بررسی می‌شود. شبیه‌سازی شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق دولایه در نرخ کرنش بالا به‌کمک نرم‌افزار ماکسول 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 چپینش CA ۱۹٪ از چپینش AC بزرگ‌تر است. با استفاده از معیار مشتق دوم کرنش، نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه آلومینیوم-مس استخراج شد. سطح نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه آلومینیوم-مس با ضخامت اولیه ۵/۵ میلی‌متر در چپینش AC نسبت به CA حدود ۳۰٪ بالاتر است. دلیل این بهبود این است که در چپینش AC ورق با شکل‌پذیری بیشتر (مس) در لایه خارجی است و در مقابل تنش کششی وارده، مقاومت بیشتری در برابر گلوبی‌شدن دارد. لایه بیرونی با شکل‌پذیری بهتر می‌تواند باعث بهبود شکل‌پذیری ورق دولایه شود. سطح نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه آلومینیوم-مس در نرخ کرنش بالا نسبت به حالت استاتیکی 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

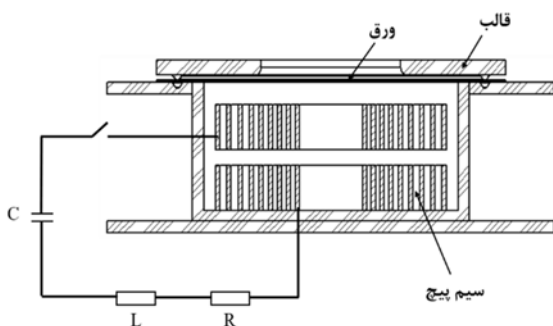
فرآیند شکل‌دهی ورق یکی از فرآیندهای مهم در صنایع خودروسازی و هوایی است. روش‌های مختلفی مانند برشکاری، خم‌کاری، اتساع، کشش عمیق، چرخ‌کاری و نورد از جمله فرآیندهای شکل‌دهی سنتی و مرسوم ورق است.

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 کامپوزیتی 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 شکل‌پذیری 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 می‌شود [6]. شکل ۱ اساس کار شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق را نشان می‌دهد.

مدار الکتریکی مجموعه متشکل از یک منبع تغذیه و بانک خازن است. با شارژ خازن و تخلیه یک‌باره آن، جریان شدید در سیم‌پیچ به‌وجود می‌آید. بنابر قانون لنز نیز، یک جریان القایی 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 ارائه دادند [8]. کوریلا 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]. گالوا/شچنکو با استفاده از یک کوئل مارپیچ مسطح حالت کرنش کششی دومحوری برای شکل‌دهی یک ورق مربعی‌شکل را به‌کمک شکل‌دهی الکترومغناطیس ایجاد کرد. او با استفاده از نمونه‌هایی با عرض‌های مختلف حالت کشش تک‌محوری و کرنش صفحه‌ای را ایجاد نمود [10]. لی و همکاران نیز حالت کرنش کششی دومحوری را همانند روش گالوا/شچنکو 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، شکل‌پذیری افزایش می‌یابد [13]. تیسنگ و همکاران کرنش حدی ورق دولایه آلومینیوم-مس را در فرآیند

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 گلوئی استفاده می‌شود تا زمان دقیق گلوئی شدن در شبیه‌سازی مشخص شود. به کمک نتایج شبیه‌سازی و پیش‌بینی گلوئی، نمودار حد شکل‌دهی ورق رسم می‌شود. برای صحت‌گذاری 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 استاتیک مقایسه خواهد شد.



شکل ۱) نمای از شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق

شبیه‌سازی

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 می‌شود. 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 کشیده شدن ورق در حفره قالب، ترمز مکانیکی روی قالب و صفحه بالایی تعبیه شده است. برای بررسی تأثیر چینش لایه‌ها بر فشار الکترومغناطیس، یک‌بار از چینش آلومینیوم-مس (AC) و بار دیگر از چینش مس-آلومینیوم (CA) استفاده شد. لایه اول نزدیک به سیم‌پیچ و لایه دوم در تماس با

کشش عمیق به‌دست آوردند. نتایج آنها نشان داد که تنش پسماند بین لایه‌ها تأثیر منفی روی شکل‌پذیری ورق دارد [14]. گردویی و مولایی *داریانی* به بررسی تأثیر نرخ کرنش بر روی دی‌گرام حد شکل‌دهی ورق پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در نرخ کرنش بالا (از ۱۰۰ به بالا) رشد گلوئی به تاخیر افتاده و این به دلیل اثر اینرسی جرم است. آنها همچنین بیان کردند که در نرخ کرنش بالا نمودار حد شکل‌دهی نسبت به حالت استاتیک بالاتر است [4]. *جلالی آقاچایی* و همکاران به‌صورت تئوری نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه آلومینیوم و فولاد متصل‌شده 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 کردند. نتایج نشان داد که روش لایه مجزا تطابق بهتری 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 منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه را استخراج کنند. نتایج به‌دست‌آمده به‌وسیله این 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 گلوئی شدن از دو معیار مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل و کرنش اصلی استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از این روش تطابق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشت اما روش آنها زمان‌بر بود و صحت کافی نیز نداشت [1]. *داریبی* 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 می‌شود. همچنین با افزایش نسبت ضخامت فولاد به ضخامت آلومینیوم در ضخامت کل ثابت، شکل‌پذیری بهبود می‌یابد [16]. *زاهدی* و همکاران نیز به بررسی گلوئی و کرنش شکست 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 می‌یابد [17].

همان‌طور 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 پایین‌تر مورد بررسی قرار گیرد. در این

قالب است. مشخصات سیم پیچ استفاده شده در شبیه سازی در جدول ۱ و مشخصات مغناطیسی و الکتریکی مورد استفاده برای ورق، قالب و سیم پیچ در جدول ۲ آمده است [3].

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

که در آن تنش جریان ماده، A و B برابر تنش تسلیم اولیه ماده و ضریب سختی در دمای محیط، T دمای قطعه کار، T_m دمای ذوب ماده، T_r دمای مرجع (معمولاً دمای محیط)، C ضریب حساسیت به نرخ کرنش، m ضریب نرم شونگی در دماهای بالا، n توان کار سختی، $\bar{\epsilon}$ نرخ کرنش پلاستیک لحظه ای و $\bar{\epsilon}_0$ نرخ کرنش پلاستیک مرجع است. جدول ۳ ثابت های مربوط به معادله ویسکوپلاستیک جانسون- کوک را نشان می دهد [20, 21].

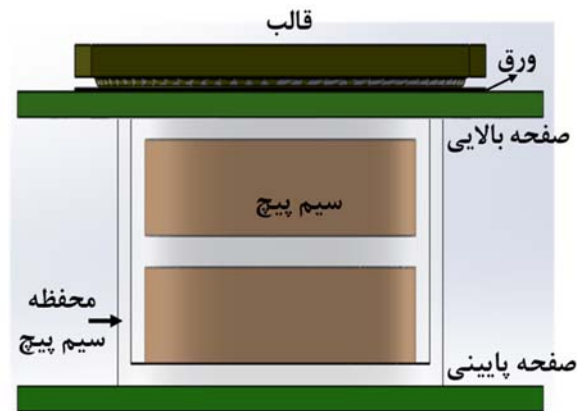
جدول ۳) پارامترهای ثابت معادله ویسکوپلاستیک جانسون- کوک [21, 22]

ماده	مقدار	
	مس ۱۱۰۰	آلمینیوم ۱۰۵۰
A (مگا پاسکال)	۴۹	۹۰
B (مگا پاسکال)	۱۵۷	۲۹۲
n	۰/۱۶۷	۰/۳۱
C	۰/۰۱۶	۰/۰۲۵
m	۱/۷	۱/۰۹

ضریب اصطکاک استفاده شده برای مس- فولاد ۰/۱۸ و برای آلومینیوم- فولاد ۰/۲۱ در نظر گرفته شد. روش استخراج ضریب اصطکاک بدین صورت است که ابتدا ضریب اصطکاک برای مس- فولاد و آلومینیوم- فولاد به ترتیب از مطالعه کرجی بانی و همکاران [1] استخراج و سپس شبیه سازی انجام شد و توسط سعی و خطا و در نظر گرفتن 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 ۰/۲۷ میلی متر است، اندازه المان ۰/۳ میلی متر در نظر گرفته شد [2]. نمودار ۱ نتیجه آنالیز حساسیت مش را نشان می دهد. نمودار نشان می دهد که مناسب ترین اندازه المان برای رسیدن به نتیجه دقیق تر و صرف زمان کمتر حدود ۰/۳ میلی متر است.

برای به دست آوردن نمودار حد شکل دهی باید موضع گلوبی 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 گلوبی در شکل ۳ آورده شده است. منطقه گلوبی با حرف A و نقاط B، C و D نقاط خارج از این موضع هستند. برای به دست آوردن زمان مربوط به گلوبی 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 گلوبی شدن فرآیند را مشخص می کند.



شکل ۲) شماتیک ساختار فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی

جدول ۱) پارامترهای سیم پیچ استفاده شده در شبیه سازی

پارامتر	مقدار
تعداد لایه ها	۲
تعداد دور	۹
گام	۵/۵
سطح مقطع	۳×۳۰ میلی متر

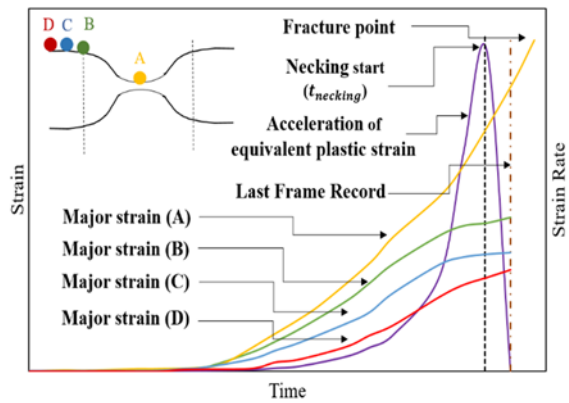
جدول ۲) مشخصات الکتریکی و مغناطیسی سیم پیچ و ورق [6]

ماده	تراوایی مغناطیسی (H/m)	رسانایی الکتریکی (S/m)
آلمینیوم	۱/۲۵۶۶۶۵e-۶	۳/۵۰e۷
مس	۱/۲۵۶۶۲۹e-۶	۵/۹۶e۷

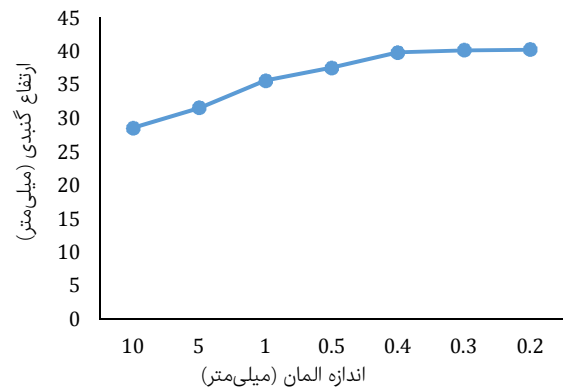
پس از پایان شبیه سازی قسمت مغناطیسی، فشار الکترومغناطیسی وارد بر ورق از نرم افزار استخراج شد. این فشار به عنوان یک فشار ورودی در نرم افزار تحلیل مکانیکی آباکوس استفاده شد. برای حل قسمت مکانیکی، ورق به صورت شکل پذیر و پوسته مدل شده است. ضخامت اولیه لایه آلومینیوم و مس به ترتیب ۰/۲۷ و ۰/۲۳ میلی متر در نظر گرفته شد و به صورت کامپوزیت در نرم افزار آباکوس مدل شد. تعداد پنج نقطه انتگرال گیری در ضخامت هر لایه تعریف شد. مدل سازی ورق دولایه به صورت کامپوزیت دو مزیت دارد؛ یکی زمان حل را کاهش می دهد و دیگر اینکه امکان تعریف خواص مواد به صورت 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 مهم ترین بخش ها در نرم افزار آباکوس تعریف خواص مواد است. چون فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی یک فرآیند نرخ کرنش بالا است به همین دلیل از معادله ویسکوپلاستیک جانسون- کوک مطابق معادله ۱ برای تعریف خواص مواد استفاده شد [19].

بعد از انجام فرآیند نورد به دلیل وجود کار سختی در ورق، انعطاف‌پذیری ورق دولایه کاهش یافت و ورق خاصیت فبری پیدا کرد. برای بازگشت خواص ورق دولایه به خواص ورق ابتدایی قبل از نورد، فرآیند آنیل ورق دولایه در دمای ۳۰۰ درجه و زمان ۳۰ دقیقه طبق مطالعه چن و هوآنگ [23] انجام شد. برای تشخیص میزان دقیق ضخامت لایه‌های آلومینیوم و مس، مقطع ورق در زیر میکروسکوپ نوری قرار گرفت و به وسیله دوربین عکاسی، عکس مقطع ورق ثبت شد. سپس به وسیله نرم‌افزار دیجی مایزر ضخامت آلومینیوم و مس به ترتیب ۲۷٪ و ۲۳/۰ میلی‌متر طبق شکل ۶ به دست آمد.

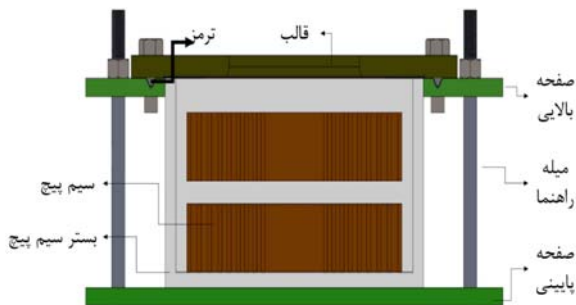
برای ایجاد حالت‌های مختلف کرنش از ورق‌هایی با عرض و هندسه متفاوت بر پایه روش ناکاژیم (Nakajima) مطابق شکل ۷ طبق تحقیق هاشمی و کرجی‌بانی [2] استفاده شد. سپس دوایر به قطر ۳ میلی‌متر بر روی ورق‌ها توسط رنگ فلز چاپ شد. فرآیند چاپ نسبت به فرآیند حک الکتروشیمیایی باعث می‌شود که هیچ آسیبی به سطح وارد نشود. 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 به دست آوردن کرنش‌های اصلی و فرعی، قطر دوایر تبدیل‌شده به بیضی توسط میکروسکوپ دینولایت و نرم‌افزار مربوط به آن اندازه‌گیری شد.



شکل ۳) شماتیک معیار گلوبی شدن برحسب زمان



نمودار ۱) منحنی اعتبارسنجی اندازه مش



شکل ۴) سیم‌پیچ، قالب و ساختار شکل‌دهی الکترومغناطیسی ورق



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

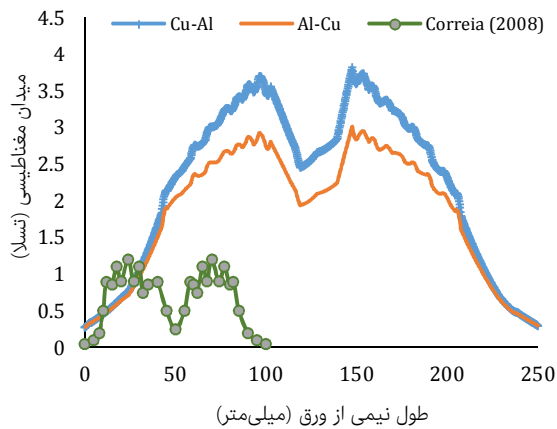
آزمون تجربی

برای ساخت سیم‌پیچ از تسمه مسی دقیقاً مطابق با سطح مقطع سیم‌پیچ جدول ۱ استفاده شد. این تسمه به صورت دو سیم‌پیچ به تعداد ۹ دور پیچیده شد و سپس به صورت دولایه روی هم قرار گرفت و از مرکز به همدیگر متصل شد. سپس درون یک بستر از جنس پلی‌اتیلن برای عایق‌بودن 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 صفحه بالایی یک سوراخ به قطر ۱۵۰ میلی‌متر برای عبور میدان مغناطیسی 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.

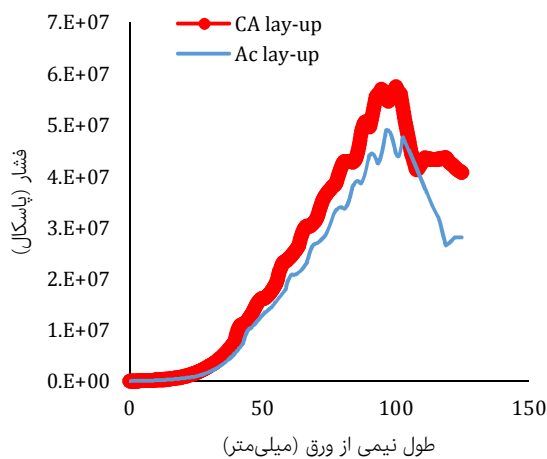
مجموعه دستگاه شکل‌دهی مغناطیسی در شکل ۵ آورده شده است. این مجموعه متشکل از قالب و سیم‌پیچ، بانک خازن، سوئیچ، منبع تغذیه و قسمت کنترل است.

برای تولید ورق دولایه آلومینیوم- مس از روش اتصال انفجاری استفاده شد. ضخامت ابتدایی ورق تولیدی یک میلی‌متر بود اما به دلیل محدودیت تولید فشار مغناطیسی توسط دستگاه شکل‌دهی الکترومغناطیسی موجود برای تغییر شکل در ورق با ضخامت یک میلی‌متر، ضخامت کل ورق طی نورد سرد به ۰/۵ میلی‌متر رسید.

آلومینیوم و در نتیجه گردش راحت تر جریان القایی در لایه مس است. بنابراین زمانی که مس به سیم پیچ نزدیک است فشار الکترومغناطیس بیشتر به ورق دولایه وارد می شود.

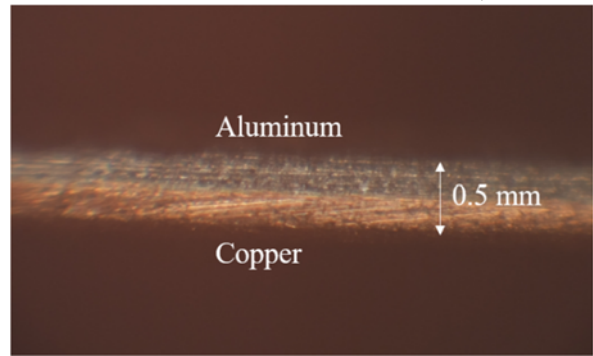


نمودار ۲) میدان مغناطیسی وارد بر ورق در چینش AC و CA و میدان ارایه شده در پژوهش کوریا و همکاران^[9]

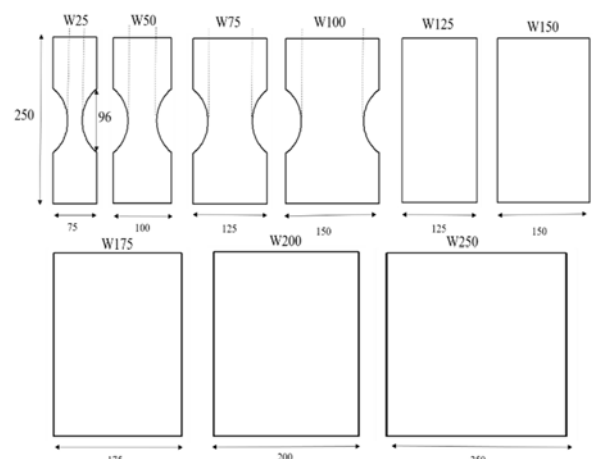


نمودار ۳) توزیع فشار مغناطیسی بر ورق در دو چینش AC و CA

تفاوت فشار مغناطیسی در دو چینش AC و CA باعث می شود که ارتفاع گنبدی در تغییر شکل ورق متفاوت از هم باشد. برای مقایسه بهتر میزان شکل پذیری ورق دولایه با توجه به تفاوت فشار الکترومغناطیس وارد بر ورق بر حسب نوع چینش، از یک ورق محرک در زیر ورق اصلی و روی سیم پیچ استفاده شد. ورق محرک روی سیم پیچ و در زیر ورق اصلی قرار می گیرد و فشار الکترومغناطیس بر ورق محرک وارد می شود و برخورد آن به ورق اصلی باعث ایجاد شکل دهی روی ورق اصلی می شود. با استفاده از ورق محرک اثر چینش متفاوت لایه ها بر فشار مغناطیسی حذف خواهد شد. در آزمون تجربی و شبیه سازی های انجام شده در نرم افزار آباکوس از دو ورق مسی به ضخامت ۰/۵ و یک با قطر ۱۴۵ میلی متر به عنوان ورق محرک طبق شکل ۸ استفاده شد. فشار وارد شده به ورق دولایه در هنگام استفاده از دو ضخامت مختلف



شکل ۶) تعیین ضخامت لایه های آلومینیوم و مس با بزرگ نمایی ۵۰ در زیر میکروسکوپ



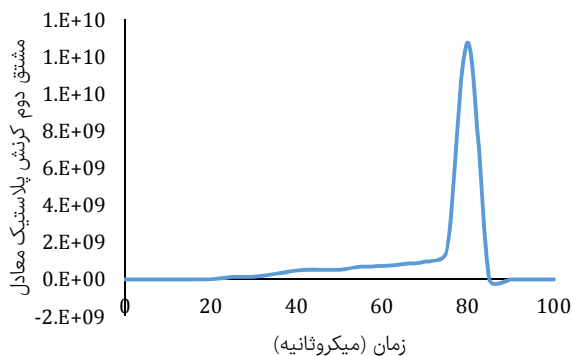
شکل ۷) هندسه های متفاوت قطعات برای ایجاد حالات مختلف کرنش طبق روش ناکازیم

نتایج و بحث

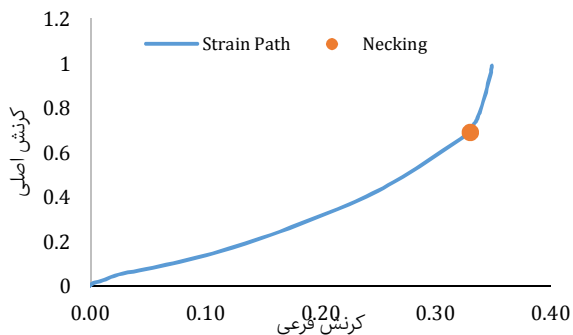
میدان الکترومغناطیس وارد شده به ورق دولایه آلومینیوم-مس در ولتاژ ۵۵۰۰ ولت برای دو چینش AC و CA، در نمودار ۲ نشان داده شده است. منحنی میدان مغناطیسی ارایه شده در پژوهش کوریا و همکاران^[9] نیز در این نمودار ترسیم شده است. به دلیل تلاقی دو میدان مغناطیس در سمت چپ و راست ورق، فشار الکترومغناطیس دقیقاً در مرکز ورق کاهش یافته و با دور شدن به سمت خارج ورق افزایش و سپس به صفر می رسد. کوریا و همکاران نیز با استفاده از حل معادلات ماکسول منحنی ارایه شده در نمودار ۲ را ارایه نمودند^[9]. منحنی آنها نیز در وسط قطعه کار دارای یک کمینه بود. تفاوت در اندازه میدان ها ناشی از اختلاف در سیم پیچ، تعداد دور و تعداد لایه ها است. در نهایت باید متذکر شد که شکل دهی مرکز ورق به واسطه اینرسی وارد از طرف نقاط نزدیک به مرکز ورق است و در نتیجه مرکز ورق در سمت فشار مغناطیسی وارده حرکت می کند و شکل گنبدی به وجود می آید. نمودار ۳، فشار الکترومغناطیس وارد شده به ورق در ولتاژ ۵۵۰۰ ولت در دو چینش AC و CA را نشان می دهد. فشار الکترومغناطیس در چینش CA نسبت به چینش AC حدود ۱۹% بیشتر است. این اختلاف ناشی از کم تر بودن مقاومت الکتریکی مس نسبت به

پیش‌بینی نماید. زمان دقیق گلوپی شدن برای ورق با هندسه W200 حدود ۸۰ میکروثانیه است. المانی که بیشینه مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل در آن اتفاق افتاده به‌عنوان المان ناپایدار شناخته می‌شود.

نمودار ۶، کرنش‌های اصلی و فرعی را برای ورق دولایه با هندسه W200 با چینش AC نشان می‌دهد. قبل از زمان گلوپی شدن 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



نمودار ۶) خطی بودن مسیر کرنش قبل از گلوپی شدن ورق دولایه با هندسه W200 با چینش AC

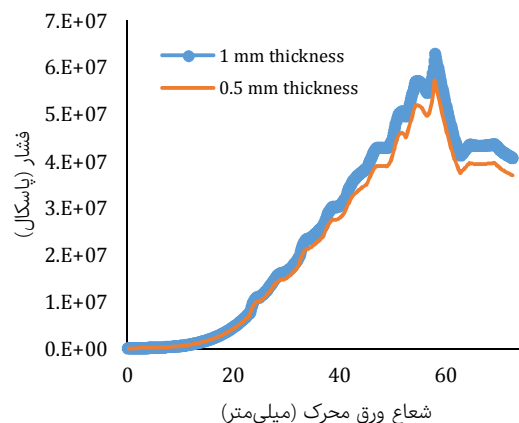
جدول ۴ نتایج بیشینه ارتفاع گنبدی ورق دولایه آلومینیوم-مس در شکل‌دهی الکترومغناطیس در دو چینش متفاوت در حالت شبیه‌سازی و آزمون تجربی را در ولتاژ تخلیه ۵۵۰۰ ولت و استفاده از ورق محرک برای ورق با هندسه‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول ۴ مشخص است، میزان ارتفاع گنبدی در دو چینش در یک ولتاژ تخلیه 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 ۱۵۰ میلی‌متر در یک ولتاژ تخلیه یکسان، میزان ارتفاع گنبدی افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که در

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



شکل ۸) ورق محرک استفاده‌شده روی سیم‌پیچ و زیر ورق اصلی

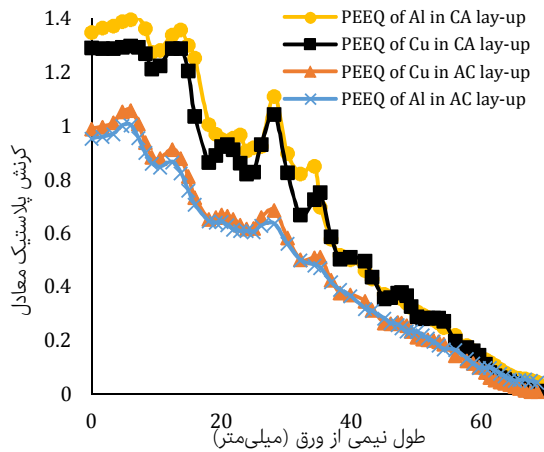
تفاوت در فشار الکترومغناطیس واردشده به ورق در دو حالت استفاده از ورق ۵/۰ و یک میلی‌متر مسی به‌عنوان ورق محرک، در نمودار ۴ نشان داده شده است. در این حالت ورق دولایه اصلی دارای ضخامت ثابت ۵/۰ میلی‌متر و چینش یکسان است. در حالتی که از ورق محرک با ضخامت یک میلی‌متر استفاده شود، فشار الکترومغناطیس وارد به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



نمودار ۹) فشار مغناطیسی وارد به ورق محرک با ضخامت ۵/۰ و یک میلی‌متر

برای بررسی زمان فرآیند گلوپی شدن و استخراج کرنش‌های اصلی و فرعی همان‌طور 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 پیش‌بینی گلوپی شدن مشخص شد به‌خوبی توانسته است زمان گلوپی شدن را

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

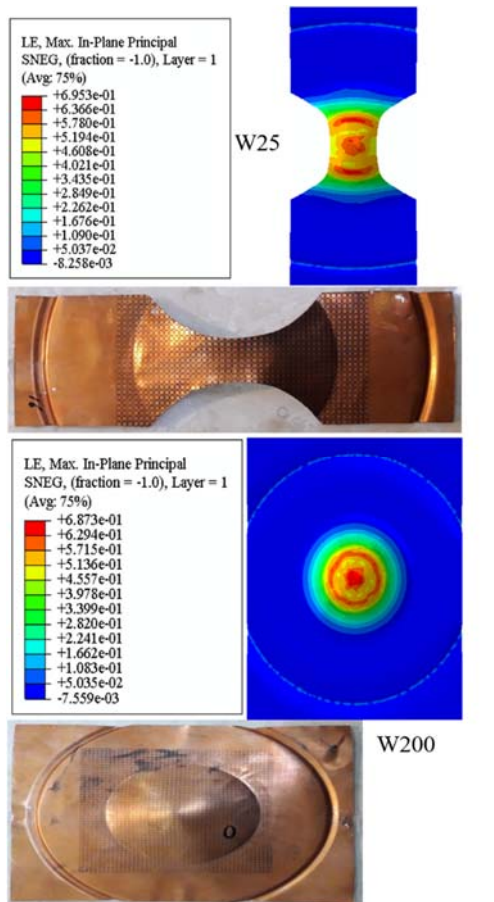


نمودار ۷) کرنش پلاستیک معادل برای هر لایه در دو چینش متفاوت برای ورق با هندسه W200

ورق با عرض کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر به دلیل کوچک‌تر بودن 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 ۱۵۰ میلی‌متر 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

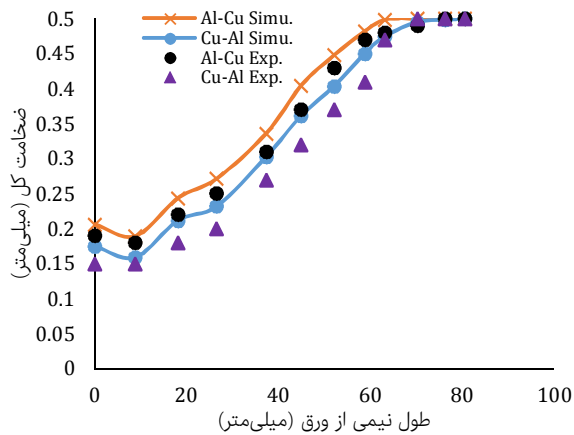
هندسه ورق	ارتفاع گنبدی				
	بیشترین درصد اختلاف	آزمون تجربی	شبیه‌سازی در چینش CA	آزمون تجربی	شبیه‌سازی در چینش AC
		چینش CA	CA	چینش AC	AC
W25	۵/۲	۳۴/۴	۳۶/۲	۳۴/۱	۳۵/۸
W50	۵/۳	۳۷/۸	۳۹/۸	۳۷/۵	۳۹/۴
W75	۵/۵	۳۸/۲	۴۰/۳	۳۷/۹	۳۹/۹
W100	۵/۵	۴۱/۳	۴۳/۶	۳۷/۴	۳۹/۵
W125	۶/۱	۳۷/۸	۴۰/۱	۳۷/۵	۳۹/۴
W150	۶/۱	۳۷/۸	۴۰/۱	۳۷/۴	۳۹/۵
W175	۶/۳	۳۷/۷	۴۰/۱	۳۷/۵	۳۹/۵
W200	۵/۲	۳۸/۱	۴۰/۱	۳۷/۶	۳۹/۵
W250	۵/۸	۳۷/۹	۴۰/۱	۳۷/۵	۳۹/۵



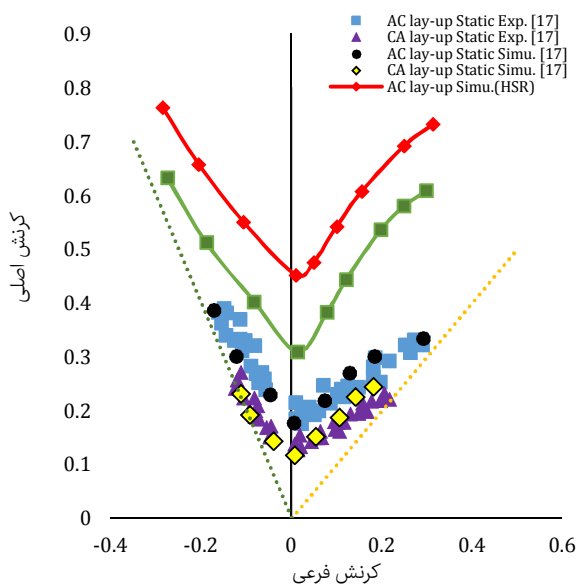
شکل ۹) کرنش لگاریتمی اصلی ورق دولایه آلومینیوم- مس برای دو هندسه متفاوت برای لایه آلومینیوم به‌همراه قطعه‌کار بعد از شکل‌دهی

کرنش پلاستیک معادل برای ورق با هندسه W200 برای دو حالت چینش متفاوت و برای هر کدام از لایه‌ها، در نمودار ۷ نشان داده شده است. کرنش پلاستیک معادل در لایه بیرونی بیشینه است. دلیل این امر این است که لایه بیرونی تحت تنش کششی و لایه داخلی 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 ۵/۰ میلی‌متر و دو هندسه متفاوت و برای چینش AC و لایه آلومینیوم به‌همراه قطعه‌کار بعد از شکل‌دهی، در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد محل گلوبی شدن نیز نزدیک به مرکز ورق است و ترک از المانی که گلوبی 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 وارد شدن بیشینه فشار مغناطیسی وارد بر ورق



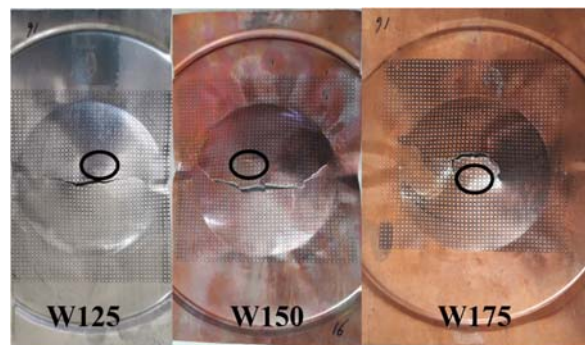
نمودار ۸) توزیع ضخامت ورق دولایه آلومینیوم-مس با هندسه W200 برای چینش AC و CA بعد از شکل‌دهی در شبیه‌سازی و آزمون تجربی



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 گلوبی‌شدن دارد و گلوبی‌شدن به تعویق می‌افتد. لایه مس روی لایه آلومینیوم باعث مقاومت بیشتر در برابر گلوبی‌شدن می‌شود. از نمودار ۹ مشخص است که حد شکل‌دهی ورق دولایه آلومینیوم-مس در حالت نرخ کرنش بالا روندی شبیه به پژوهش زهدی و همکاران^[17] داشته و قابل تایید است. نمودار حد شکل‌دهی در نرخ کرنش بالا نسبت به حالت استاتیکی بهبود یافته

نتایج تجربی محل گلوبی‌شدن در سه ورق W150، W125 و W175، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. محل‌های گلوبی‌شدن با دایره بر روی ورق مشخص شده‌اند. یکی از مشکلات شکل‌دهی الکترومغناطیس رسیدن دقیق به حالت گلوبی 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 گلوبی 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 حالت گلوبی در آزمون تجربی می‌شود. به‌عنوان مثال در یک ولتاژ خاص و هندسه خاص در شبیه‌سازی، گلوبی‌شدن اتفاق می‌افتد اما ورق پاره نمی‌شود. اما در آزمون تجربی با همین ولتاژ و همین هندسه ممکن است گلوبی اتفاق نیفتد یا حتی ورق پاره شود. چون امکان قطع نیرو در هنگام گلوبی وجود ندارد. در شکل ۱۰ مشخص است که همزمان در ورق می‌توان به حالت شکست در یک نقطه و حالت گلوبی و ایجاد ترک اولیه در نقطه دیگر رسید.



شکل ۱۰) محل‌های ایجاد گلوبی در سه هندسه متفاوت ورق W150، W125 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 ۵/۵ میلی‌متر 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. گلوبی‌شدن 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 ۵/۵ میلی‌متر برای دو چینش AC و CA در نمودار ۹ آمده است. برای حالت استاتیک از پژوهش زهدی و همکاران^[17] استفاده شده که نمودار حد شکل‌دهی برای ورق دولایه آلومینیوم-مس با ضخامت اولیه یک میلی‌متر گزارش شده است.

این امر به دلیل 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 نظر گرفتن چینش لایه‌ها همیشه در لایه بیرونی بیشینه است. بیشینه کرنش پلاستیک در ورق دولایه در شکل‌دهی 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 CA حدود ۳۰٪ بالاتر است. این امر به دلیل این است که در چینش AC ورق مس که شکل‌پذیری بیشتری نسبت به آلومینیوم دارد روی ورق آلومینیوم قرار دارد و در مقابل گلوئی شدن ورق دولایه مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد.

۴- نمودار حد شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس نسبت به حالت استاتیک بهبود چشمگیری داشته به‌صورتی که سمت راست نمودار حدود ۱۲٪ و سمت چپ نمودار حدود ۵۰٪ افزایش داشته است. این بهبود برای حالت کرنش صفحه‌ای حدود ۱۶۰٪ است.

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

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

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

سهم نویسندگان: میلاد شبانپور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ علیرضا فلاحی آرزودار (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 علائم

A	تنش تسلیم اولیه ماده (MPa)
B	ضریب کار سختی در دمای محیط (MPa)
C	ضریب حساسیت به نرخ کرنش
m	ضریب نرم‌شوندگی در دماهای بالا
n	ضریب کار سختی
T	دما (K)
علائم یونانی	
ϵ	نرخ کرنش
σ	تنش جریان ماده (MPa)
زیرنویس‌ها	
m	ذوب
r	تبدیل

و نمودار آن در این حالت بالای حد شکل‌دهی استاتیک قرار گرفته است. در حالت نرخ کرنش بالا، سمت راست نمودار حد شکل‌دهی حدود ۱۲٪ بهبود و سمت چپ حدود ۵۰٪ بهبود نسبت به پژوهش زاهدی و همکاران^[17] داشته است. این امر به دلیل وجود نیروی اینرسی بر روی ورق در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس است. نیروی اینرسی باعث به تاخیرآفتادن زمان گلوئی 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 است.

تفاوت کرنش‌های گلوئی شدن 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 ۱۶٪) حد شکل‌دهی 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 گلوئی 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 گلوئی شبیه به فرآیند بالچ، حرکت را قطع و نیرو را کنترل کرد. اندکی تغییر در ولتاژ تخلیه می‌تواند حال گلوئی را به پارگی تبدیل کند یا اصلاً ورق به حالت گلوئی نرسد.

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

پارامتر	نوع چینش	
	CA	AC
شرایط نرخ کرنش بالا	۰/۲۹	۰/۴۴
کرنش اصلی تجربی	۰/۳۱	۰/۴۶
شرایط استاتیک	۰/۱۱	۰/۱۷
کرنش اصلی شبیه‌سازی	۰/۱۲	۰/۱۸
درصد اختلاف نتایج نرخ کرنش بالا با استاتیک	۱۶۳	۱۵۸

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق دولایه آلومینیوم- مس در نرخ کرنش بالا به کمک روش المان محدود انجام شد. با معیار مشتق دوم کرنش، گلوئی شدن ورق دولایه پیش‌بینی شد. با استفاده از هندسه‌های متفاوت حالات مختلف کرنش در آزمون تجربی نیز حاصل شد و نتایج زیر به دست 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.

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 hydro-mechanical 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 two-layer 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.