

مطالعه‌ی تجربی حد شکل‌پذیری آلیاژ تیتانیوم در فرآیند شکل‌دهی نموی گرم ورق

علی بارانی شولی¹، سعید امینی نجف‌آبادی²، محمود فرزین^{3*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی حرفه‌ای مرکز شهید مهاجر اصفهان، اصفهان

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 8415683111، farzin@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 بهمن 1393

پذیرش: 29 اسفند 1393

ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:

شکل‌دهی نموی گرم ورق

جریان الکتریسیه

شکل‌پذیری

چکیده

شکل‌دهی نموی ورق‌های فلزی یک روش جدید برای تولید قطعات با تعداد پایین است، در این فرآیند به کمک یک ابزار ساده‌ی دوار و با حرکت تدریجی آن، ورق به شکل مورد نظر تبدیل می‌شود. به دلیل عدم نیاز به قالب خاص و تجهیزات ارزان قیمت؛ می‌توان به کمک این فرآیند قطعات با اندازه‌های مختلف را با هزینه‌ی کمتری نسبت به روش‌های متداول مانند کشش عمیق تولید کرد. ویژگی شکل‌پذیری پایین Ti-6Al-4V در دمای اتاق، باعث می‌شود شکل‌دهی این ورق در دماهای بالا ضرورت یابد. اثر هم‌زمان ایجاد حرارت و تغییر شکل را می‌توان در فرآیند شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی ورق یافت. در این روش به دلیل عبور جریان الکتریسیته، حرارت موضعی در محل تماس ورق و ابزار تولید می‌شود و با حرکت تدریجی ابزار بر روی ورق، هندسه‌ی مورد نظر شکل می‌گیرد. در پژوهش حاضر، ورق Ti-6Al-4V به روش شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی بصورت تجربی شکل داده شده و اثر پارامترهایی نظیر ضخامت اولیه‌ی ورق، سرعت پیشروی و چرخشی ابزار، گام عمودی حرکت ابزار و مقدار جریان عبوری از مدار بر شکل‌پذیری و حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر بررسی شده است. دمای شکل‌دهی و مقدار جریان ورودی به مدار، تأثیر بسیار زیادی بر شکل‌پذیری ورق داشته و با افزایش ضخامت ورق، مقدار جریان لازم برای شکل‌دهی افزایش می‌یابد. عبور جریان بیش از حد از مدار باعث سوختن ورق و کاهش شکل‌پذیری می‌شود. همچنین نشان داده می‌شود با کاهش سرعت پیشروی و چرخشی، کاهش گام عمودی و افزایش ضخامت ورق، حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی افزایش می‌یابد.

Experimental Formability Investigation of Titanium Alloy in Hot Incremental Sheet Forming Process

Ali Barani Shooli¹, Saeed Amini Nahjafabadi², Mahmoud Farzin^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Institute of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Isfahan, Iran

* P. O. B. 8415683111 Isfahan, farzin@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 15 February 2015

Accepted 20 March 2015

Available Online 21 April 2015

Keywords:

Hot Incremental Sheet Forming

Electric Current

Formability

ABSTRACT

Incremental forming of sheet metals is a new method to produce parts in small batches. In this process, by using a simple rotating tool moving gradually, the sheet will be formed to the desired shape. Since no die is used, relatively cheap equipment, parts with different sizes can be produced with lower cost in comparison with conventional methods like deep drawing. Due to low formability of Ti-6Al-4V at room temperature, forming of these sheets should be performed at high temperatures. Simultaneous effect of heat generation and deformation can be realized in Electric Hot Incremental Forming of sheets. In this method, because of passing electric current, local heat is produced at tool and sheet interface and by incremental movement of tool on the sheet, the desired geometry is formed. In this research Ti-6Al-4V sheet is experimentally formed by Electric Hot Incremental Forming method and effect of influencing parameters, namely initial sheet thickness, feed rate, spindle speed, tool vertical step size and amount of current passing circuit on formability and maximum forming angle of a frustum with varying wall angle is investigated. Amount of current entering the circuit has a significant effect on sheet formability and with increasing sheet thickness, amount of current required for deformation increases. Passing very high current through the circuit causes sheet burning and reduction of formability. It will be shown that a decrease in feed rate, step size and spindle speed and an increase in sheet thickness can increase maximum forming angle.

1- مقدمه

محدودی از یک قطعه باشد، استفاده از روش‌های سنتی مقرون به صرفه نخواهد بود [1]. در سال‌های اخیر در زمینه‌ی شکل‌دهی ورق، فرآیند شکل‌دهی نموی معرفی شده است تا بتوان هزینه‌های ساخت مدل اولیه از

فرآیندهای شکل‌دهی سنتی ورق دارای مشخصه‌ی مشترک از جمله نیاز به قالب‌های خاص هستند. ضرورت اصلی در این فرآیندها جهت اقتصادی بودن آن‌ها تیراژ بالای تولید است. در مواردی که نیاز به تولید سریع تعداد

Please cite this article using:

A. Barani Shooli, S. Amini Nahjafabadi, M. Farzin, Experimental Formability Investigation of Titanium Alloy in Hot Incremental Sheet Forming Process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 107-114, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شکل‌دهی نموی ورق است چراکه وابسته به بسیاری از پارامترهای شکل‌دهی است [4].

در فرآیند شکل‌دهی نموی الکتریکی ورق، به دلیل افزایش دمای ورق و امکان اکسید شدن سطح ورق، تماس مداوم ابزار و ورق همراه با عبور جریان الکتریسیته از محل تماس، کیفیت سطح قطعات تولیدی دارای اهمیت خواهد بود و استفاده از روانکار مناسب را ضروری می‌سازد.

فرآیند شکل‌دهی نموی ورق‌های فلزی، در سال 1960 توسط راکس و در سال 1967 توسط لیزاک بعنوان یک ایده‌ی اولیه و با عنوان "شکل‌دهی بدون قالب" مطرح شد [5]. تحقیقات از سال 2001 ضمن ارایه‌ی تئوری‌های متنوع، شکل تازه‌ای یافت. تعداد پژوهش‌ها در زمینه‌ی شکل‌دهی نموی در ده سال اخیر بسیار زیاد است، عمده‌ی این پژوهش‌ها به بررسی جنبه‌های مختلف شکل‌دهی نموی سرد ورق پرداخته و اثرعوامل مختلف نظیر شکل‌پذیری، دقت ابعادی، کیفیت سطح و شبیه‌سازی اجزای محدود را بررسی کرده‌اند. به دلیل اینکه در پژوهش حاضر هدف مطالعه‌ی شکل‌دهی نموی گرم ورق است، در ادامه تنها به ذکر تعدادی از پژوهش‌هایی که به بررسی شکل‌دهی نموی سرد پرداخته‌اند اکتفا شده و منابع مرتبط با شکل‌دهی نموی گرم بیشتر شرح داده می‌شوند.

در سال 2002 پارک و کیم به بررسی پارامترهای شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای پرداخته و نشان دادند کرنش‌ها تقریباً محوری بوده و در مسیری هم جهت با مسیر شکل‌دهی ایجاد می‌شوند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد با افزایش ضخامت ورق و کاهش شعاع ابزار، میزان شکل‌پذیری ورق فلزی افزایش می‌یابد، آن‌ها بهترین قطر قابل‌استفاده برای ابزار سرکروی را 10 میلی‌متر بیان کردند [6].

در سال 2005 جسویت و همکارانش به شرح جامعی از فرآیند شکل‌دهی نموی با بررسی تحقیقات انجام‌شده در این زمینه پرداخته و جنبه‌های مختلف پژوهش‌های پیشین را بررسی کردند [7]. در همین سال سرتی و همکارانش با شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای ورق در حالت سرد به شبیه‌سازی اجزای محدود با نرم‌افزار دفورم⁷ این فرآیند به تحقیق در این زمینه ادامه دادند [8].

در سال 2008 مارتینز و همکارانش سرعت ابزار را بعنوان یکی از عوامل مؤثر بر اصطکاک بین سطوح معرفی کردند [9]. علاوه بر سرعت ابزار، عواملی از قبیل جنس قطعات و روانکاری سطوح تماس بر اصطکاک ایجاد شده در هنگام فرآیند مؤثر است. افزایش بیش از حد اصطکاک، سبب گرم شدن ابزار و قطعه‌کار و بروز آسیب‌های موضعی در ورق فلزی می‌گردد.

حسین و همکارانش در سال 2008 به شکل‌دهی نموی سرد ورق تیتانیوم خالص تجاری، با رویکرد بدست آوردن حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی پرداختند [4]. در این تحقیق آن‌ها از یک مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر استفاده کرده و اثر پارامترهای گام عمودی، قطر ابزار و سرعت پیشروی را بر حداکثر زاویه‌ی دیواره بررسی کردند. در این تحقیق اثر استفاده از روانکار جامدی مانند MoS_2 بررسی شده و افزایش 12 درجه‌ای در حداکثر زاویه‌ی دیواره، نسبت به حالت بدون روانکار گزارش شد.

در سال 2008 آمبروجیو و همکارانش بیان کردند منیزیم در دمای محیط شکل‌پذیری پایینی دارد و دمای 200 تا 300 درجه‌ی سانتیگراد موجب فعال شدن صفحات لغزشی جدید شده و گرما به طور چشمگیری، شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد [10].

یک قطعه را کاهش داد. در فرآیند شکل‌دهی نموی ورق¹، در هر زمان تنها بخش کوچکی از ورق بصورت محلی تغییر شکل می‌یابد و ناحیه‌ی تغییر شکل یافته تا شکل‌دهی کامل قطعه، بر روی ورق جابه‌جا می‌شود [2]. این فرآیند به دو دسته‌ی اصلی یک نقطه‌ای² و دونقطه‌ای³ تقسیم می‌شود. در فرآیند شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای علاوه بر ابزار، از یک قالب یا نیم قالب جهت انجام فرآیند شکل‌دهی استفاده می‌شود. در شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای، ورق تنها در یک نقطه و آن هم با ابزار در تماس است، و در شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای، ورق در دو نقطه، از یک سمت در تماس با ابزار بوده و از طرف دیگر با قالب زیرین در تماس است. شکل‌دهی نموی یک نقطه‌ای بعلت عدم نیاز به قالب، فرآیندی اقتصادی و منحصر به فرد است [3]. شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای به وسیله‌ی یک ماشین کنترل عددی (سی‌ان‌سی)⁴ و بدون نیاز به قالب انجام می‌شود. در میان فرآیندهای متنوع شکل‌دهی ورق می‌توان فرآیند متداول چرخکاری⁵ را نام برد، که در آن بسیاری از معایب مطرح در سایر عملیات شکل‌دهی سنتی، مانند گوشواره‌ای شدن لبه‌ی ورق و چروکیدگی، که در فرآیندی مثل کشش عمیق اتفاق می‌افتد، وجود ندارد. قابلیت تولید قطعه با هندسه‌ی پیچیده و نامتقارن، فرآیند شکل‌دهی نموی را از فرآیند شکل‌دهی متقارنی مانند چرخکاری که بسیار مشابه فرآیند شکل‌دهی نموی است، متمایز می‌سازد.

فرآیند شکل‌دهی نموی معمولاً بصورت سرد و بر روی ورق فلزهای نرم مانند آلومینیوم انجام می‌شود، اما برای شکل‌دهی ورق تیتانیوم و آلیاژهای آن مانند Ti-6Al-4V به دلیل شکل‌پذیری پایین، برگشت فنری زیاد و نیروی زیاد شکل‌دهی در دمای اتاق، شکل‌دهی سرد قابل استفاده نیست. با گرم کردن ورق می‌توان شکل‌پذیری این ورق‌ها را افزایش داد. شکل‌دهی سوپرپلاستیک یکی از روش‌های شکل‌دهی Ti-6Al-4V است که در دمای حدود 925 درجه‌ی سانتیگراد و در نرخ کرنش بسیار پایین انجام می‌شود، اما تجهیزات بسیار گران قیمت و هزینه‌های زیاد روش شکل‌دهی سوپرپلاستیک، به ویژه برای تولید تعداد کم قطعه، لزوم استفاده از فرآیندهای دیگر مانند شکل‌دهی نموی گرم ورق را آشکار می‌سازد.

برای گرم کردن موضعی ورق در فرآیند شکل‌دهی نموی، استفاده از منابع انرژی مختلف مانند لیزر و جریان الکتریسیته پیشنهاد شده که بهبود شکل‌پذیری و کاهش نیروهای شکل‌دهی را به دنبال خواهد داشت [3]. از دو روش پیشنهادی، به دلیل پیچیدگی و هزینه‌های زیاد منبع لیزر، استفاده از جریان الکتریسیته در اولویت قرار دارد. برای گرم کردن موضعی ورق، قطب مثبت به ابزار شکل‌دهی و قطب منفی به ورق متصل می‌شود و به دلیل عبور جریان الکتریسیته و مقاومت مدار، ورق گرم می‌شود که تمرکز حرارت در محل تماس ابزار و ورق خواهد بود. در شکل 1 این فرآیند بصورت طرح‌وار نشان داده شده است.

در فرآیند شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی⁶ ورق، علاوه بر پارامترهای مؤثر بر شکل‌دهی نموی سرد ورق مانند سرعت پیشروی، سرعت چرخش ابزار، گام تدریجی حرکت عمودی ابزار؛ جریان الکتریسیته و دما نیز اضافه می‌شوند. حد شکل‌پذیری قطعات تولیدی به این روش، که با حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی نسبت به حالت اولیه‌ی ورق سنجیده می‌شود، دیگرچالش مهم در

1- Incremental sheet forming (ISF)
2- Single point incremental forming (SPIF)
3- Two-point incremental forming (TPIF)
4- CNC
5- Spinning
6- Electric Hot Incremental Forming (EHIF)

7- DEFORM

طراحی و ساخت تجهیزات لازم برای شکل‌دهی نموی گرم ورق به روش گرمایش موضعی، با استفاده از جریان الکتریسته اولین مرحله از پژوهش حاضر خواهد بود. شکل‌دهی ورق Ti-6Al-4V بصورت تجربی بر اساس طراحی آزمایش، به منظور بررسی اثر پارامترهایی از قبیل ضخامت اولیه‌ی ورق، سرعت پیشروی ابزار، سرعت چرخشی ابزار، گام حرکت رو به پایین ابزار و مقدار جریان عبوری از مدار، بر میزان شکل‌پذیری ورق در هندسه‌ی مخروطی با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر بین 20 تا 80 درجه انجام می‌گیرد و مقدار شکل‌پذیری از طریق اندازه‌گیری عمق قطعات تا محل پارگی حاصل می‌شود.

2- تجهیزات مورد نیاز

در این فرآیند جریان از طریق مبدل وارد مدار شده و به دلیل مقاومت الکتریکی ورق و مقاومت تماسی در محل تماس ابزار و ورق، محل تماس و نیز کل ورق گرم می‌شوند. در شکل 2 نحوه‌ی اتصال قطعات مورد استفاده در آزمون تجربی به صورت طرح‌وار نشان داده شده است. ماشین کنترل عددی مورد استفاده در این پژوهش ساخت ماشین‌سازی تبریز مدل FP4ME بوده است. در شکل 3 نحوه‌ی اتصال تجهیزات واقعی مورد استفاده در آزمون تجربی نشان داده شده است.

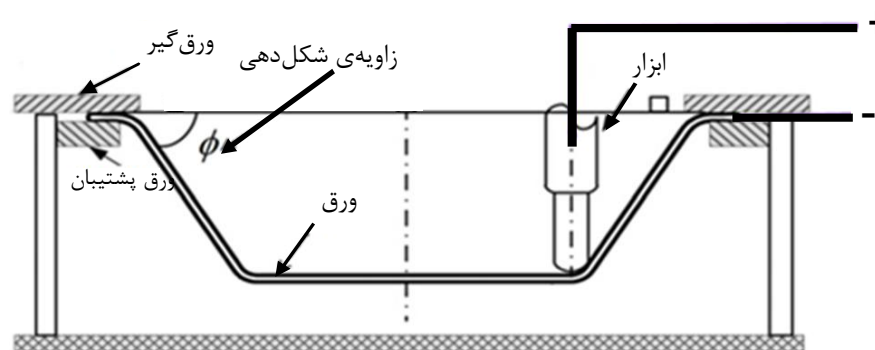
ابزار مورد استفاده در شکل‌دهی نموی، یک ابزار مرسوم در بازار نیست و به همین دلیل از یک تیغچه (میله با مقطع دایره) از جنس فولاد تندبر با قطر 12 میلی‌متر استفاده شده است که برای کاربرد به عنوان ابزار، سر آن به شکل نیمکره و با قطر 8 میلی‌متر تراشکاری شده است. برای کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش میزان جریان عبوری به ابزار از یک کولت مسی استفاده شده است. ابزار درون کولت مسی با طول 35 میلی‌متر، قطر خارجی و داخلی به ترتیب 20 و 12 میلی‌متر، قرار گرفته و این مجموعه درون کولت از جنس تفلون که یک عایق الکتریسته و حرارت مناسب است، قرار می‌گیرد. طول کولت تفلونی 50 میلی‌متر بوده و قطر خارجی و داخلی آن به ترتیب 25 و 20 میلی‌متر است. این ابزار در شکل 4 نشان داده شده است.

به دلیل کم‌یاب بودن ورق Ti-6Al-4V از یک فیکسچر کوچک استفاده شده است. این فیکسچر فضای کاری مربعی‌شکل به ضلع 80 میلی‌متر را ایجاد می‌کند. در شکل 5 این فیکسچر آورده شده است.

در شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی، جریان خروجی از مبدل باید به ابزار دارای سرعت دورانی منتقل شود. برای این کار سیستمی طراحی شده که علاوه بر کاهش اتلاف توان الکتریکی، از نفوذ حرارت و جریان برق به کلگی سی‌ان‌سی جلوگیری شود. این مجموعه با جزئیات بیشتری در شکل 6 نشان داده شده است. یک گیره با دو فنر کناری و با دغالی از جنس گرافیت که مقاومت الکتریکی پایینی دارد، به دور کولت مسی ابزار قفل می‌شود تا بتواند هنگام شکل‌دهی حداکثر تماس را برقرار کند. یک لوله‌ی تفلونی برای ثابت نگه‌داشتن گیره هنگام شکل‌دهی، به کلگی سی‌ان‌سی پیچ می‌شود.

برای تأمین توان الکتریکی مورد نیاز جهت شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی ورق، در پژوهش حاضر از برق شهر استفاده شده است. برق شهر با ولتاژ بالا وارد یک تنظیم‌کننده‌ی ولتاژ می‌شود، سپس یک خروجی از این تنظیم‌کننده وارد مبدل جریان متناوب شده که برق با ولتاژ بالا را به برق با ولتاژ پایین تبدیل می‌کند.

ورق مورد بحث در این پژوهش Ti-6Al-4V است، این ورق در کشور ما بسیار کمیاب و گران است، از اینرو آزمون‌ها با استفاده از نمونه‌های کوچک ورق Ti-6Al-4V به شکل مربع به ضلع 100 میلی‌متر و در سه ضخامت 0/4



شکل 1 فرآیند شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای گرم الکتریکی ورق

گرم کردن کل ورق دشواری‌ها و معایب زیادی از قبیل هزینه‌ی زیاد تجهیزات دارد. دوفلو و همکارانش در سال 2007 میلادی نشان دادند به کمک حرارت موضعی می‌توان فرآیند را بهبود بخشید [11]. در این مطالعه از منبع لیزر با توان 500 وات برای ایجاد حرارت بصورت موضعی بر روی ورق‌هایی از جنس آلیاژ تیتانیوم، کرم و آلومینیوم پرداخته و اثر حرارت موضعی را بر کاهش برگشت فنری بررسی و بهبود شکل‌پذیری را گزارش کردند. تجهیزات مورد استفاده در شکل‌دهی به کمک لیزر پیچیده بوده و امکان نصب بر روی یک سی‌ان‌سی معمولی را نداشت. در ادامه‌ی تحقیق بر روی شکل‌دهی نموی به کمک حرارت موضعی، فن و همکارانش در سال 2008 یک تکنیک ارزان‌تر را که اساس آن بر استفاده از جریان الکتریسته برای به وجود آوردن حرارت در ورق بود، معرفی کردند [3]. این جریان توسط منبع ولتاژ مستقیم¹ تولید شده و در یک مدار بسته بین ابزار فرم‌دهی و ورق در جریان است. آن‌ها نشان دادند با افزایش جریان، دما در ورق افزایش یافته که سبب افزایش شکل‌پذیری ورق می‌شود.

در سال 2010 فن و همکارانش با استفاده از فرآیند شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی ورق، آلیاژ Ti-6Al-4V را شکل دادند [12]. این تحقیق نشان داد با استفاده از این روش، این آلیاژ را می‌توان در محدوده‌ی دمایی 600-500 درجه‌ی سانتیگراد، با مقدار ناچیزی اکسید به خوبی شکل داد. سه آزمایش با جریان و سرعت پیشروی متفاوت، به منظور بررسی اثر آن‌ها بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی با استفاده از هندسه‌ی مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر انجام شده و در دمای 500 درجه‌ی سانتیگراد به حداکثر زاویه‌ی دیواره‌ی 72/1 درجه دست یافتند.

آمبروجیو و همکارانش در سال 2012 فرآیند شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی را بر روی ورق آلیاژهای تیتانیوم Ti-6Al-4V، آلومینیوم Al2024 و منیزیم AZ31 انجام دادند [13]. در این پژوهش تعدادی مخروط با زوایای دیواره‌ی مختلف شکل‌دهی شد. آن‌ها همچنین از یک میله از جنس فولاد تندبر² به قطر 12 میلی‌متر بعنوان ابزار استفاده کردند. در واقع این ابزار باید مقاومت مکانیکی خوبی در برابر حرارت داشته باشد تا در طول فرآیند در اثر نیروهای شکل‌دهی دچار شکست یا سایش بیش از حد نشود.

شی و همکارانش در سال 2013 ورق فولاد کم کربن DC04 با ضخامت اولیه‌ی 0/8 میلی‌متر را به روش شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی ورق، شکل‌دهی کردند [14]. در این تحقیق اثر حرارت را بر بهبود دقت ابعادی قطعات و اثر میزان جریان را بر سایش ابزار بررسی کردند. هرچه جریان بالا می‌رود سایش سر ابزار افزایش می‌یابد. هرچند این فولاد در دمای محیط به حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی 76 درجه می‌رسد، دقت ابعادی قطعات تولیدی پایین است.

1- DC

2- High Speed Steel (HSS)

20 و 80 درجه در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به شکل 8 اگر $P_c(x_c, y_c)$ نقطه‌ای از قطعه باشد که پارگی از آن‌جا شروع می‌شود، ϕ_c زاویه‌ی دیواره در این نقطه و h_c ارتفاع این نقطه و در واقع عمق پارگی باشد، حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی (ϕ_{max}) از رابطه‌ی (1) به دست می‌آید [4, 15, 16].

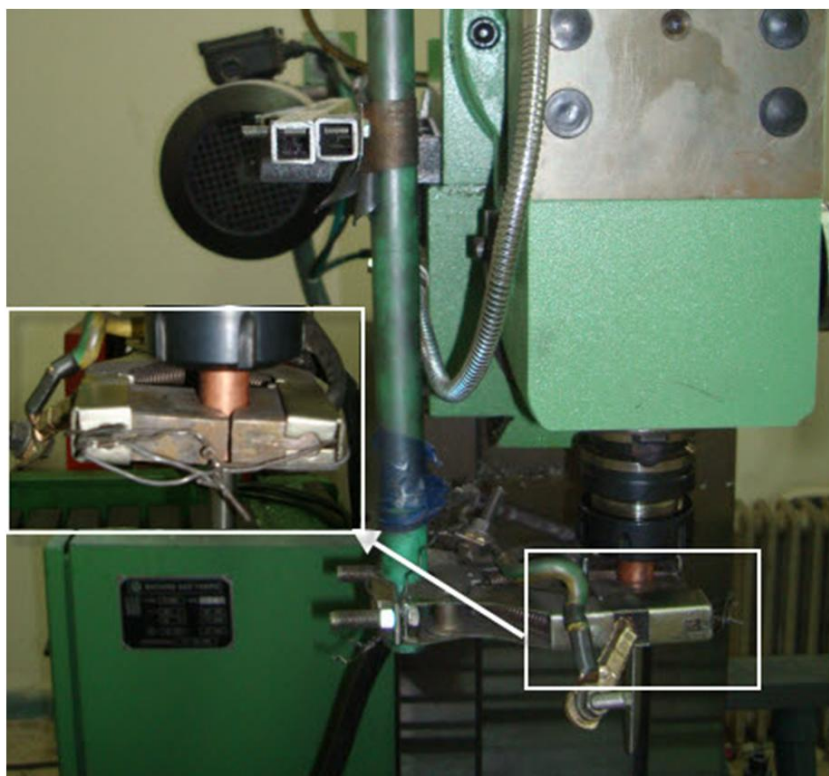
$$\phi_c = \cos^{-1} \left(\frac{y_1 - h_c}{R} \right) \quad (1)$$



شکل 4 ابزار مورد استفاده به همراه کولت‌های مسی و تفلونی



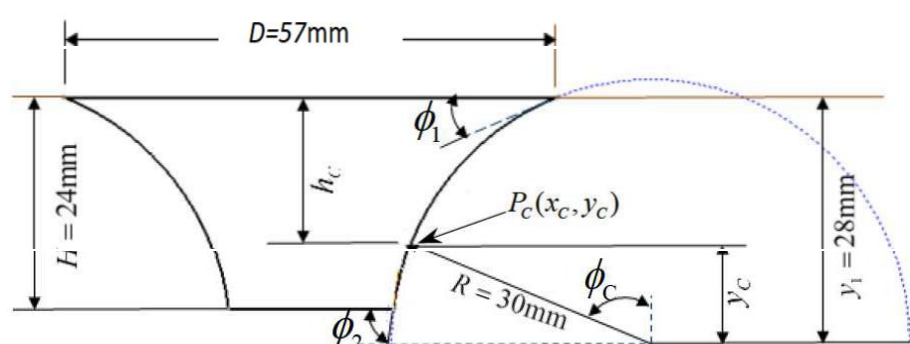
شکل 5 فیکسچر ساخته شده برای شکل‌دهی ورق Ti-6Al-4V



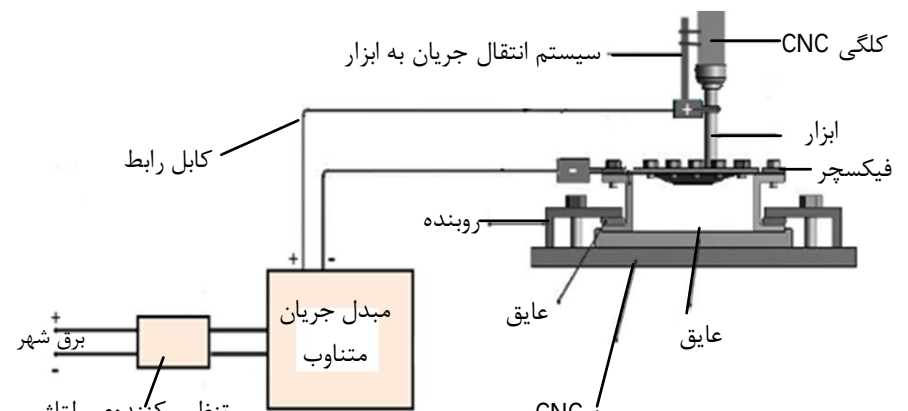
شکل 6 سیستم طراحی شده برای اتصال جریان الکتریکی به ابزار



شکل 7 نحوه‌ی روانکاری سطح قطعه کار هنگام شکل‌دهی



شکل 8 مقطع مخروط و پارامترهای مورد نیاز برای تعیین حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی



شکل 2 نحوه‌ی اتصال تجهیزات در شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی ورق



شکل 3 مجموعه‌ی مورد استفاده برای شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی ورق

میلی‌متر، 0/62 میلی‌متر و 1/05 میلی‌متر انجام شده است.

به دلیل واکنش‌پذیری زیاد ورق Ti-6Al-4V به ویژه در دماهای بالا، همچنین تماس مداوم ابزار و ورق در شکل‌دهی نموی، استفاده از روانکار الزامی است. در شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی ورق، به دلیل وجود جریان الکتریسیته و دمای بالا نمی‌توان از روانکار مایع استفاده کرد و از بین روانکارهای جامد، با توجه به این کاربرد خاص، پودر مولیبدنیت (MoS_2) نسبت به بقیه‌ی روانکارهای مرسوم مانند گرافیت مناسب‌تر است. در پژوهش حاضر از پودر مولیبدنیت صنعتی تولید شده در شرکت مس سرچشمه سیرجان استفاده شده است. ابتدا سطح ورق با پودر پوشیده شده، سپس هنگام شکل‌دهی به این مقدار پودر اضافه می‌شود تا همواره محل تماس ابزار و ورق پوشیده از پودر باشد. در شکل 7 نحوه‌ی پوشیده شدن سطح ورق از روانکار هنگام شکل‌دهی نشان داده شده است.

3- شکل‌دهی مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر

برای بررسی میزان شکل‌پذیری ورق و به دست آوردن حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی به عنوان نماینده‌ی از حد شکل‌پذیری، روش مناسب و به صرفه استفاده از هندسه‌ی مخروطی با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر است. اگرچه می‌توان با شکل‌دهی تعدادی مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی ثابت نیز به حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی ورق دست یافت ولی تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای رسیدن به زاویه‌ی حداکثر، زیاد است. اولین بار حسین و گائو در سال 2007 از این روش برای به دست آوردن حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی ورق آلومینیومی استفاده کردند [15].

در شکل 8 ابعاد مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر که در پژوهش حاضر از آن برای بدست آوردن حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی (ϕ_{max}) که در واقع مقدار بیشترین زاویه‌ی دیواره‌ی است که در شکل‌دهی نموی می‌توان بدون پاره شدن و با یک مرحله شکل‌دهی به آن دست یافت، نشان داده شده است. ϕ_1 و ϕ_2 به ترتیب نشان دهنده‌ی زوایای ورود و خروج مخروط هستند که برابر

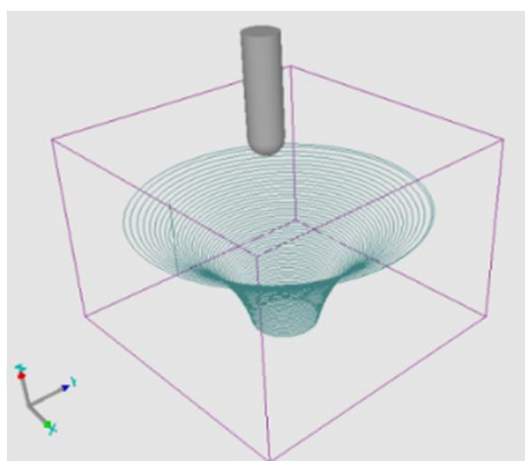
5- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی
در این بخش با توجه به طراحی آزمایش انجام شده در جدول 2 و نتایج ارائه شده در دو ستون آخر این جدول به بررسی و بحث در مورد میزان و نحوه‌ی تاثیر این پارامترها بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی پرداخته می‌شود.

5-1- اثر جریان ورودی بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی

دلیل اینکه سطوح جریان بصورت بازه‌ای بیان شده‌اند این است که در ابتدا تماس ورق و ابزار در یک سطح بسیار کوچک بوده و مقاومت الکتریکی تماسی بسیار بالا مانع از عبور جریان می‌شود، با افزایش سطح تماس ابزار و ورق مقدار جریان ورودی افزایش یافته تا به حداکثر مقدار خود برسد، اما با گرم شدن ورق و ابزار، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد و به‌تدریج مقدار جریان عبوری از مدار کاهش می‌یابد تا در یک مقدار نهایی تقریباً ثابت شود. این درحالی است که دما ابتدا شروع به افزایش کرده و پس از اینکه ابزار مقداری بیشتر از شعاع سر ابزار یعنی حدود 5 میلی‌متر، پایین می‌رود در یک مقدار نهایی تقریباً ثابت می‌شود. دمای شکل‌دهی در نمونه‌ی با بیشترین زاویه‌ی شکل‌دهی یعنی جریان در بازه‌ی 150-200 آمپر، تقریباً بین 300 تا 600 درجه‌ی سانتیگراد اندازه‌گیری شده است که حداکثر دما در همسایگی ابزار اتفاق می‌افتد (شکل 10). هنگام شکل‌دهی و با استفاده از یک دوربین دمایی مادون قرمز، شکل 10 که نشان دهنده‌ی توزیع دمای قطعه‌کار است تصویر برداری شده است.

در شکل 11 اثر مقدار جریان ورودی بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی قابل مشاهده است، با توجه به این شکل با افزایش میزان جریان ورودی، حداکثر مقدار زاویه‌ی شکل‌دهی کاهش می‌یابد، که دلیل اصلی این کاهش را می‌توان بالا رفتن بیش از حد و موضعی دمای ورق تا بیش از 700 درجه‌ی سانتیگراد در اثر عبور جریان زیاد از ورق بیان کرد. افزایش زیاد جریان و در نتیجه افزایش بیش از حد دمای ورق باعث اکسید شدن سطح ورق (سوختن سطح ورق)، سوختن پودر روانکار، سایش شدید سر ابزار، چسبیدن اکسید تیتانیوم و ناخالصی‌های موجود در پودر روانکار به سر ابزار و در نتیجه زود تر پاره شدن ورق می‌شود، قطعه‌های تولید شده در جریان‌های مختلف در شکل 12 نشان داده شده است.

در ورق با ضخامت‌های مختلف بازه‌ی جریان الکتریسیته‌ی لازم برای شکل‌دهی متفاوت است. در شکل 13 تغییر میانگین جریان الکتریسیته‌ی مورد نیاز برای شکل‌دهی ورق با سه ضخامت متفاوت، نشان داده شده است. شکل 13 نشان می‌دهد با افزایش ضخامت ورق مقدار جریان مورد نیاز برای شکل‌دهی آن افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر با افزایش ضخامت ورق حجم ماده‌ای که باید شکل‌دهی شود افزایش یافته و در نتیجه مقدار انرژی و جریان الکتریسیته‌ی بیشتری برای شکل‌دهی آن نیاز است.



شکل 9 مسیر ابزار برای شکل‌دهی مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر

پس از طراحی و ترسیم هندسه‌ی قطعه، این هندسه وارد محیط نرم‌افزار پاورمیل¹ شده و با تعیین سرعت پیشروی، گام عمودی حرکت ابزار، قطر ابزار و سرعت چرخشی سر ابزار و تعریف پرداخت بر روی سطح قطعه، مسیر ابزار استخراج شده است. پس از آن جی کد² استخراج شده به کنترلر دستگاه سی‌ان‌سی منتقل شده‌است. مسیر ابزار استخراج شده برای شکل‌دهی مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر در شکل 9 نشان داده شده است. برای بررسی اثر پارامترها، طراحی آزمایش انجام شد که شرح آن در جدول 2 آمده است. پارامترها در سطوحی با فاصله‌ی تقریباً یکسان انتخاب شده‌اند، به جز ضخامت ورق که محدودیت دسترسی به ورق باعث انتخاب این سطوح شده است. هر یک از پارامترهای نشان داده شده در جدول 2 در سه سطح تغییر می‌کنند و سایر پارامترها ثابت هستند تا بتوان اثر مستقل هر پارامتر را بررسی کرد.

4- طراحی آزمایش و پارامترهای مورد بررسی

در این پژوهش اثر پارامترهایی از قبیل گام عمودی حرکت ابزار، سرعت پیشروی، سرعت چرخشی ابزار، مقدار جریان ورودی و مقدار ضخامت اولیه بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی (ϕ_{max}) ورق Ti-6Al-4V بررسی شده است. هر یک از پارامترها دارای سه سطح می‌باشند. در جدول 1 این پارامترها و سطوح آن‌ها آمده است.

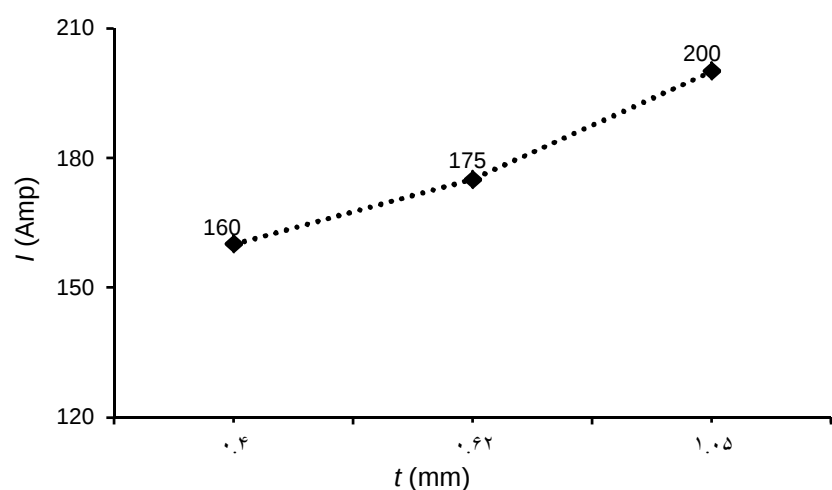
بازه‌ی تغییر جریان ورودی که پارامتری بسیار مهم است با تغییر ضخامت ورق عوض می‌شود، هرچه ضخامت ورق کمتر باشد به جریان کمتری برای شکل‌دهی آن نیاز است که این نکته هنگام انجام آزمایش‌ها و بصورت تجربی حاصل شده است، بنابراین سطوح جریان متفاوتی برای ضخامت‌های مختلف انتخاب شده تا بتوان در همه‌ی آن‌ها به دمای مشابهی رسید. در آزمایش‌های شماره‌ی 1، 2 و 3 که مربوط به ورق با ضخامت 0/62 میلی‌متر هستند، جریان الکتریسیته در سه سطح انتخاب شده و سایر پارامترها ثابت نگه داشته می‌شوند. پس از آزمایش‌های اولیه و مشاهدات تجربی در پژوهش حاضر و نیز با توجه به پژوهش‌های همکارانش [14] در سال 2013 مبنی بر اینکه جریان زیاد باعث سایش سر ابزار می‌شود، مقدار جریان در بازه‌ی 150-200 آمپر برای ورق با ضخامت 0/62 میلی‌متر، به عنوان سطح تکراری انتخاب شده است. دلیل انتخاب سطح دوم سرعت پیشروی یعنی مقدار 1200 میلی‌متر بر دقیقه بعنوان سطح تکراری در بیشتر آزمایش‌ها، کاهش زمان فرآیند و در نتیجه سریع‌تر شکل‌دهی کردن قطعات می‌باشد، به دلیلی مشابه مقدار گام عمودی حرکت ابزار نیز در سطح دوم یعنی مقدار 0/3 میلی‌متر در بیشتر آزمایش‌ها انتخاب شده است.

در ستون هفتم جدول 2 مقادیر عمق پارگی قطعه (h_c) به ازای ترکیب‌های آزمایش مختلف آمده است. با توجه به پژوهش‌های پیشین مشابه [4, 15-17]، در این‌جا نیز مقدار زاویه‌ی مربوط به این عمق پارگی، که نشان دهنده‌ی میزان شکل‌پذیری ورق می‌باشد با جایگذاری h_c و R و y_1 (شکل 8)، در رابطه‌ی (1) به دست می‌آید. مقادیر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی در ستون آخر جدول 2 آمده است. مقدار عمق پارگی قطعات، هنگام شکل‌دهی و به محض پاره‌شدن قطعه از روی کنترلر دستگاه سی‌ان‌سی خوانده و یادداشت شده است. پارگی قطعه کاملاً قابل مشاهده بوده و علاوه بر این، صدای پارگی نیز به وضوح شنیده می‌شود. جریان مدار هنگام پاره شدن ورق قطع می‌شود و این نشانه نیز برای ثبت عمق پارگی بسیار مفید است.

1- Power MILL
2- G-Code



شکل 12 قطعات تولیدی از ورق Ti-6Al-4V در جریان های الف) 250-300 آمپر
ب) 200-250 آمپر ج) 150-200 آمپر



شکل 13 جریان متوسط لازم برای شکل‌دهی ورق بر حسب ضخامت

5-2- اثر سرعت پیشروی بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی

با توجه به شکل 14 مشاهده می‌شود با تغییر سرعت از سطح 1 به سطح 2 مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی حدود 2 درصد کاهش یافته و با تغییر سرعت پیشروی از سطح 2 به سطح 3، مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی حدود 10 درصد کاهش می‌یابد، با افزایش سرعت از 600 به 1200 میلی‌متر بر دقیقه، ورق باز هم فرصت کافی برای گرم شدن دارد و بخش زیادی از ورق، دمای بالا و لازم برای شکل‌دهی را تجربه می‌کند، اما به دلیل افزایش نرخ شکل‌دهی (کرنش) و همچنین مدت زمان کمتر انتقال انرژی به ورق نسبت به سطح 1، حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی اندکی کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت از 1200 به 1800 میلی‌متر بر دقیقه، مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی با شیب بیشتری کاهش می‌یابد، این اتفاق را می‌توان به نبود فرصت کافی برای گرم شدن ورق و در نتیجه دمای پایین بخش زیادی از قطعه نسبت داد، دلیل دیگر این کاهش حد شکل‌دهی، افزایش نرخ کرنش نسبت به حالت قبل است.

5-3- اثر گام عمودی حرکت ابزار بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی

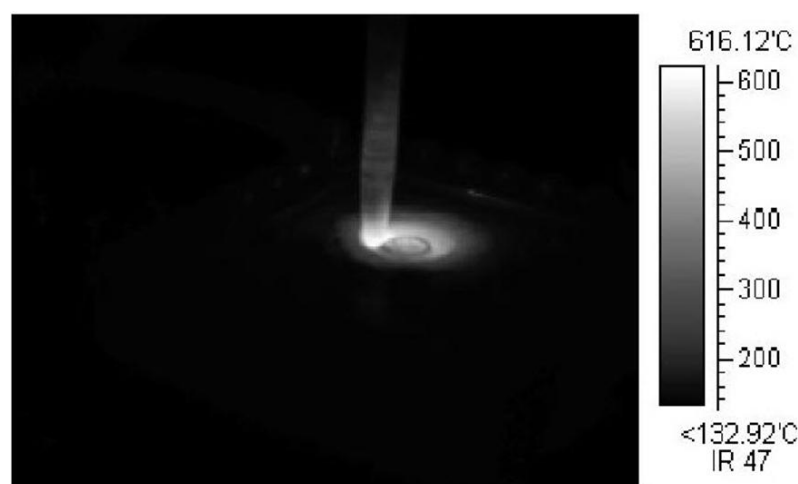
با توجه به شکل 15 با افزایش گام عمودی حرکت ابزار، مقدار حداکثر زاویه‌ی

جدول 1 پارامترهای مورد بررسی برای تعیین حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی

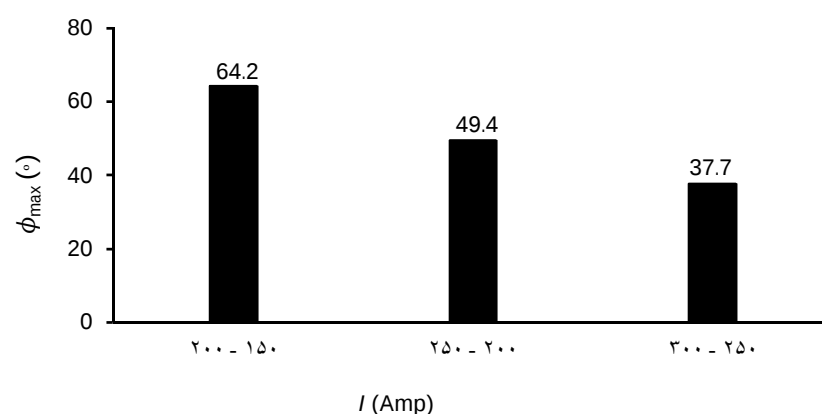
پارامتر (واحد)	نماد	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	F	600	1200	1800
گام عمودی حرکت ابزار (میلی‌متر)	P	0/1	0/3	0/5
سرعت چرخشی ابزار (دور بر دقیقه)	S	100	600	1200
ضخامت اولیه‌ی ورق (میلی-متر)	t	0/4	0/62	1/05
جریان الکتریسیته (آمپر)	I	250-300	150-200	150-200

جدول 2 طراحی آزمایش برای یافتن اثر پارامترهای مختلف بر مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی

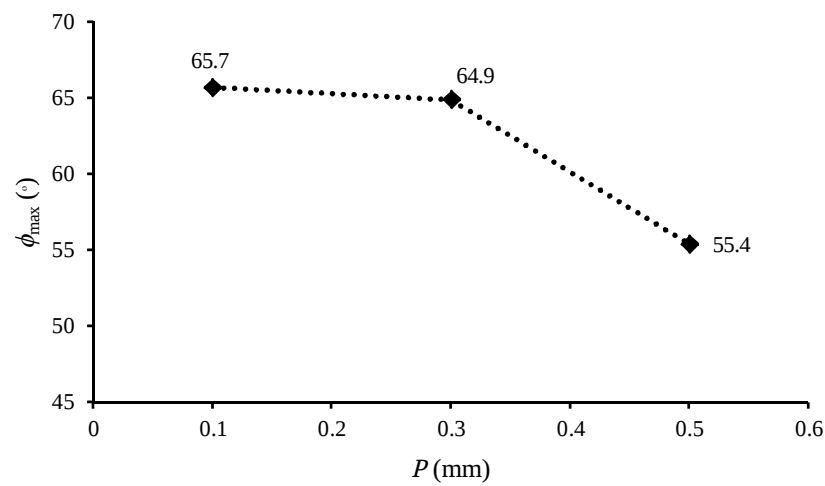
#	I (Amp)	F (mm/min)	P (mm)	S (rpm)	t (mm)	h_c (mm)	ϕ_{max}
1	250-300	1200	0/3	600	0/62	4/3	37/7
2	200-250	1200	0/3	600	0/62	8/5	49/4
3	150-200	1200	0/3	600	0/62	15/0	64/2
4	150-200	1200	0/3	100	0/62	15/3	64/9
5	150-200	1200	0/1	100	0/62	15/7	65/7
6	150-200	1200	0/5	100	0/62	11/0	55/4
7	150-200	1200	0/3	1200	0/62	14/4	62/9
8	150-200	600	0/3	100	0/62	15/8	65/9
9	150-200	600	0/1	100	0/62	16/8	68/0
10	150-200	1800	0/3	100	0/62	12/0	57/7
11	170-230	600	0/1	100	1/05	21/0	76/4
12	140-180	600	0/1	100	0/40	12/4	58/6



شکل 10 توزیع دمای قطعه کار هنگام شکل‌دهی



شکل 11 تأثیر جریان بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی در ورق با ضخامت 0/62 میلی‌متر



شکل 15 تأثیر گام عمودی حرکت ابزار بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی

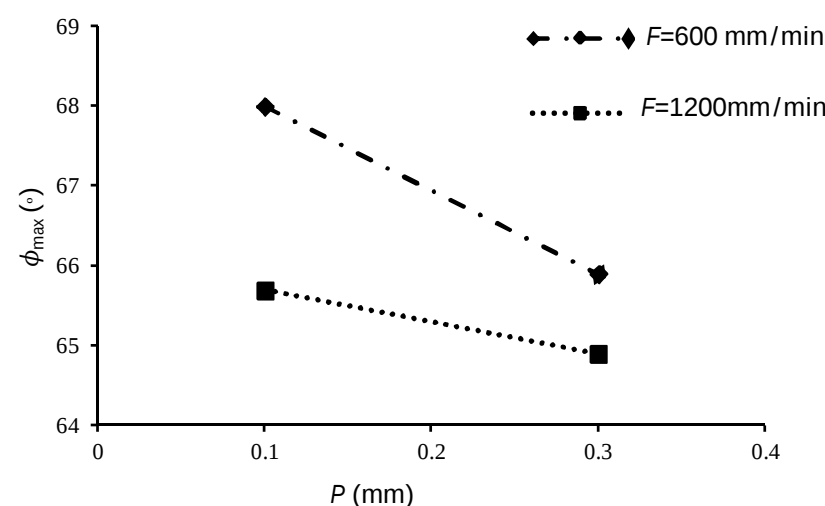
برداشته و علاوه بر این با ایجاد تمرکز تنش باعث زودتر پاره شدن ورق شود. اگر چه در کل تغییرات کمی با تغییر سطوح این پارامتر، در حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی ایجاد می‌شود.

5-5- اثر ضخامت اولیه‌ی ورق بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی

همان‌طور که در جدول 2 نشان داده شده است، در این پژوهش سه ضخامت مختلف از ورق Ti-6Al-4V مورد مطالعه قرار گرفته و حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی آن‌ها در شکل 18 مقایسه شده است. مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی با افزایش ضخامت ورق، افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار ضخامت اولیه‌ی ورق، قطعه در عمق و در نتیجه زاویه‌ی دیواره‌ی بیشتری به نازک‌شدگی لازم برای پارگی می‌رسد؛ به بیان دیگر با افزایش ضخامت اولیه، مقدار ماده بیشتری برای تغییر شکل وجود دارد و به این ترتیب سطح عمومی تنش با افزایش ضخامت ورق کاهش یافته و پارگی ورق به تأخیر می‌افتد. در شکل 19 قطعات تولیدشده با حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی از ورق با ضخامت‌های مختلف آمده است.

6- نتیجه‌گیری

با استفاده از جریان الکتریسته شکل‌دهی ورق Ti-6Al-4V بصورت تجربی بر اساس طراحی آزمایش، به منظور بررسی اثر پارامترهایی از قبیل ضخامت اولیه‌ی ورق، سرعت پیشروی ابزار، سرعت چرخشی ابزار، گام حرکت رو به پایین ابزار و مقدار جریان عبوری از مدار، بر میزان شکل‌پذیری ورق در هندسه‌ی مخروطی با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر بین 20 تا 80 درجه انجام گرفت و مقدار شکل‌پذیری از طریق اندازه‌گیری عمق قطعات تا محل پارگی حاصل شد. با افزایش ضخامت ورق، کاهش سرعت پیشروی و کاهش گام



شکل 16 تغییر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی در دو گام عمودی در سرعت‌های پیشروی مختلف

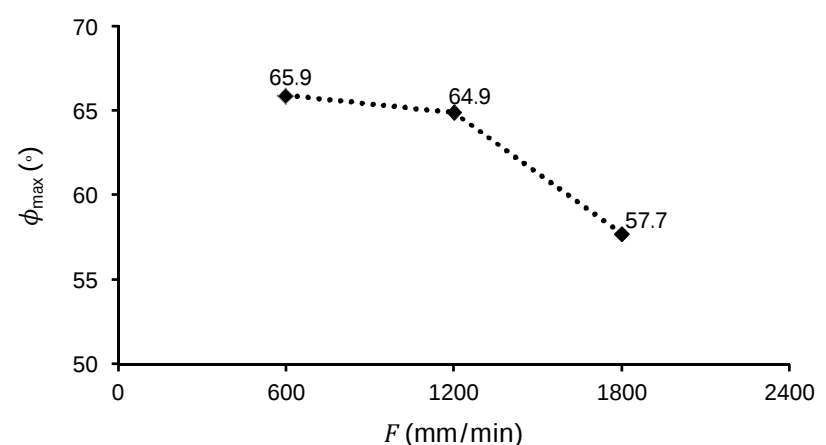
شکل‌دهی کاهش می‌یابد. افزایش گام عمودی به دو دلیل می‌تواند حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی را کاهش دهد، یکی اینکه با افزایش گام عمودی مقدار ماده‌ای که در هر گام شکل می‌گیرد افزایش یافته و باعث افزایش نیرو و تنش وارد شده به ورق می‌شود و از ماهیت نموی بودن فرآیند دورتر می‌شود. دلیل دوم کاهش حد شکل‌دهی با افزایش گام عمودی حرکت (که در شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی ورق مطرح می‌شود)، کاهش میزان حرارت لازم منتقل شده به ورق برای شکل‌دهی آن است؛ بعبارت دیگر محدوده‌ی کمتری از قطعه فرصت افزایش دما را پیدا می‌کند.

با توجه به شکل 15 مشاهده می‌شود شیب قسمت اول نمودار از شیب قسمت دوم نمودار کمتر است، این نشان می‌دهد که با افزایش گام عمودی حرکت از 0/1 به 0/3 میلی‌متر مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی مقدار بسیار کمی تغییر می‌کند و با افزایش گام به 0/5 میلی‌متر مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی به شدت و حدود 14 درصد کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار را می‌توان این‌طور بیان کرد که با افزایش گام به 0/5 میلی‌متر، ورق فرصت گرم شدن پیدا نمی‌کند و علاوه بر این مقدار ماده بیشتری نیز در هر گام نسبت به دو حالت دیگر، شکل‌دهی می‌شود و اثر هم‌زمان این دو عامل باعث کاهش بیشتر مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی نسبت به دو حالت قبل یعنی گام‌های عمودی 0/1 و 0/3 میلی‌متر می‌شود.

برای بررسی اثر گام عمودی بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی در سرعت‌های پیشروی متفاوت، نتایج آزمایش‌های 4، 5، 8 و 9 در شکل 16 مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل 16 مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی در سرعت پیشروی 600 میلی‌متر بر دقیقه نسبت به سرعت پیشروی 1200 میلی‌متر بر دقیقه، با تغییر گام عمودی از 0/1 به 0/3 میلی‌متر، کاهش محسوس‌تری دارد. شیب نمودارهای نشان داده شده در شکل 16 این موضوع را تأیید می‌کند. به بیان دیگر اثر اندازه‌ی گام عمودی در سرعت‌های کمتر بارزتر است. هرچند در کل مقدار تغییر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی با تغییر گام از 0/1 به 0/3 میلی‌متر بسیار کم است، البته مزیتی که گام بزرگ‌تر دارد زمان کمتر فرآیند است.

5-4- اثر سرعت چرخشی ابزار بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی

اثر سرعت چرخشی بر مقدار حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی، در شکل 17 نشان داده شده است. با افزایش سرعت چرخشی سر ابزار از 100 به 600 و از 600 به 1200 دور بر دقیقه، حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی به ترتیب 1 و 3 درصد کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش می‌تواند به دلیل سایش سر ابزار و افزایش اصطکاک، چسبیدن اکسید تیتانیوم و ناخالصی‌های پودر روانکار بر ابزار و عمل کردن بعنوان یک جسم برنده باشد، که لایه‌ای نازک از سطح ورق را

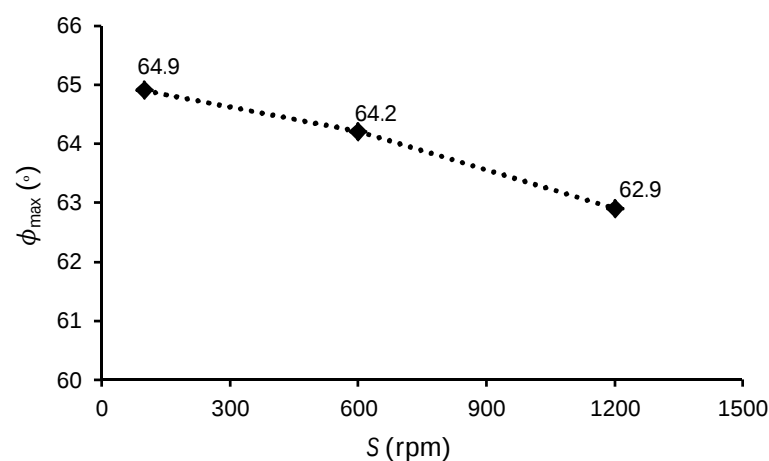


شکل 14 تأثیر سرعت پیشروی بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی

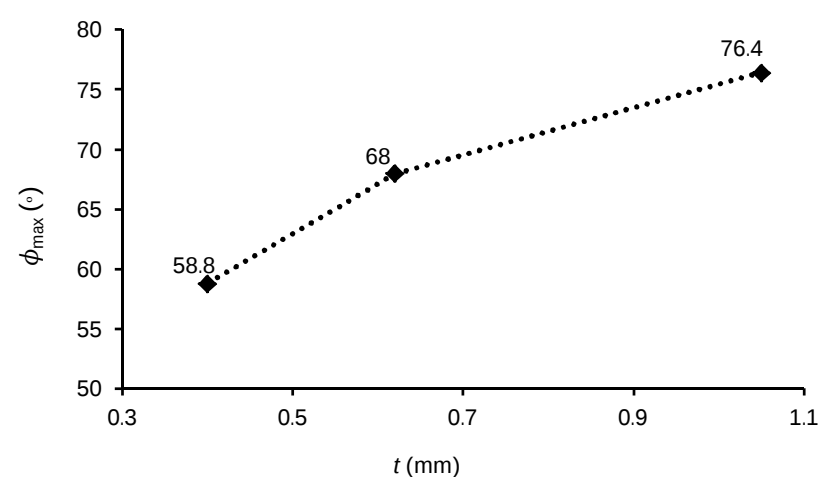
دلیل تماس مداوم با ورق و عبور جریان الکتریسته از آن اتفاق می‌افتد و اثر این دو عامل باعث می‌شود در سرعت‌های چرخشی بزرگ این برجستگی‌ها به عنوان یک جسم برنده عمل کرده و با افزایش اصطکاک، تمرکز تنش، برداشتن لایه‌ای از سطح ورق و بروز آسیب‌های موضعی باعث زودتر پاره شدن ورق شود. با افزایش ضخامت به دلیل مقدار ماده‌ی بیشتر برای شکل‌دهی و کاهش سطح عمومی تنش، پارگی به تأخیر می‌افتد؛ هرچند افزایش حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی با افزایش ضخامت ورق خطی نیست. با افزایش سرعت پیشروی از 600 به 1200 میلی‌متر بر دقیقه، شکل‌پذیری تغییر زیادی نمی‌کند و این درحالی‌است که زمان انجام فرآیند به نصف کاهش می‌یابد؛ افزایش گام عمودی از 0/1 به 0/3 نیز اثری مشابه دارد. سرعت پیشروی و گام عمودی بزرگ ابزار می‌تواند فرآیند را از ماهیت تدریجی بودن دور کرده، نرخ کرنش را افزایش داده و با کاهش میزان حرارت منتقل شده به ورق باعث کاهش شکل‌پذیری ورق شود. در سرعت‌های پیشروی کوچک‌تر اثر تغییر گام عمودی بر شکل‌پذیری بارزتر است.

7- مراجع

- [1] E. Hagan, J. Jeswiet, A review of conventional and modern single-point sheet metal forming methods, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217, No. 2, pp. 213-225, 2003 .
- [2] W. Emmens, G. Sebastiani, A. Van den Boogaard, The technology of incremental sheet forming—a brief review of the history, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 8, pp. 981-997, 2010 .
- [3] G. Fan, L. Gao, G. Hussain, Z. Wu, Electric hot incremental forming: A novel technique, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 15, pp. 1688-1692, 12//, 2008 .
- [4] G. Hussain, L. Gao, Z. Zhang, Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 9-10, pp. 920-926, 2008 .
- [5] K. Jackson, J. Allwood, The mechanics of incremental sheet forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 3, pp. 1158-1174, 2009 .
- [6] Y. Kim, J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *Journal of materials processing technology*, Vol. 130, pp. 42-46, 2002 .
- [7] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 88-114, 2005 .
- [8] E. Ceretti, C. Giardini, A. Attanasio, Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, No. 2, pp. 176-184, 2004 .
- [9] P. Martins, N. Bay, M. Skjædt, M. Silva, Theory of single point incremental forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 247-252, 2008 .
- [10] G. Ambrogio, L. Filice, G. Manco, Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 257-260, 2008 .
- [11] J. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert, H. De Baerdemaeker, Laser assisted incremental forming: formability and accuracy improvement, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 273-276, 2007 .
- [12] G. Fan, F. Sun, X. Meng, L. Gao, G. Tong, Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, No. 9-12, pp. 941-947, 2010/08/01, 2010. English
- [13] G. Ambrogio, L. Filice, F. Gagliardi, Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming, *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 501-508, 2012 .
- [14] X. Shi, L. Gao, H. Khalatbari, Y. Xu, H. Wang, L. Jin, Electric hot incremental forming of low carbon steel sheet: accuracy improvement, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, No. 1-4, pp. 241-247, 2013/09/01, 2013. English
- [15] G. Hussain, L. Gao, A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 3-4, pp. 419-435, 3//, 2007 .
- [16] M. Tisza General overview of sheet incremental forming, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 55, No. 1, pp. 113-120, 2012 .
- [17] M. Durante, A. Formisano, A. Langella, Observations on the influence of tool-sheet contact conditions on an incremental forming process, *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 20, No. 6, pp. 941-946, 2011 .



شکل 17 تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی



شکل 18 تأثیر ضخامت اولیه‌ی ورق بر حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی



شکل 19 قطعات تولیدشده با حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی از ورق Ti-6Al-4V با

ضخامت‌های الف) 1/05 میلی‌متر ب) 0/62 میلی‌متر ج) 0/4 میلی‌متر

عمودی می‌توان به حداکثر زاویه‌ی دیواره‌ی بیشتری دست یافت. جریان الکتریسیته‌ی لازم برای شکل‌دهی ورق نیز با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد و با ورود جریان بسیار زیاد به مدار، اکسید شدن سطح ورق و سایش ابزار بیش‌تر شده و حداکثر زاویه‌ی شکل‌دهی کاهش می‌یابد. اکسید تیتانیوم و ناخالصی پودر روانکار بر سطح ابزار می‌چسبند و همچنین سایش ابزار به