



امکان‌سنجی تجربی شکل‌دهی ورق‌های مسی به روش وکیوم‌فرمینگ

محسن خادم^۱، سید جلال همتی^{۲*}

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: hemmati@hormozgan.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۹ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۹ دی ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

فرآیند ترموفرمینگ

شکل‌دهی وکیوم‌فرمینگ

گرمایش القایی ورق

شکل‌دهی ورق فلزی

وکیوم‌فرمینگ یکی از فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های پلاستیکی است. این فرآیند به دلیل سادگی و سرعت تولید بالا و حذف یکی از قالب‌ها، از محبوبیت خاصی برخوردار است. ایده اصلی این تحقیق، امکان‌سنجی تعمیم فرآیند وکیوم‌فرمینگ برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی است. برای این منظور، جایگزین‌های طراحی موجود در نظر گرفته شدند. در آزمایش‌های تجربی، شکل قالب و در نتیجه قطعه‌کار، به صورت قطاعی از کره لحاظ گردید. با مقایسه نمودار تنش - کرنش پلی اتیلن ترفتالات که در وکیوم‌فرمینگ کاربرد زیادی دارد با نمودار ورق مس خالص، دمای 600°C برای این منظور انتخاب گردید. برای گرمایش قطعه‌کارها از کوره القایی فرکانس بالا استفاده شده است. همچنین، با به‌کارگیری دو جک پنوماتیک، نیروهای کمکی برای شکل‌دهی ورق اعمال شده است. در سطح ورق‌گیرها، با استفاده از ترمز کشش به صورت یک برجستگی با سطح مقطع دایره‌ای، سعی گردیده است چروکیدگی ناشی از شکل‌دهی رفع شود. در بین ضخامت‌های مختلف ورق مورد مطالعه، امکان شکل‌دهی ورق‌های مسی در محدوده 0.4 الی 0.7 میلی‌متر تا نسبت کشش کل 58% وجود دارد ولی با پیکره‌بندی فعلی بایستی ورق‌های با ضخامت کم‌تر را مورد مطالعه قرار داد.

Experimental feasibility study of forming copper sheets by vacuum forming method

Mohsen Khadem¹, Seyed Jalal Hemmati^{2*}

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

* Corresponding Author's Email: hemmati@hormozgan.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 30 December 2023

Accepted: 19 January 2024

Keywords:

Thermoforming

Vacuum Forming

Sheet Induction Heating

Sheet Metal Forming

Abstract

Vacuum forming is one of the forming processes of plastic sheets. This process is particularly popular due to its simplicity and high production speed and the removal of one of the dies. The main idea of this research is the feasibility of generalizing the vacuum forming process for forming metal sheets. For this purpose, the available design alternatives were considered. In the experimental tests, the shape of the die and, as a result, the workpiece, was considered as a sector of sphere. By comparing the stress-strain diagram of Polyethylene terephthalate, which is widely used in vacuum forming, with the diagram of pure copper sheet, the temperature of 600°C was chosen for this purpose. A high-frequency induction furnace is used for heating the workpiece. Also, by using two pneumatic jacks, auxiliary forces have been applied to form the sheet. On the surface of the blank holders, using a drawing bead in the form of a ridge with a circular cross-section, has been tried to eliminate the wrinkling caused by forming. Among the different thicknesses of the studied sheet, it is possible to form copper sheets in the range of 0.4 to 0.7mm up to a total drawing ratio of 58% still, but with the current configuration, sheets with less thickness should be studied.

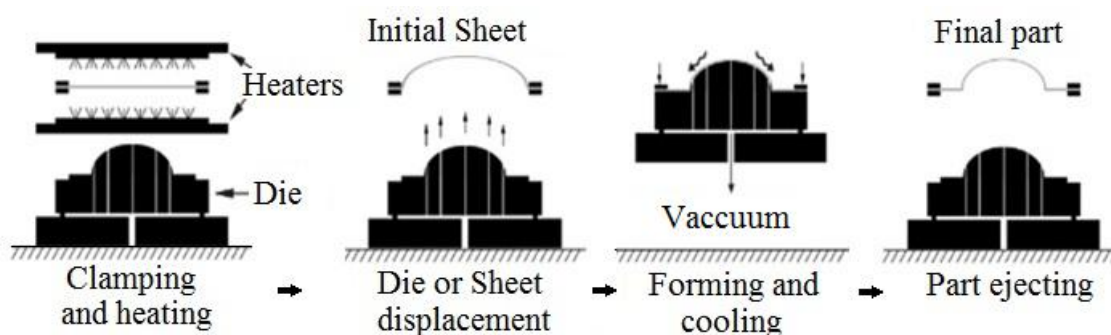
Please cite this article using:

Khadem M, Hemmati SJ. Experimental feasibility study of forming copper sheets by vacuum forming method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 October 23;10(8):11-19. doi: 10.22034/IJME.2024.432653.1892 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

وکیوم‌فرمینگ^۱ یک روش شکل‌دهی است که در آن یک ورق، حرارت داده شده و سپس با اعمال مکش، به شکل قالب تغییر شکل می‌یابد. در شکل ۱، طرح‌واره‌ای از این فرآیند نشان داده شده است [۱]. در وکیوم‌فرمینگ ترموپلاستیک‌ها، ابتدا یک ورق پلاستیکی با ضخامت یکنواخت، روی یک قاب نصب می‌شود. هنگام گرم شدن سطح صفحه پلاستیکی توسط منبع گرما، قالب نیز به آرامی به سمت بالا حرکت می‌کند و هنگامی که قالب به سطح صفحه برخورد می‌کند و بر روی قالب کشیده می‌شود، هوای به دام افتاده بین سطح قالب و ورق گیر توسط سیستم مکش، تخلیه می‌شود. با ایجاد خلأ، صفحه به تمام سطح قالب می‌چسبد و قطعه مورد نیاز شکل می‌گیرد. محصولات متنوعی، از فنجان‌های ساده تا قطعات پیچیده برای صنایع خودروسازی، هوافضا و صنایع الکترونیک تا صفحات بسیار پیچیده مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، به این روش ساخته می‌شوند.



شکل ۱ طرح‌واره‌ای از نحوه‌ی وکیوم‌فرمینگ ورق [۱]

قدمت وکیوم‌فرمینگ به سال‌های ۱۹۵۰-۱۹۳۰ میلادی برمی‌گردد [۲]. لیری^۲ با به‌کارگیری لامپ‌های گرمایی و کنترل دمای آن‌ها، به ضخامت یکنواخت نمونه‌های شکل‌دهی شده، رسید. بروند^۳ مشابه لیری، ولی با استفاده از فن بخاری و انتقال حرارت همرفت اجباری، وکیوم‌فرمینگ پلاستیک را اجرا کرد. بروکلند^۴ روی وکیوم‌فرمینگ لاستیک اسفنجی تحقیق کرد.

نام و همکاران [۳] به مدل‌سازی وکیوم‌فرمینگ به روش اجزاء محدود پرداختند و تغییرات ضخامت ورق، توزیع دما و توزیع تنش- کرنش را مطالعه کردند. در ادامه تحقیقات مشابهی توسط کالینز و همکاران [۴]، کارامانو و همکاران [۵]، کانر و همکاران [۶] و خالقی و همکاران [۷] انجام گرفت. همچنین میرزالو و همکاران [۸] به مطالعه تجربی اثرات ضخامت، زمان گرمایش و جهت اکسترود ورق ABS بر تغییرات ضخامت و انقباض حرارتی قطعه در این فرآیند پرداختند. آدیکاری و همکاران [۹-۱۰] نیز به ملاحظات طراحی در طراحی اجزاء این سامانه‌ها اشاره کردند.

غیر از گزارش سنجری و همکاران [۱۱] و پایان‌نامه [۱]، مرجع داخلی از تحقیقات روی این فرآیند برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی در دسترس نبوده است. بنابراین در این تحقیق، به‌طور تجربی به بررسی امکان‌پذیری فنی و تعیین متغیرهای مؤثر بر فرآیند پرداخته شده است.

۲- تنظیمات روش تجربی

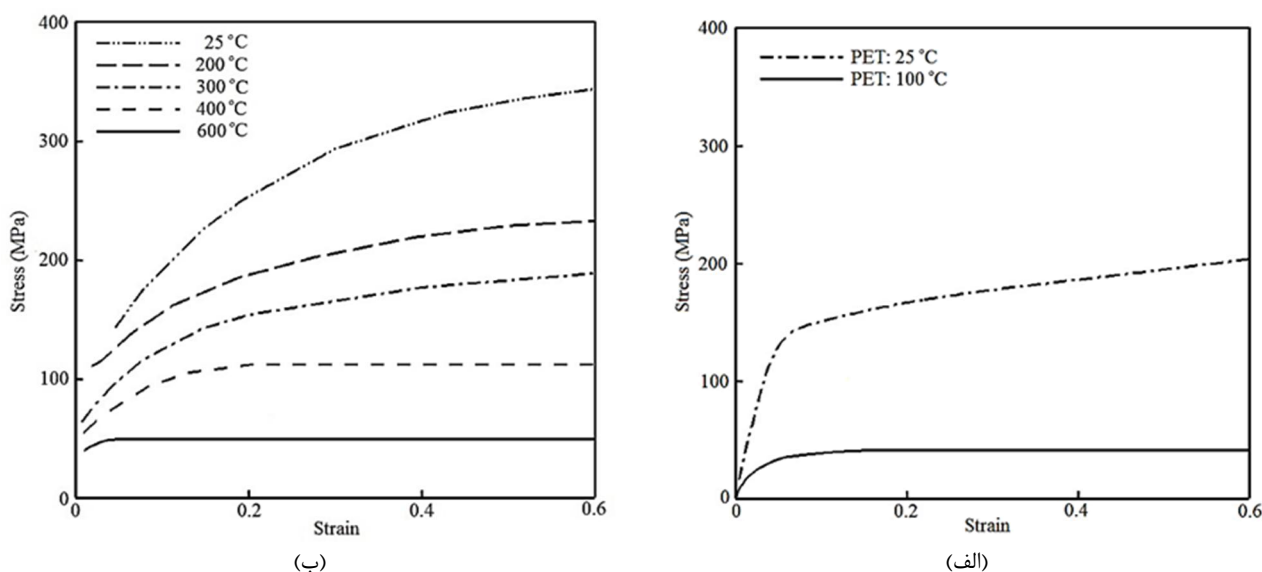
در فرآیند وکیوم‌فرمینگ ورق‌های فلزی انتظار می‌رود که با گرم کردن ورق، فلز رفتاری مشابه ترموپلاستیک از خود نشان دهد. به‌عنوان مثال، در شکل ۲ منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به پلی اتیلن ترفتالات (PET) در دمای وکیوم‌فرمینگ و مس در درجه حرارت‌های مختلف نشان داده شده است. با مقایسه این دو دسته منحنی، پیش‌بینی می‌شود مس در دمای حدود ۶۰۰°C صرفاً به لحاظ خواص مکانیکی ماکرو، قابلیت شکل‌دهی به روش وکیوم‌فرمینگ را داشته باشد.

¹ Vacuum Forming

² Leary

³ Bround

⁴ Brokland

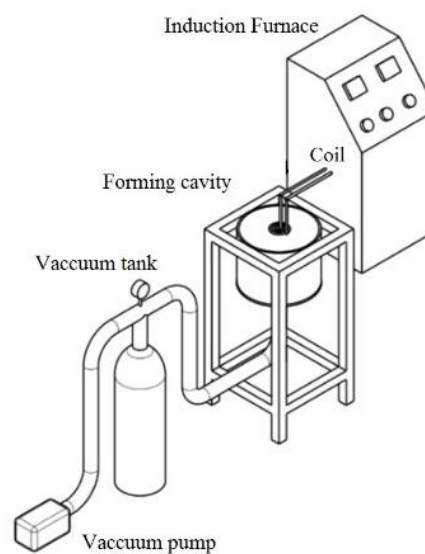


شکل ۲ الف) منحنی‌های تنش-کرنش پلی اتیلن ترفتالات [۱۲-۱۳]، ب) ورق مسی خالص در درجه حرارت‌های مختلف و نرخ کرنش شبه استاتیکی [۱]

در شکل ۳، طرح‌واره‌ای از اجزاء سامانه وکیوم‌فرمینگ بکار رفته، نشان داده شده است. اجزاء اصلی این سامانه، یک کوره القایی، یک پمپ و مخزن وکیوم و مجموعه قالب شکل‌دهی است. از یک منبع گرمایش القایی فرکانس بالا (شکل ۳-ب)، به‌عنوان منبع گرمایش استفاده شده است. کوره و کوئل توسط سامانه‌ای متشکل از یک پمپ، مخزن و رادیاتور، خنک‌کاری می‌شود (شکل ۳-ج) تا در حین فرآیند، دمای کوره و کوئل در حد دمای محیط باقی بماند. در شکل ۴، طرح‌واره‌ای از اجزاء قالب و محفظه وکیوم قبل از شکل‌دهی (نیمه سمت راست) و پس از آن (نیمه سمت چپ) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود ورق بین دو ورق‌گیر، توسط پیچ‌ها و فنرهای فشارانداز ثابت می‌شود و پس از اتمام گرمایش و شروع اعمال وکیوم، مجموعه ورق‌گیرها و ورق به سمت پایین حرکت کرده و باعث کشیده شدن ورق روی سطح کروی قالب می‌شود. دقت شده است تا حد امکان آب‌بندی لازم بین ورق‌گیرها با میله‌های راهنما و بدنه محفظه وکیوم به‌خوبی انجام شود. وجود مخزن وکیوم به تأمین ظرفیت مکش هوای مجموعه کمک می‌کند.



(ب)

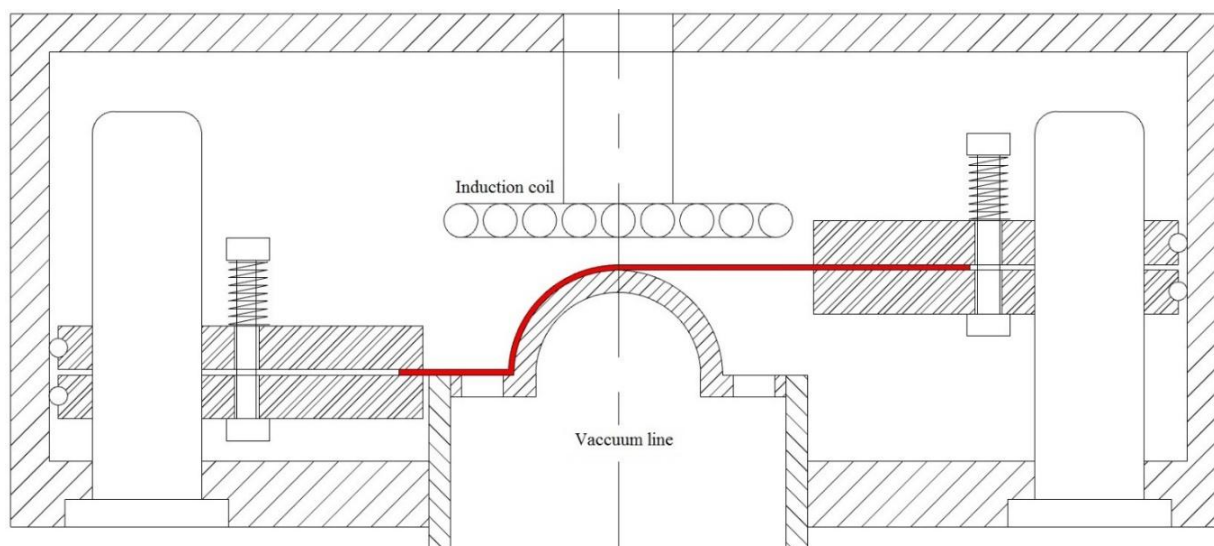


(الف)



(ج)

شکل ۳ الف) طرح‌واره‌ای از سامانه وکیوم‌فرمینگ مورد مطالعه تجربی، ب) نمایی از کوره القایی فرکانس بالای به کاررفته در این تحقیق و ج) سامانه خنک‌کاری کوره و کویل



شکل ۴ طرح‌واره‌ای از اجزاء قالب و محفظه وکیوم

ترکیب شیمیایی نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق، در جدول ۱ گزارش شده است. ضخامت‌های مختلفی از ورق، مورد آزمایش قرار گرفته است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق‌های مسی مورد مطالعه [۱۰]

Sn	Zn	Pb	Fe	Ni	Al	P	Mn
None	None	0.002	0.01	0.003	0.005	0.002	Trace
S	Bi	Sb	Mg	As	Co	Sb	Si
0.001	None	None	None	None	Trace	None	0.20

از جمله مزایای گرمایش القایی، سرعت گرمایش، تکرارپذیری و کنترل‌پذیری آن است. درجه حرارت قطعه‌کار با نرخ چند ده درجه‌ی سانتی‌گراد از دمای اتاق، افزایش یافته و می‌توان با تنظیم جریان، تحت ولتاژ و فرکانس ثابت، گرمایش را کنترل شده، تکرار کرد. هم‌چنین با استفاده از کویل‌های حلقوی می‌توان از مزایای گرمایش گرادینانی ورق بهره برد به طوری که در یک زمان مشخص،

دمای محیط خارجی ورق از دمای مرکز آن بسیار بیشتر است و به این ترتیب با جابه‌جایی بیش‌تر مواد در محیط بیرونی ورق، هماهنگی بیش‌تری وجود خواهد داشت. یکی از ملاحظات طراحی فرآیند، طراحی و تأمین منبع تغذیه لازم برای کوره گرمایش القایی است. هرگاه عمق نفوذ جریان (ضخامتی که در آن جریان القایی به حدود ۶۰ درصد حداکثر جریان اولیه در سطح ورق می‌رسد [۱۲]) به اندازه ضخامت ورق در نظر گرفته شود به‌طوری‌که سایر اجزاء واقع در زیر ورق از جمله قالب گرم نشوند فرکانس مورد نیاز دست‌گاه می‌تواند بر اساس ضخامت ورق و عمق نفوذ مورد نیاز، متغیر باشد. کوره به کار رفته در این تحقیق، دارای فرکانس ثابت ۳۰ کیلوهرتز و توان ۸۰ کیلووات است. نمایشگرهای جریان و فرکانس روی ماشین قادر به نمایش این کمیات در حین فرآیند هستند. از کویل‌های حلقوی و پن‌کیکی (شکل ۵) در این تحقیق استفاده شده است.

سطح موضع القاء طبق شکل ۶، دایره‌ای به قطر حدوداً ۱۰۰ میلی‌متر و قطر خارجی کویل پن‌کیکی برای این حالت حدوداً ۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قبل از انجام عملیات وکیوم‌فرمینگ، برای مشخص کردن دمای مورد نیاز عملیات، آزمون زمان-درجه حرارت ورق انجام گرفته است. در این آزمون قطعه‌کار، خارج از مجموعه قالب، روی یک جک پایه‌دار تنظیم شده و از سمت مخالف گرمایش، در بازه‌های زمانی معین درجه حرارت آن توسط دماسنج لیزری اندازه‌گیری شده است. بعد از به دست آمدن تقریبی جدول زمانی رسیدن به درجه حرارت ۶۰۰°C برای ضخامت‌های مختلف ورق، از این مقادیر به‌عنوان مقدار اولیه در آزمون‌های شکل‌دهی استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به این‌که در این تحقیق امکان استفاده از متمرکزکننده‌ی میدان الکترومغناطیسی دور کویل وجود نداشت عملاً بخشی از انرژی تولیدی صرف گرم کردن ناخواسته سایر اجزا قالب شده است و طبیعتاً زمان انجام فرایند شکل‌دهی بیش از مقدار اولیه فوق‌الذکر بوده است. برای انجام فرآیند شکل‌دهی، قطعه‌کار بین دو ورق‌گیر قرار داده می‌شود و توسط پیچ‌ها و فنرهای فشارانداز بین آن‌ها، ثابت می‌شود. پیچ‌ها توسط یک ترک‌متر در حد ۳ نیوتن‌متر محکم می‌شدند.



(ب)

(الف)

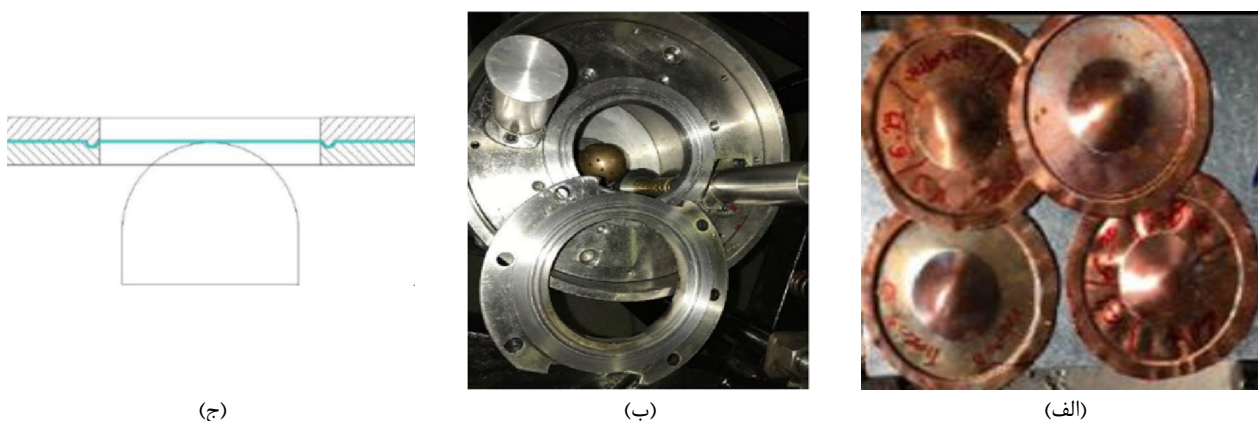
شکل ۵ دو نوع از کویل‌های مورد استفاده در این تحقیق [۱۲] (الف) کویل پن‌کیکی، (ب) کویل حلقوی



شکل ۶ نمایی از قطعه‌کار در مجموعه قالب و محفظه وکیوم

۳- نتایج و بحث

در شکل ۷-الف، تصویر تعدادی از نمونه‌های آزمایش شکل‌دهی شده ملاحظه می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد در آزمایش‌های اولیه، ورق توسط پیچ‌ها و فنرهای فشارانداز، بین ورق‌گیرها نگه داشته می‌شد ولی طبق نمونه پایینی سمت راست در شکل ۷-الف، نمونه‌ها دچار چروکیدگی می‌شدند. برای رفع چروکیدگی از ترمز کشش با سطح مقطع دایره‌ای به قطر $2/5$ میلی‌متر استفاده شد. در شکل ۷-ب و شکل ۷-ج، نمایی از ورق‌گیرهای اصلاح شده و وضعیت ورق و ورق‌گیرها قبل از شکل‌دهی، نشان داده شده است. برای جبران نیروی لازم برای رفع خمیدگی مضاعف ورق بین ورق‌گیرها در این حالت، از دو جک پنوماتیکی تحت فشار حدوداً 10 بار استفاده شد (شکل ۸). با این تغییر انتظار می‌رود فرآیند شکل‌دهی کششی به کمک وکیوم‌فرمینگ آمده و شکل‌دهی کامل و بدون چروک باشد.



شکل ۷ الف) چهار نمونه از ورق‌ها پس از شکل‌دهی، ب) نمایی از ورق‌گیرهای اصلاح شده دارای ترمز کشش و ج) نمایی از ورق‌گیرها



شکل ۸ موقعیت جک‌های پنوماتیکی فشارانداز

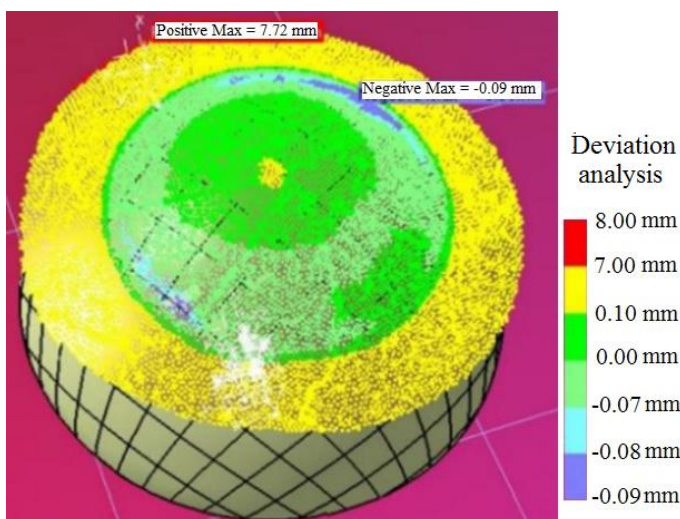
شکل ۹، تعدادی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد که قبل و بعد از اعمال ترمز کشش به ورق‌گیرها، دچار پارگی شده‌اند. یکی از دلایل این پارگی می‌تواند بالاتر رفتن دمای قطعه از حد لازم باشد. زمان گرم‌کاری اولیه برای نمونه‌های مسی از ضخامت $0/4$ میلی‌متر، حدوداً 60 ثانیه بود که خارج از محفظه وکیوم و بدون تماس با ورق‌گیرها، اندازه‌گیری شده بود. با گرمایش ناخواسته سایر اجزاء قالب غیر از ورق و همچنین با افزایش ضخامت ورق بایستی زمان گرمایش افزایش می‌یافت تا ورق‌های مسی، به دمای 600 درجه سانتی‌گراد هدف‌گذاری شده، برسند. برای این منظور زمان تا حدود 150 ثانیه افزایش داده شد که با مواجه شدن با پارگی قطعات، این مقدار به حدوداً 90 ثانیه کاهش داده شد. نکته لازم به ذکر این‌که، اندازه‌گیری درجه حرارت با دماسنج لیزری در مجاورت میدان الکترومغناطیسی کوره، به دلیل گرم شدن اجزاء داخلی دماسنج و احتمال خرابی آن، از نزدیک قابل انجام نیست و با توجه به نرخ

گرمایش بالای این فرآیند به‌تر است از یک دوربین حرارت‌نگار مناسب استفاده کرد که در این تحقیق در دسترس نبود. یکی از مشکلات گرمایش نمونه‌های مسی با کویل پن‌کیکی، حساسیت زیاد فرآیند به فاصله کویل تا سطح ورق است که بایستی ثابت بوده و در صورت اعوجاج سطح کویل یا ورق، گرمایش یکنواخت مختل خواهد شد. به این دلیل، به‌جای کویل پن‌کیکی از یک کویل حلقوی با سه حلقه فعال استفاده شد. یکی دیگر از مشکلات، اکسیداسیون شدید سطح نمونه‌ها در حین گرمایش است.



شکل ۹ نمونه‌هایی با عیب پارگی

پس از اتمام آزمون‌ها، قالب‌ها و قطعات نمونه توسط سامانه اسکنر COMET5 تحت اسکن سه‌بعدی قرار گرفتند و شکل قالب و ابر نقاط اسکن در برنامه CAD بررسی ابعادی شدند (شکل ۱۰). انتظار می‌رود شکل نهایی قطعات، نیم‌کره باشد اما همان‌طور که از شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود بخشی از مقطع نمونه به شکل کره و مابقی غیرکروی و خطی است. در شکل ۱۲، مقایسه‌ای بین مقطع مورد نظر و مقطع واقعی انجام‌گرفته است. حتی با کاهش قطر کره‌ی قالب به ۲۰ میلی‌متر و در نتیجه افزایش نسبت سطح شکل‌دهی به سطح ورق اولیه، برای نازک‌ترین ورق مسی (۰/۴ میلی‌متر) عمق کل شکل‌دهی از ۵۸٪ بیش‌تر نمی‌شود. هم‌چنین حالتی که در ابتدای فرایند وکیوم‌فرمینگ پلاستیک‌ها دیده می‌شود و در آستانه وکیوم، ورق شروع به شکم دادن می‌کند برای ورق‌های مسی اتفاق نیفتاد.

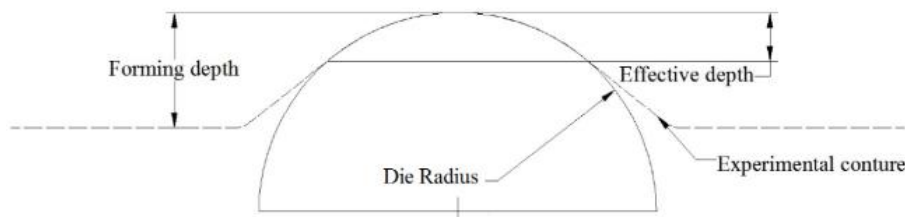


(ب)

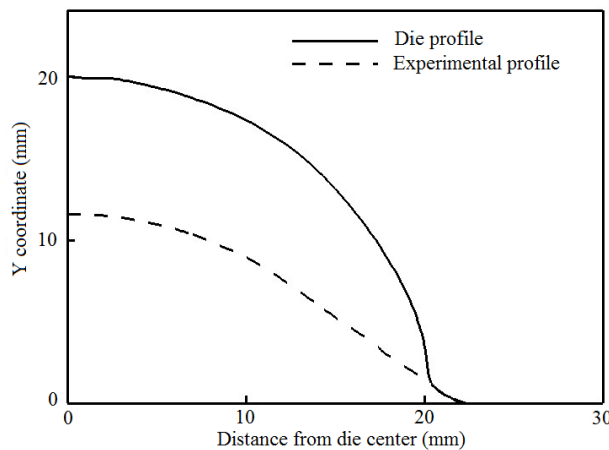


(الف)

شکل ۱۰ الف) تصویری از ورق‌های شکل داده شده در حال اسکن و ب) مدل سطحی برازش شده در نرم‌افزار CAD



شکل ۱۱ وضعیت نهایی سطح داخلی ورق در انتهای فرآیند نسبت به قالب



شکل ۱۲ مقایسه مقطع واقعی و مطلوب پس از فرآیند ارائه شده

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به امکان‌سنجی شکل‌دهی ورق‌های مسی به روش وکیوم‌فرمینگ پرداخته شد. از نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه‌گیری کرد که:

- ۱- برای شکل‌دهی ورق‌های با ضخامت ۰/۴ تا ۰/۷ میلی‌متر، با پیکره‌بندی و تنظیمات پیش‌گفته، تنها تا ۵۸٪ در نسبت سطح شکل‌دهی به سطح اولیه‌ی ۵٪ و برای ورق‌های ۰/۴ میلی‌متر، امکان اعمال تغییر شکل وجود دارد. ترکیب دمای ورق و نیروهای شکل‌دهی در کنار سایر تنظیمات قالب و فرآیند، امکان تغییر شکل کامل را به ورق نمی‌دهد؛
- ۲- پیش‌بینی می‌شود برای حصول نتیجه مناسب، کاهش ضخامت ورق، گرمایش مقاومتی ورق به‌جای گرمایش القایی با نرخ گرمایش کم‌تر، ایجاد تماس خطی بین ورق‌گیرها با ورق و استفاده از فنرهای فشارانداز قوی‌تر در حضور جک‌های پنوماتیکی یا هیدرولیکی از جمله راه‌کارهای مناسب برای شکل‌دهی مؤثر باشند؛
- ۳- در این فرآیند کنترل دمای ورق در حین گرمایش مهم است. از طرفی به‌دلیل کاربرد گرمایش القایی، به وسایل اندازه‌گیری خاصی مانند دوربین‌های حرارت‌نگار نیاز است؛
- ۴- استفاده از مواد متمرکزکننده میدان مغناطیسی و عدم پراکندگی میدان و در نتیجه عدم گرمایش ناخواسته سایر اجزاء سامانه نیز حائز اهمیت است. با کاربرد متمرکزکننده، علاوه بر کاهش زمان تولید، آلودگی مغناطیسی فرآیند نیز کاهش خواهد یافت.

References

- [1] Khadem M. Experimental study of the feasibility of forming copper sheets by vacuum forming method [thesis]. Bandar Abbas, IRAN :university of Hormozgan; 2018. [In Persian]
- [2] Rosen SR. A History of the growth of thermoforming industry. PLASTIMACH CORP., 2023.
- [3] Nam G, Ahu K, Lee J. Three-dimensional simulation of thermoforming process and its comparison with experiments. Polymer Engineering and Science. 2000;40(10):2232-40. doi: 10.1002/pen.11355

- [4] Collins P, Harkin-Jones E, Martin P. The role of tool/sheet contact in plug-assisted thermoforming. *International polymer Processing*. 2002;17(4):361-69. doi: [10.3139/217.1702](https://doi.org/10.3139/217.1702)
- [5] Karamanou M, Warby M, Whiteman J. Computational modelling of thermoforming processes in the case of finite viscoelastic materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2006;195:5220-38. doi: [10.1016/j.cma.2005.10.029](https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.10.029)
- [6] Connor CO, Martina P, Sweeney J, Menary G, Caton-Rose P, Spencer P. Simulation of the plug-assisted thermoforming of polypropylene using a large strain thermally coupled constitutive model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013;213:1588-600. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2013.02.001](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.02.001)
- [7] khaleghi M, Mashayekhi M, Mosadegh P. Modeling of the thermoforming process of high impact polystyrene. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2015;2(2):31-8. [In Persian]
- [8] Mirzaloo Y, Saraeian P., Shakouri E, Najafi M. Experimental investigation on the effect of thickness, heating time and extrude direction on thermal shrinkage and thickness variations ABS sheet in vacuum forming process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020;7(8):1-9. [In Persian]
- [9] Adhikari N, Gautam S, Timilsina N, Kaphle S, Shrestha P. Design and simulation of components of vacuum forming machine. 2021. doi: [10.13140/RG.2.2.25387.67369](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25387.67369)
- [10] Adhikari N, Timilsina N, Gautam S, Kaphle S, Shrestha P. Design and simulation of components of vacuum forming machine using household vacuum cleaner. *Journal of Engineering Issues and Solutions*. 2021;1:138-57. doi: [10.3126/joeis.v1i1.36834](https://doi.org/10.3126/joeis.v1i1.36834)
- [11] Sanjari M, Amini S, Moradi M. Introducing and expressing the experimental results obtained from the method of forming copper, aluminum and stainless-steel metal sheets by vacuum method. 5th National Conference of Metals and Materials Forming (MATFORM05); 2011 October 12; Sharif university, Tehran, IRAN: 2011. [In Persian]
- [12] Gupta S, Sharma K, Saxena NS. Temperature Dependent Mechanical Analysis of Chalcogenide (CdS, ZnS) Coated PET Films. *ISRN Polymer Science*. 2013;(2-3). doi: [10.1155/2013/952612](https://doi.org/10.1155/2013/952612)
- [13] Garnier G, Chehab B, Yrieix B, Fladin L. On the essential work of fracture in polymer-metal multilayers. *Journal of Material Science*. 2009;44(20):5537-43. doi: [10.1007/510853-009-3775-2](https://doi.org/10.1007/510853-009-3775-2)
- [14] Rudnev V, Loveless D, Cook RS. *Handbook of induction heating*. Second edition, CRC Press; 2017