مجله مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1393، دوره 14، شماره 11، ص‌ص 68-76

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی و ساخت ابزار شکل‌دهی مرتعش به منظور توسعه فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی به کمک ارتعاش اولتراسونیک

مهدی وحدتی[1]، رمضانعلی مهدوی‌نژاد[2*]، سعید امینی[3]، امیر عبدالله[4]، کارن ابری‌نیا[5]

1- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
4- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
5- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی 515- 14395، mahdavin@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 اسفند 1392
پذیرش: 09 اردیبهشت 1393
ارائه در سایت: 06 مهر 1393

کلید واژگان:
شکل‌دهی تدریجی
ارتعاش اولتراسونیک
تحلیل مودال
نیروی شکل‌دهی
برگشت فنری

چکیده

مکانیزم فرایند شکل‌دهی تدریجی بر اساس تغییرشکل پلاستیکی و موضعی ورق فلزی، است. در این فرایند، ورق فلزی با استفاده از ابزار سَرنیمکروی واقع بر روی اسپیندل ماشین فرز CNC و مطابق مسیر تعریف شده، شکل‌دهی خواهد شد. مطالعه رفتار نیروی اِعمالی به ابزار شکل‌دهی، به عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات تحقیقاتی در این فرایند است. افزایش اندازه گام عمودی ابزار، قطر ابزار، زاویه دیواره و ضخامت ورق به همراه کاربرد ورق‌های فلزی و آلیاژی سبک وزن با استحکام بالا، منجر به افزایش نیروی اِعمالی به ابزار شکل‌دهی، خواهد شد. در این مقاله، روند طراحی، ساخت و تست ابزار شکل‌دهی مرتعش به منظور توسعه فرایند "شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی به کمک ارتعاش اولتراسونیک"، ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل مودال و آنالیز تجربی فرکانس طبیعی ابزار مرتعش، مؤید ظهور مود طولی ارتعاش و وقوع پدیده رزونانس در ابزار شکل‌دهی، است. در ادامه، تأثیر اِعمال ارتعاش اولتراسونیک بر مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی و پدیده برگشت فنری، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی حاصل از آزمون شیار مستقیم بر روی ورق فلزی Al 1050-O، نشان داد که انتقال و اِعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار شکل‌دهی در مقایسه با فرایند متداول شکل‌دهی تدریجی، موجب کاهش میانگین نیروی اِعمالی به محور ابزار شکل‌دهی و کاهش میزان برگشت فنری نمونه شکل‌دهی شده، خواهد شد.

Design and manufacture of vibratory forming tool to develop “ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming” process

Mehdi Vahdati[1], Ramezanali Mahdavinejad[2*], Saeid Amini[3], Amir Abdullah[4], Karen Abrinia[5]

1, 2, 5- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
4- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 14395- 515 Tehran, Iran, mahdavin@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 March 2014
Accepted 29 April 2014
Available Online 28 September 2014

Keywords:
Incremental Forming
Ultrasonic Vibration
Modal Analysis
Forming Force
Spring-Back

ABSTRACT

Incremental Sheet Metal Forming (ISMF) is based on localized plastic deformation. In this process, a hemispherical-head tool, controlled by a CNC milling machine, shapes a sheet metal according to a defined path. Study of the forming force is one of the most important topics in this process. Increasing of vertical step size, tool diameter, wall angle and sheet thickness together with using of high strength sheet metals and lightweight alloys, leads to an increase in the forming force. In this paper, the performance of a novel forming process, named Ultrasonic Vibration assisted Incremental Sheet Metal Forming (UVaISMF) has been investigated. The procedure of design, manufacture and test of vibratory forming tool, is presented. The occurrence of longitudinal mode and resonance phenomenon has been confirmed by the results of modal analysis and experimental test. Furthermore, the effect of ultrasonic vibration on the vertical component of forming force and spring-back has been studied. Aluminium sheet of grade Al 1050-O is used as a work material. Experimental results obtained from straight groove test, indicate that ultrasonic excitation of forming tool, will reduce the average of vertical component of forming force and spring-back in comparison to conventional process.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، صنایع مرتبط با شکل‌دهی ورق‌های فلزی به منظور تولید محصول در حجم کوچک، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش انعطاف‌پذیری فرایند برای ساخت هندسه‌های پیچیده، وارد عرصه رقابتی شده‌اند. بنابراین فرایندهای متداول شکل‌دهی ورق فلزی به علت هزینه بالای تجهیزات، افزایش زمان لازم برای تنظیمات و ساخت قالب، برای نمونه‌سازی سریع و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Vahdati, R. Mahdavinejad, S. Amini, A. Abdullah, K. Abrinia, Design and manufacture of vibratory forming tool to develop “ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming” process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 68-76, 2014 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.5.4]

همچنین تولید نمونه با هندسه پیچیده، صرفه اقتصادی نخواهند داشت. بدین منظور، فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی (ISMF)[1] به عنوان روشی نوین برای نمونه‌سازی سریع و ساخت محصولات از ورق فلزی در حجم کوچک، معرفی شد [1،2]. مکانیزم این فرایند بر اساس تغییرشکل پلاستیکی و موضعی ورق فلزی، است و در طی آن، ورق فلزی با استفاده از ابزار سَرنیمکروی واقع بر روی اسپیندل ماشین فرز CNC و مطابق مسیر تعریف شده، شکل‌دهی خواهد شد [3].

فرایند ISMF شامل دو زیر مجموعه است: فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای[2] (SPIF) و فرایند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای[3] (TPIF) [4]. در فرایند SPIF، هیچ‌گونه قالبی در زیر ورق به عنوان پشتیبان استفاده نمی‌شود [5]. در صورتی که در فرایند TPIF، ورق فلزی، توسط بخشی از یک قالب یا قالب کامل، پشتیبانی شده است و حرکت عمودی نگه‌دارنده ورق به همراه گام‌های حرکتی ابزار، ورق را شکل‌دهی می‌کند [6،7].

بسیاری از تحقیقات انجام شده در فرایند ISMF بر استفاده از ابزار صلب متمرکز شده‌اند. با این وجود، جایگزین‌های دیگری برای ابزار صلب، همچون استفاده از لیزر [8،9] و واترجِت[4] با سرعت بالا [10،11] نیز مطرح شده‌اند.

مطالعه رفتار نیروی اِعمالی به ابزار شکل‌دهی در فرایند ISMF به عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات تحقیقاتی در این فرایند است [12،13]. افزایش اندازه گام عمودی ابزار، قطر ابزار، زاویه دیواره و ضخامت ورق به همراه کاربرد ورق‌های فلزی و آلیاژی سبک وزن با استحکام بالا، منجر به افزایش نیروی اِعمالی به ابزار شکل‌دهی در این فرایند، خواهد شد.

از سوی دیگر، تأثیر سودمند انرژی اولتراسونیک بر روی رفتار تغییرشکل فلزات و آلیاژها به ویژه در ارتباط با کاهش نیروی شکل‌دهی، توسط محققان، مورد تأیید قرار گرفته است. تحقیقات انجام شده در ارتباط با تأثیر انرژی اولتراسونیک با فرکانس بالا در طی تست‌های کشش و فشار فلزات مختلف [14-16] نشان داد که به‌کارگیری انرژی اولتراسونیک در طی تغییرشکل نمونه، استحکام تسلیم جنس ماده را کاهش می‌دهد.

پدیده نرم‌شدگی جنس ماده، توسط بِلاها و لانگِنکر [14] گزارش شد. این پدیده غالباً به "تأثیر بلاها" یا " تأثیر حجمی"[5] و یا "تأثیر آکوستوپلاستیک" نیز شناخته می‌شود [17-19]. این تأثیر به صورت کاهش تنش تسلیم در طی تغییرشکل پلاستیک با نرخ کرنش ثابت و یا افزایش نرخ کرنش در طی تغییرشکل پلاستیک تحت تنش ثابت، تعریف شده است. یافته‌های بلاها و لانگنکر، نشان می‌دهد که تغییر خواص مکانیکی در حین تست کشش با تحریک اولتراسونیک، به علت فعال‌سازی نابجایی‌ها می‌باشد. به‌گونه‌ای که ارتعاش اولتراسونیک ترجیحاً در مواضع نابجایی‌ها جذب می‌شود و با فعال‌سازی آن‌ها، نیروهای شکل‌دهی کاهش خواهد یافت.

در ابتدا، تصور بر این بود که فعال‌سازی نابجایی‌ها در اثر وقوع پدیده رزونانس در نابجایی‌ها، اتفاق می‌افتد. این در حالیست که فرکانس طبیعی نابجایی‌ها در حدود 100 مگاهرتز تخمین زده شده است [20] و بنابراین انتقال انرژی ارتعاشی نمی‌تواند بر اساس پدیده رزونانس نابجایی‌ها، توضیح داده شود. گروه دیگری از محققان [21] دریافتند که فعال‌سازی نابجایی‌ها و در نتیجه کاهش نیروهای شکل‌دهی، ناشی از برهم‌نهی تنش‌های نوسانی و استاتیکی است.

گرین [22] آزمایش‌هایی بر روی مواد مختلف به منظور مطالعه تأثیر به کارگیری انرژی اولتراسونیک در حین تغییرشکل، انجام داد که در طی آن تأثیرات نرم شدگی صوتی[6] جنس ماده مشاهده شد و نتیجه گرفت که کاهش استحکام تسلیم، متناسب با شدت انرژی اولتراسونیک مورد استفاده است.

جیما و همکاران [23] آزمایش‌هایی بر روی فرایندهای کشش عمیق به کمک اولتراسونیک انجام دادند و دریافتند که انرژی اولتراسونیک نه تنها باعث کاهش نیروی کشش می‌شود، بلکه نسبت حد کشش (LDR)[7] را نیز افزایش می‌دهد. تِسوجینو و همکاران [24] گزارش دادند که در فرایند خم‌کاری به کمک اولتراسونیک، به‌کارگیری ابزار و قالب مرتعش موجب کاهش برگشت فنری، افزایش زاویه خم و کاهش زبری سطح نمونه می‌شود.

مطالعات تجربی بر روی فرایند کشش لوله فلزی به کمک اولتراسونیک، توسط اینو [25] به انجام رسید و نتیجه گرفت که هیچ‌گونه کاهش قابل ملاحظه‌ای در نیروی کشش لوله‌های ضخیم فولادی، مشاهده نمی‌شود. با این وجود، میزان تخریب در ورودی قالب کاهش می‌یابد و زبری سطح و طول عمر قالب، بهبود پیدا خواهد کرد. موراکاوا و همکاران [26،27] مطالعات تجربی بر روی فرایند کشش سیم با به‌کارگیری ارتعاش اولتراسونیک در هر دو جهت شعاعی و محوری، انجام دادند. آن‌ها دریافتند که ارتعاش شعاعی در مقایسه با ارتعاش محوری در کاهش نیروی کشش و افزایش سرعت کشش، مؤثرتر است. تأثیر انرژی اولتراسونیک بر روی فرایند کشش سیم درمقیاس میکرو، توسط سیگِرت و همکاران [28،29] مطالعه شد. آن‌ها دریافتند که با اِعمال ارتعاش اولتراسونیک، زبری سطح نمونه کاهش می‌یابد و با جدایش سطوح میان قالب و نمونه، شرایط روانکاری، بهبود می‌یابد. همچنین، کاهش نیروی کشش تابعی از دامنه ارتعاش است.

مطالعات عددی و تجربی بر روی فرایند پرس با استفاده از تحریک اولتراسونیک ماتریس، توسط آشیدا و اویاما [30] به انجام رسید. آن‌ها دریافتند که با استفاده از این انرژی می‌توان از وقوع چروکیدگی و تَرَک در نمونه‌های شکل‌دهی شده، جلوگیری به عمل آورد. نتایج نشان دادند که این امر به علت کاهش نیروی اصطکاک میان ورق فلزی و ماتریس است. رسولی و همکاران [31]، تأثیر ارتعاش طولی اولتراسونیک بر روی فرایند اسپینینگ[8] لوله را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجربی نشان داد که ارتعاش اولتراسونیک با توان بالا می‌تواند بر کاهش 4 تا 13 درصدی نیروی شعاعی تأثیرگذار باشد. همچنین تحلیل تغییرات نیروهای شکل‌دهی تحت تأثیر ارتعاش اولتراسونیک نشان داد که این تغییرات غالباً ناشی از تأثیرات تماسی ارتعاش اولتراسونیک است.

بنابراین کاهش استحکام تسلیم و نرم‌شدگی صوتی جنس ماده، کاهش نیروی اصطکاک، کاهش نیروی شکل‌دهی و بهبود مشخصه‌های کیفی نمونه شکل‌دهی شده را می‌توان به عنوان بخشی از تأثیرات مثبت اِعمال ارتعاش اولتراسونیک در فرایندهای گوناگون شکل‌دهی نام برد.

از این رو در مقاله پیش رو، روند طراحی، ساخت و تست ابزار شکل‌دهی مرتعش برای اولین بار در حوزه‌ی فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی، مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، توسعه‌ی فرایند (UVaISMF)[9] و بهره‌گیری از تأثیر مثبت ارتعاش اولتراسونیک بر رفتار نیروی اِعمالی به ابزار شکل‌دهی و پدیده برگشت فنری، است.

1- Incremental Sheet Metal Forming
2- Single Point Incremental Forming
3- Two Point Incremental Forming
4- Water jet
5- Volume effect

6- Acoustic softening
7- Limiting Drawing Ratio
8- Spinning
9- Ultrasonic Vibration Assisted Incremental Sheet Metal Forming

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.5.4]

2- تجهیزات اولتراسونیک

تجهیزات اولتراسونیک مورد استفاده در این پژوهش شامل سه جزء است که عبارتند از: مولد امواج اولتراسونیک، ترانسدیوسر و سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک (ابزارگیر). ترانسدیوسر در سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک، تعبیه شده است.

مولد اولتراسونیک، توان ورودی با فرکانس 50 الی 60 هرتز را به توان اولتراسونیک با فرکانس بالا تبدیل می‌کند. سیگنال توان با فرکانس بالا به ترانسدیوسر نیرو وارد می‌کند تا در فرکانس اِعمالی به ارتعاش درآید که بایستی دامنه آن با استفاده از یک متمرکزکننده تقویت شود.

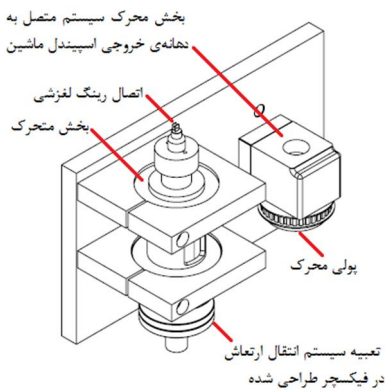
2-1- سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک (ابزارگیر)

سیستم انتقال ارتعاش (انتشار امواج) اولتراسونیک بایستی به گونه‌ای با ابزار فرایند ISMF ترکیب شود تا بتواند انرژی ارتعاشی را به طور مؤثر به ورق منتقل نماید. در این پژوهش، انرژی اولتراسونیک به ابزار شکل‌دهی، اِعمال خواهد شد تا در مود طولی به ارتعاش درآید.

با توجه به فیزیک فرایند ISMF و بر اساس حرکات خطی و دورانی ابزار شکل‌دهی، سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک بایستی به صورتی در نظر گرفته شود تا همزمان با انتقال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار شکل‌دهی با ماکزیمم دامنه ارتعاش، حرکت چرخشی ابزار همراه با حرکات خطی آن نیز تأمین شود. بنابراین سیستم مورد نظر با طرح مشخص و مواضع معین گره و شکم ارتعاشی، از طریق تأمین کننده، خریداری و تهیه شد (شکل 1).

در این سیستم، امکان دریافت حرکت دورانی برای ترانسدیوسر و ابزارگیر از طریق تسمه و پولی فراهم شده است. برای نصب و راه‌اندازی سیستم بر روی ماشین فرز CNC، طراحی و ساخت فیکسچر با در نظر گرفتن موضع اسپیندل (محرک) و یاتاقان‌بندی سیستم، انجام شد (شکل 2).

شکل 1 سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک



شکل 2 طراحی فیکسچر

از آن‌جایی‌که اتصال الکتریکی سیستم با مولد امواج اولتراسونیک بایستی به صورت ساکن و بدون چرخش باشد و از سوی دیگر، اتصال الکتریکی سیستم با ترانسدیوسر تعبیه شده در آن بایستی به صورت دورانی برقرار شود، لازم است تا این ارتباط الکتریکی به صورت صحیح و بدون قطعی برقرار شود.

اتصال الکتریکی در شکل 1، از نوع کلکتوری می‌باشد. به منظور پیشگیری از قطع این نوع از اتصال که می‌تواند ناشی از کوتاه شدن ذغال‌ها و یا عدم کارایی قطعه فنری واقع در پشت ذغال‌ها باشد، اتصال الکتریکی سیستم، اصلاح و تعویض شد. بدین منظور از قطعه‌ای با نام رینگ لغزشی[1] حاوی جیوه، برای اتصال الکتریکی سیستم با مولد و ترانسدیوسر استفاده شد. این قطعه به عنوان هادی چرخشی[2] عمل می‌کند و قطعی مدار در این حالت وجود نخواهد داشت (شکل 3).

فرکانس تحریک سیستم مطابق مشخصات درج شده توسط کارخانه سازنده، برابر با 20/5 kHz است. جهت حصول اطمینان از فرکانس طبیعی سیستم، تجهیزات مورد نظر جهت اجرای تست، فراهم و تنظیم شد. این تجهیزات شامل پیزودرایور[3] مدل PZD700A، فانکشن ژنراتور[4]، اسیلسکوپ و کابل‌های ارتباطی است.

مقدار فرکانس اندازه‌گیری شده برابر با 20/48 kHz است که صحت فرکانس درج شده بر روی سیستم را تأیید می‌کند (شکل 4).

3- ابزار شکل‌دهی مرتعش (متمرکزکننده)

در این مرحله بایستی طراحی ابزار شکل‌دهی به صورت سَرنیمکروی و با قابلیت انتقال ارتعاش طولی به ورق فلزی همراه با تقویت دامنه آن صورت پذیرد. به بیان دیگر ابزار شکل‌دهی، یک متمرکزکننده[5] انرژی است که همزمان دو وظیفه بر عهده دارد: اجرای فرایند شکل‌دهی تدریجی و انتقال و تقویت دامنه ارتعاش.

ابزار شکل‌دهی بایستی در مود طولی از ارتعاش و در یک فرکانس عملیاتی از مولد امواج و ترانسدیوسر، طراحی و تنظیم شود. بنابراین جنس

شکل 3 مونتاژ رینگ لغزشی بر روی سیستم

شکل 4 تجهیزات تست و تنظیم فرکانس

1- Slip ring
2- Rotary conductor
3- Piezo Driver
4- Function Generator
5- Concentrator

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.5.4]

ابزار، هندسه و ابعاد آن باید به گونه‌ای تعیین شود که در فرکانس عملیاتی مورد نظر، به کار گرفته شود. به منظور عملکرد صحیح ابزار در فرایند UVaISMF، طراحی و ساخت آن بایستی بر اساس شش گام صورت گیرد که در ادامه به تشریح هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

3-1- فرکانس تحریک

به منظور ساخت ابزار برای سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک، فرکانس طبیعی ابزار بایستی منطبق بر فرکانس مولد اولتراسونیک یا فرکانس تحریک ترانسدیوسر باشد تا منجر به وقوع پدیده تشدید (رزونانس)[1] شود. در این پژوهش، تک فرکانس تولیدی مولد، 20 kHz می‌باشد.

3-2- انتخاب جنس ابزار

مقاومت خستگی بالا و افت آکوستیکی پایین (جذب پایین انرژی ارتعاشی) به عنوان الزامات عمومی برای ابزار مرتعش محسوب می‌شوند. از سوی دیگر و با توجه به کاربرد و هندسه ابزار در فرایند ISMF، ویژگی‌هایی همچون: صلبیت، مقاومت در برابر دمای بالا و قابلیت ماشین‌کاری از جمله عوامل مؤثر در انتخاب جنس ماده می‌باشند. از این رو، فولاد زنگ‌نزن غیرمغناطیسی گرید 316 به عنوان جنس ابزار، انتخاب و تهیه شد (جدول 1).

3-3- محاسبه طول موج

جدول 2، خواص فیزیکی جنس ماده‌ی مورد استفاده برای محاسبه سرعت انتشار موج طولی در ابزار را نشان می‌دهد.

سرعت انتشار موج الاستیک طولی از رابطه (1) بدست می‌آید:

$$c = \sqrt{E/\rho} = 4911.72\ \mathrm{m/s} \quad (1)$$

با توجه به این که تک فرکانس تولیدی مولد برابر 20 kHz می‌باشد، فرکانس زاویه‌ای با رابطه (2) محاسبه می شود:

$$\omega = 2\pi f = 125663.71\ \mathrm{s^{-1}} \quad (2)$$

با استفاده از مقادیر فوق و رابطه (3)، طول موج محاسبه خواهد شد.

$$\lambda = \frac{c}{f} = 245.59\ \mathrm{mm} \quad (3)$$

3-4- تعیین هندسه و ابعاد ابزار

در ابتدا بایستی قیود هندسی، ابعادی و ارتعاشی ابزار شکل‌دهی را تعیین نمود تا بر اساس آن، فرایند طراحی ابزار مرتعش، تدوین شود. از این رو، قیود شش‌گانه مورد نظر بر اساس درجه اهمیت، عبارتند از:

(الف) قطر پایه ابزار شکل‌دهی: برای نصب و مونتاژ ابزار شکل‌دهی بر روی پیشانی ابزارگیر سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک، بایستی قطر پایه ابزار شکل‌دهی دقیقاً برابر با قطر پیشانی ابزارگیر (D=31 mm) باشد تا انتقال انرژی ارتعاشی به ابزار، بدون اتلاف و به طور مؤثر، انجام شود.

(ب) فُرم سَرنیمکروی ابزار شکل‌دهی: با توجه به هندسه سَرنیمکروی ابزار شکل‌دهی در فرایند ISMF و اندازه قطرهای معمول ابزار شکل‌دهی در این فرایند (D=5, 10, 15, 20 mm)، هندسه دماغه ابزار به صورت سَرنیمکروی و با اندازه قطر (D=10 mm) تعیین خواهد شد.

(ج) فرکانس طبیعی ابزار شکل‌دهی: فرکانس طبیعی ابزار شکل‌دهی بایستی در محدوده فرکانس تولیدی مولد (20 kHz) و یا محدوده فرکانس تحریک ترانسدیوسر تعبیه شده در سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک (20/5 kHz) باشد.

(د) شکل مود[2] ارتعاش ابزار شکل‌دهی: شکل مود مورد انتظار برای ابزار شکل‌دهی حاصل از تحلیل مودال، مود ارتعاش طولی می‌باشد.

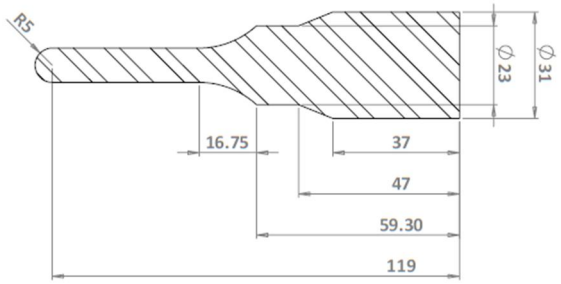
(ه) طول ابزار شکل‌دهی: به منظور موقعیت‌دهی مناسب گره و شکم ارتعاشی، طول ابزار بایستی برابر با نصف طول موج محاسبه شده (رابطه 3) باشد. نکته مهمی که بایستی بدان توجه کرد، در نظر گرفتن مقدار مجاز تیونینگ[3] است که از طریق لحاظ کردن طول اضافه برای ابزار (در حد چند میلی‌متر)، فراهم می‌شود. از این رو، می‌توان در طی فرایند تیونینگ، اقدام به ماشین‌کاری ابزار کرد و در نتیجه، اصلاح فرکانس طبیعی ابزار را مطابق قید (ج) به انجام رساند.

(و) سطح مقطع ابزار شکل‌دهی: سطح مقاطع متنوعی برای متمرکزکننده (ابزار شکل‌دهی) به صورت پله‌ای، مخروطی، نمایی و یا ترکیبی از آن‌ها، به منظور انتقال و تقویت دامنه ارتعاش در منطقه اجرای فرایند، پیشنهاد شده است [33].

به منظور طراحی ابزار شکل‌دهی مرتعش، طرح اولیه‌ای نزدیک به مشخصات هندسی و ابعادی ابزار و مطابق با الزامات شش‌گانه، در نرم‌افزار المان محدود، مدل‌سازی شد. سپس، تحلیل مودال مقدماتی در محدوده فرکانس مورد نظر، به انجام رسید و مشخصات ارتعاشی ابزار شکل‌دهی همچون فرکانس طبیعی و شکل مود، استخراج شد (بخش 3-5).

برای دست‌یابی به مشخصات مطلوب ارتعاشی ابزار، ایجاد تغییرات هندسی و ابعادی در طرح اولیه، اجتناب ناپذیر است. نکته‌ای که بایستی در حین تغییرات طرح ابزار به آن توجه شود، مسأله قابلیت ساخت طرح ابزار است.

بنابراین با توجه به الزامات طراحی، محاسبات تئوری و تحلیل نرم‌افزاری انجام شده و بر اساس روش آزمون و خطا[4]، طرح ابزار به صورت سَرنیمکروی و ترکیبی از سه مقطع پله‌ای، مخروطی و نمایی به قطر 10 میلی‌متر و به طول 124 میلی‌متر، نهایی شد (شکل 5).



شکل 5 طراحی ابزار سَرنیمکروی مرتعش به قطر 10 میلی‌متر

جدول 1 خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن گرید 316 [32]

عنوان	مقدار
استحکام کششی	515 مگاپاسکال
استحکام تسلیم	205 مگاپاسکال
سختی	217 برینل

جدول 2 خواص فیزیکی فولاد زنگ نزن گرید 316 [32]

عنوان	مقدار
دانسیته (ρ)	8000 kg/m³
مدول یانگ (E)	193 گیگاپاسکال
ضریب پواسون	0/28

1- Resonance

2- Mode Shape
3- Tuning Allowance
4- Trial and error

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.5.4]

3-5- تحلیل مودال

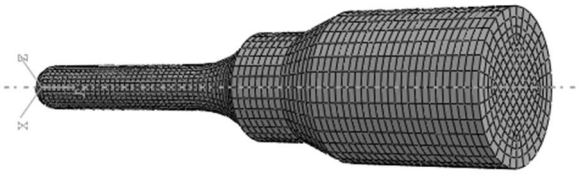
تحلیل مودال به منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش ابزار و شکل‌های مود متناظر با آن، استفاده می‌شود. از این رو، نرم‌افزار المان محدود آباکوس نسخه 6.12 [34] به منظور تحلیل مودال ابزار، مورد استفاده قرار گرفت. پس از مدل‌سازی ابزار، خواص فیزیکی و مکانیکی جنس ماده به صورت آیزوتروپیک تعریف شد. روش لانکزوس[1] به عنوان روش استخراج مقادیر ویژه در محدوده‌ی فرکانسی 17-25 kHz انتخاب شد. شکل 6، مدل مش‌بندی شده‌ی ابزار را نشان می‌دهد.

شکل 7، نتیجه حاصل از تحلیل مودال ابزار طراحی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مود طولی از ارتعاش ابزار با فرکانس طبیعی 20/846 kHz ظاهر شده است که مناسب‌ترین گزینه برای ارتعاش طولی ابزار شکل‌دهی است.

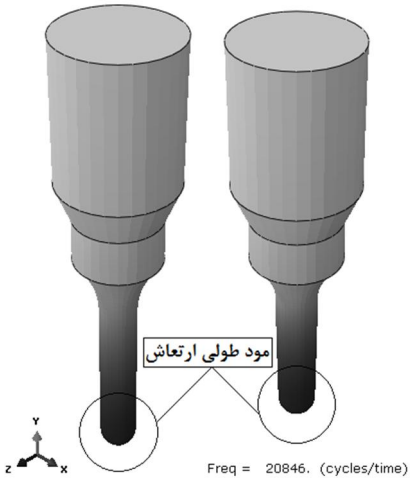
3-6- ساخت، تست و تنظیم فرکانس ابزار

در این مرحله، ساخت ابزار مطابق با هندسه و ابعاد تعیین شده، به انجام رسید (شکل 8).

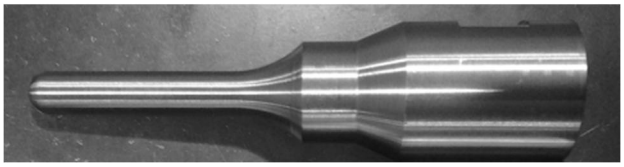
به منظور دست‌یابی به ماکزیمم دامنه ارتعاش در دماغه ابزار شکل‌دهی (انتهای متمرکزکننده)، بایستی اتصال مابین سیستم انتقال ارتعاش و قطر پایه ابزار به خوبی انجام شود. بنابراین ابزار بر روی پیشانی ابزارگیر و با استفاده از واشر مایلار، نصب و مونتاژ شد (شکل 9).



شکل 6 مش‌بندی مدل ابزار

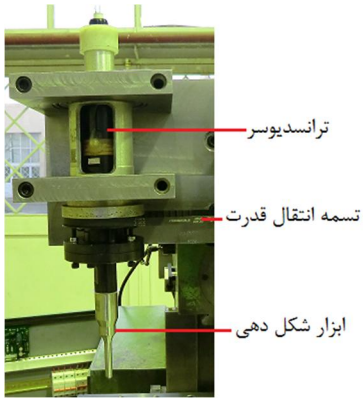


شکل 7 مود طولی ارتعاش ابزار شکل‌دهی با فرکانس طبیعی 20/846 کیلوهرتز



شکل 8 ساخت ابزار شکل‌دهی مرتعش به قطر 10 میلی‌متر

1- Lanczos



شکل 9 نصب و مونتاژ ابزار بر روی سیستم انتقال ارتعاش

فرایند تست و تنظیم فرکانس رزونانس ابزار در دو حالت استاتیکی (بدون دوران) و دینامیکی (با دوران) و مطابق با تنظیمات تجهیزات و روش تشریح شده در بخش 2-1، انجام شد. جدول 3، نتایج تست و مونیتورینگ فرکانس طبیعی ابزار را نشان می‌دهد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اختلاف بسیار اندکی میان فرکانس طبیعی ابزار در دو وضعیت استاتیکی و دینامیکی وجود دارد. به منظور ارزیابی عملکرد صحیح مجموعه، می‌توان با استفاده از حس لامسه و تماس انگشتان دست، سطح لیز و بدون اصطکاکی را در دماغه ابزار حس کرد که مؤید وجود شکم ارتعاشی در دماغه ابزار شکل‌دهی می‌باشد.

اختلاف میان فرکانس طبیعی پیش‌بینی شده توسط تحلیل مودال (20/846 kHz) و میانگین فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده توسط پیزودرایور (21/15 kHz) کمتر از 1/5% است. از سوی دیگر، اختلاف میان فرکانس اِعمالی به ترانسدیوسر (20 kHz) و میانگین فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده توسط پیزودرایور (21/15 kHz) کمتر از 6% می‌باشد.

بنابراین، نتایج حاصل از تحلیل عددی (آنالیز مودال) و تست تجربی فرکانس طبیعی ابزار مرتعش، ظهور مود طولی ارتعاش و وقوع پدیده رزونانس (تشدید) را در دو وضعیت استاتیکی و دینامیکی، تأیید می‌کند.

4- آزمایش تجربی

4-1- تجهیزات آزمایش

توسعه و کاربرد تکنیک‌های اولتراسونیک با توان بالا در فرایندهای شکل‌دهی، نیازمند استفاده از تجهیزات اولتراسونیک با طراحی ویژه است تا انتقال انرژی از ترانسدیوسر به سطح مشترک ابزار و ورق فلزی به طور صحیح انجام گیرد. به منظور اِعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار شکل‌دهی، از مولد کینگ[2] با توان 1000 وات و فرکانس عملیاتی 20 کیلوهرتز، استفاده شد. تحریک اولتراسونیک ابزار توسط این مولد، انتقال و اِعمال پیوسته ارتعاش را میسّر می‌سازد.

برای اندازه‌گیری دامنه ارتعاش دماغه ابزار شکل‌دهی از ساعت دیجیتال میکرونی مدل مارکاتور[3] 1087 ساخت شرکت ماهر[4]، استفاده شد. دامنه ارتعاش ابزار شکل‌دهی برابر با 7/5 میکرون اندازه‌گیری شد.

جدول 3 نتایج تست فرکانس طبیعی ابزار توسط پیزودرایور مدل PZD700A

وضعیت ابزار	فرکانس طبیعی (kHz)
استاتیکی (بدون دوران)	21/16
دینامیکی (با دوران)	21/14

2- KING
3- MarCator
4- Mahr

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.5.4]

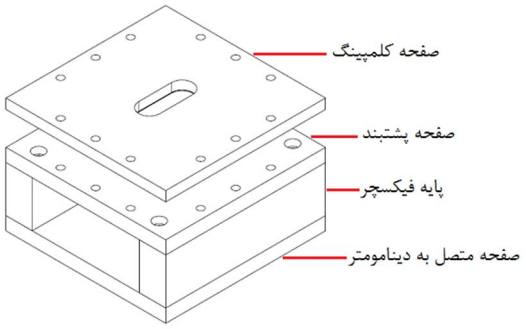
جنس ورق تحت آزمایش، آلیاژ آلومینیم Al 1050-O است که به عنوان گرید عمومی و آنیل شده آلومینیم با استحکام متوسط و برای ورق‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به منظور ثبت مؤلفه عمودی نیروی اِعمالی به ابزار شکل‌دهی مرتعش (F_z)، از دینامومتر کیستلر[1] استفاده شد. فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی در این پژوهش از نوع تک نقطه‌ای (SPIF) است. شکل 10، اجزای فیکسچر را نشان می‌دهد. ورق فلزی مابین صفحه کلمپینگ و صفحه پشتبند، قرار می‌گیرد.

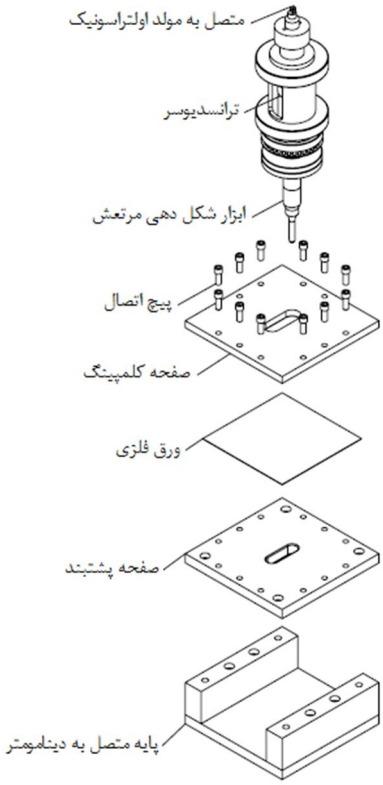
شکل 11، طرح کلی از چیدمان تجهیزات فرایند UVaISMF را نشان می‌دهد.

4-2- اجرای آزمایش

هندسه نمونه به صورت شیار مستقیم[2] و به طول 50 میلی‌متر است که بر اساس توالی حرکات عمودی و افقی ابزار شکل‌دهی مرتعش بر روی ورق



شکل 10 اجزای فیکسچر فرایند شکل‌دهی تدریجی



شکل 11 چیدمان تجهیزات فرایند UVaISMF

کلمپ شده، ایجاد خواهد شد. مسیر طی شده توسط ابزار شکل‌دهی شامل 10 نفوذ به اندازه گام عمودی 0/5 میلی‌متر و 10 مسیر خطی به طول 50 میلی‌متر است (شکل 12).

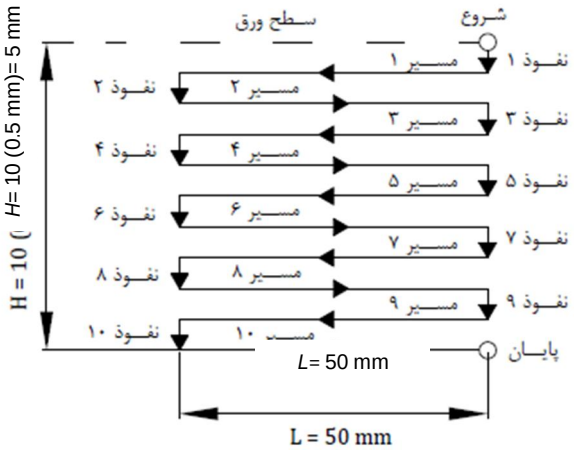
جدول 4، ترکیب پارامتری آزمایش‌های انجام شده به منظور مطالعه و بررسی پارامترهای خروجی را در دو وضعیت "بدون" و "با" اِعمال ارتعاش اولتراسونیک نشان می‌دهد. عمق شکل‌دهی نمونه‌ها برابر 5 میلی‌متر است. برای حذف تأثیر روانکار بر نتایج خروجی و جلوگیری از تداخل اثر آن با تأثیر اِعمال ارتعاش، آزمایش‌ها بدون حضور روانکار انجام شد.

شکل 13، نمونه‌های شکل‌دهی شده از ورق Al 1050-O در دو وضعیت "بدون اِعمال ارتعاش" و "با اِعمال ارتعاش" را نشان می‌دهد.

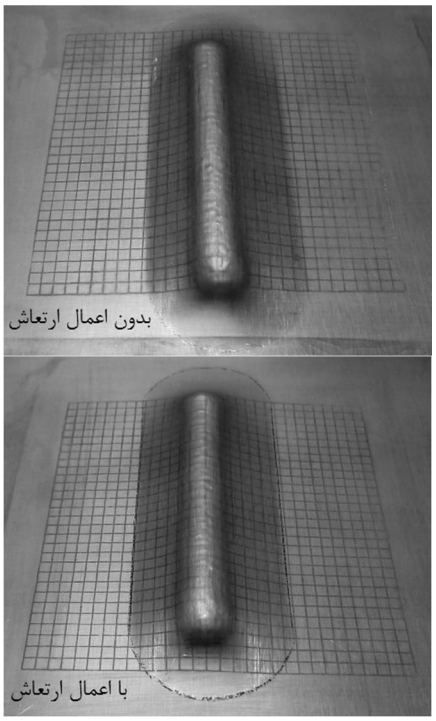
4-3- نتایج

4-3-1- مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی

مؤلفه عمودی نیروی اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر با نماد F_z نشان داده می‌شود و به عنوان نیروی اِعمالی به محور ابزار شکل‌دهی است. شکل‌های 14



شکل 12 استراتژی مسیر ابزار شکل‌دهی



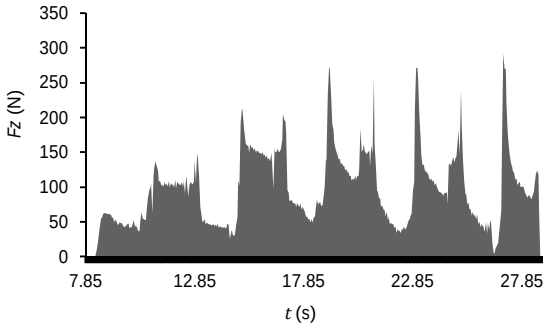
شکل 13 نمونه‌های شکل‌دهی شده در آزمون شیار مستقیم

1- KISTLER
2- Straight Groove

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.5.4]

جدول 4 ترکیب پارامتری آزمایش‌های تجربی

عنوان	مقدار
ضخامت ورق Al 1050-O	0/7 میلی‌متر
اندازه‌ی گام عمودی ابزار	0/5 میلی‌متر
قطر ابزار	10 میلی‌متر
سرعت دورانی ابزار	125 rpm
نرخ پیشروی ابزار	2000 mm/min
دامنه ارتعاش دماغه‌ی ابزار	7/5 میکرون
توان مولد	1000 وات

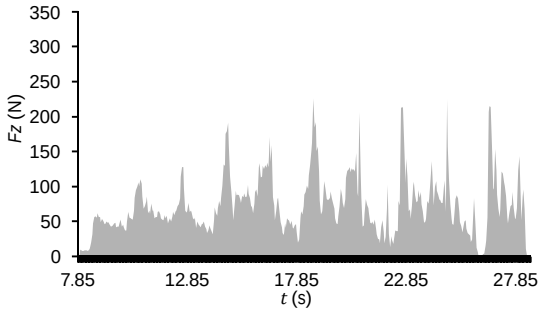


شکل 14 رفتار نیروی اِعمالی به محور ابزار شکل‌دهی غیرمرتعش

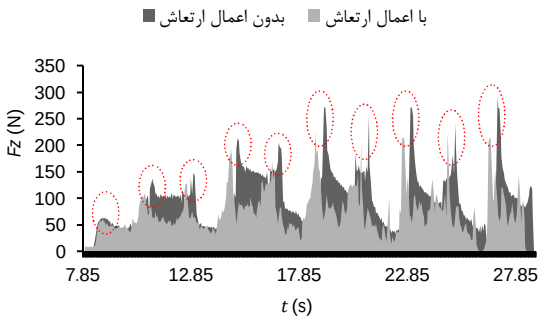
و 15 رفتار نیروی F_z نسبت به زمان را به ترتیب در دو وضعیت "بدون اِعمال ارتعاش" و "با اِعمال ارتعاش" نشان می‌دهد.

مقایسه رفتار نیروی اِعمالی به محور ابزار شکل‌دهی، نشان می‌دهد که مقادیر نیروی F_z تحت تأثیر ارتعاش اولتراسونیک، کاهش می‌یابد.

شکل 16، مواضع مربوط به مراحل ده‌گانه نفوذ ابزار شکل‌دهی در دو وضعیت "بدون" و "با" اِعمال ارتعاش را نشان می‌دهد. فواصل میان دو نفوذ متوالی به عنوان مسیرهای شکل‌دهی در نظر گرفته می‌شوند.



شکل 15 رفتار نیروی اِعمالی به محور ابزار شکل‌دهی مرتعش



شکل 16 مواضع مربوط به مراحل نفوذ ابزار شکل‌دهی

به منظور بررسی و تحلیل دقیق‌تر نتایج اندازه‌گیری شده، مقایسه دو وضعیت "بدون اِعمال ارتعاش" و "با اِعمال ارتعاش" در دو مرحله "حرکت عمودی ابزار (نفوذ)" و "حرکت افقی ابزار (مسیر)" به صورت مجزا، انجام خواهد شد. شکل 17، نمودار مقایسه‌ای میانگین نیروی F_z در دو وضعیت "بدون" و "با" اِعمال ارتعاش را برای مراحل ده‌گانهٔ نفوذ ابزار شکل‌دهی نشان می‌دهد.

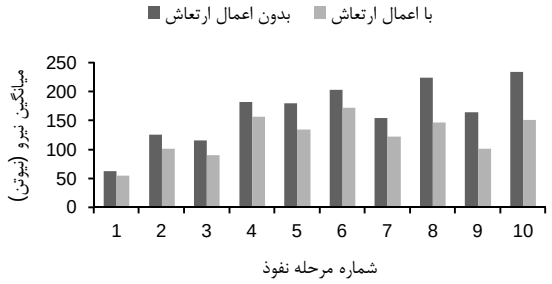
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تحریک اولتراسونیک ابزار شکل‌دهی، موجب کاهش مقادیر میانگین نیروی اِعمالی به محور ابزار، خواهد شد. به بیان دیگر به‌کارگیری ارتعاش اولتراسونیک، به طور متوسط باعث کاهش 23/5% درصدی میانگین نیروی F_z در طی مراحل نفوذ ابزار شده است.

شکل 18، نمودار مقایسه‌ای میانگین نیروی شکل‌دهی در دو وضعیت "بدون" و "با" اِعمال ارتعاش را برای مسیرهای ده‌گانه‌ی حرکت افقی ابزار شکل‌دهی نشان می‌دهد.

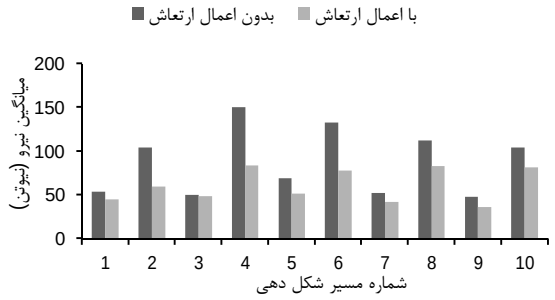
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تحریک اولتراسونیک ابزار شکل‌دهی، موجب کاهش مقادیر میانگین نیروی اِعمالی به محور ابزار، خواهد شد. به بیان دیگر به‌کارگیری ارتعاش اولتراسونیک، به طور متوسط باعث کاهش 26/3% درصدی میانگین نیروی F_z در طی حرکات افقی ابزار، شده است.

4-3-2- برگشت فنری

عمق نمونه‌های شکل‌دهی شده با استفاده از دستگاه کانتورگراف[1] ساخت شرکت Mahr در راستای طولی و به فاصله 10 mm در پنج نقطه از عمق نمونه‌ها، اندازه‌گیری شد و میانگین داده‌ها به عنوان عمق نمونه شکل‌دهی شده پس از برداشت فشار ابزار ($h_{ave.}$) ثبت شد.



شکل 17 مقایسه مقادیر میانگین نیروی F_z در مراحل ده‌گانهٔ نفوذ ابزار



شکل 18 مقایسه مقادیر میانگین نیروی F_z در مسیرهای ده‌گانه‌ی حرکت افقی ابزار

1- Perthometer Concept Contour

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.5.4]

جدول 5، نتایج اندازه‌گیری عمق نمونه‌های شکل‌دهی شده به همراه درصد اختلاف عمق نمونه‌ها نسبت به عمق اِعمال شده توسط ابزار شکل‌دهی (h_1 = 5 mm) را نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی میزان برگشت فنری نمونه شکل‌دهی شده، از معیاری به نام ضریب برگشت فنری (K) استفاده می‌شود که از رابطه (4) قابل محاسبه است [35]:

$$K = \frac{h_1 + \frac{t}{2}}{h_{\text{ave.}} + \frac{t}{2}} \tag{4}$$

در این رابطه، h_1 عمق اِعمال شده به هندسه نمونه، t ضخامت ورق و $h_{\text{ave.}}$ میانگین عمق اندازه‌گیری شده پس از اجرای فرایند است. با توجه به رابطه (4)، هر چه مقدار پارامتر K به عدد یک (1.00) نزدیک‌تر شود، دلالت بر کاهش میزان برگشت فنری نمونه شکل‌دهی شده، خواهد داشت. جدول 6، مقادیر ضریب برگشت فنری نمونه‌های شکل‌دهی شده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌کارگیری ابزار مرتعش در مقایسه با ابزار غیرمرتعش، موجب افزایش عمق‌پذیری و کاهش ضریب برگشت فنری نمونه، شده است.

شکل 19، مقایسه‌ی عمق اِعمالی و عمق اندازه‌گیری شدهٔ نمونه‌ها را در دو وضعیت "بدون" و "با" اِعمال ارتعاش نشان می‌دهد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روند طراحی، ساخت و تست ابزار شکل‌دهی مرتعش به منظور توسعه فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی به کمک ارتعاش اولتراسونیک، ارائه شد. در ادامه، برای آزمایش عملکرد ابزار مرتعش، آزمون شیار مستقیم بر روی ورق‌های Al 1050-O در دو وضعیت "بدون اِعمال ارتعاش" و "با اِعمال ارتعاش" انجام شد. نتایج مهم حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- ظهور مود طولی ارتعاش و وقوع پدیده رزونانس در ابزار مرتعش در دو وضعیت استاتیکی (بدون دوران) و دینامیکی (با دوران) توسط نتایج حاصل از تحلیل عددی (f=20/846 kHz) و آنالیز تجربی فرکانس طبیعی ابزار شکل‌دهی (f=21/15 kHz) به تأیید رسید. بنابراین عملکرد ارتعاشی ابزار شکل‌دهی به منظور نصب و مونتاژ بر روی سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک و اجرای فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی به کمک ارتعاش اولتراسونیک، مورد تأیید قرار گرفت.
- مقایسه رفتار نیروی اِعمالی به محور ابزار شکل‌دهی در دو وضعیت "بدون اِعمال ارتعاش" و "با اِعمال ارتعاش"، نشان داد که مقادیر مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی تحت تأثیر ارتعاش اولتراسونیک، کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، میانگین مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی در طی حرکات عمودی و افقی ابزار مرتعش به ترتیب به میزان 23/5% و 26/3% کاهش یافت.
- مقایسه مقادیر میانگین عمق نمونه‌های شکل‌دهی شده در دو وضعیت "بدون اِعمال ارتعاش" ($h_{ave.}$ = 4/650mm) و "با اِعمال ارتعاش" ($h_{ave.}$=4/845mm)، نشان داد که میزان عمق‌پذیری نمونه تحت تأثیر ارتعاش اولتراسونیک، افزایش می‌یابد.
- مقایسه ضرایب برگشت فنری نمونه‌های شکل‌دهی شده در دو وضعیت "بدون اِعمال ارتعاش" (K=1/07) و "با اِعمال ارتعاش" (K=1/03)، نشان داد که میزان برگشت فنری نمونه تحت تأثیر ارتعاش اولتراسونیک، کاهش می‌یابد.

جدول 5 نتایج اندازه‌گیری عمق نمونه‌های شکل‌دهی شده

موضع اندازه‌گیری عمق نمونه	بدون ارتعاش	با ارتعاش
1	4/649	4/851
2	4/649	4/842
3	4/651	4/844
4	4/648	4/840
5	4/653	4/848
$h_{\text{ave.}}$(mm)	4/650	4/845
درصد اختلاف	(-7) %	(-3/1) %

جدول 6 مقادیر ضریب برگشت فنری

ضریب برگشت فنری	بدون ارتعاش	با ارتعاش
K	1/07	1/03

شکل 19 نمودار مقایسه‌ای عمق نمونه‌های شکل‌دهی شده

6- فهرست علایم

c	سرعت انتشار موج (m/s)
E	مدول یانگ (Pa)
f	فرکانس (Hz)
F_z	مؤلفه عمودی نیروی وارد بر ابزار (N)
$h_{\text{ave.}}$	میانگین عمق نمونه شکل‌دهی شده (mm)
h_1	عمق اِعمال شده به نمونه (mm)
K	ضریب برگشت فنری
t	زمان (s)
t	ضخامت ورق (mm)

علایم یونانی

ρ	دانسیته (kg/m³)
ω	فرکانس زاویه‌ای (rad/s)
λ	طول موج (mm)

زیرنویس

z	راستای عمود بر صفحه x-y

7- مراجع

[1] S. P. Shanmuganatan, V. S. Senthil Kumar, Metallurgical analysis and finite element modelling for thinning characteristics of profile forming on circular cup, *Materials and Design*, Vol. 44, pp. 208-215, 2013.

[2] S. Matsubara, Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical tool, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 35, pp. 1311-1316, 1994.

[3] M. Azaouzi, N. Lebaal, Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 24, pp. 49-58, 2012.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.5.4]

[4] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *Ann. CIRP,* Vol. 54, No. 2, pp. 623-649, 2005.
[5] S. Thibaud, R. Ben Hmida, F. Richard, P. Malécot, A fully parametric toolbox for the simulation of single point incremental sheet forming process: Numerical feasibility and experimental validation, *Simulation Modelling Practice and Theory,* Vol. 29, pp. 32-43, 2012.
[6] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini, Optimization of tool path in two points incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 177, pp. 409-412, 2006.
[7] A. Saberi, S. M. Safavi, M. Kadkhodaei, F. Rabiei, Two point incremental forming analysis using slab analysis with experimental data, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 1, pp. 61-69, 2013. (In Persian)
[8] M. Geiger, F. Vollertsen, Mechanisms of laser forming, *Ann. CIRP,* Vol. 42, No. 1, pp. 301-304, 1993.
[9] J. Kim, S. J. Na, Development of irradiation strategies for free curve laser forming, *Optics Laser Technol,* Vol. 35, No. 8, pp. 605-611, 2003.
[10] H. Iseki, Flexible and incremental bulging of sheet metal forming using high speed water jet, *JSME Int. J. Ser. C,* Vol. 4, pp. 486-493, 2001.
[11] B. Jurisevic, K. C. Heiniger, K. Kuzman, M. Junkar, Incremental sheet metal forming with a high speed water jet, *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference, IDDRG,* pp. 139-148, 2003.
[12] G. Ambrogio, L. Filice, F. Micari, A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 177, pp. 413-416, 2006.
[13] J. Duflou, Y. Tunckol, A. Szekeres, P. Vanherck, Experimental study on force measurements for single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 189, pp. 65-72, 2007.
[14] F. Blaha, B. Langenecker, Tensile deformation of zinc crystal under ultrasonic vibration, *Naturwissenschaften,* Vol. 42, No. 20, pp. 556-556, 1955.
[15] B. Langenecker, Work-softening of metal crystals by alternating the rate of glide strain, *Acta Metallurgica,* Vol. 9, pp. 937-940, 1961.
[16] B. Langenecker, Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics SU,* Vol. 13, pp. 1-8, 1966.
[17] M. Lucas, A. Gachagan, A. Cardoni, Research applications and opportunities in power ultrasonics, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science,* Vol. 223, No. 12, pp. 2949-2965, 2009.
[18] C. E. Winsper, E. Sansome, A review of the application of oscillatory energy to metals deforming plasticity, *8th International MTDR Conference,* Manchester, pp. 1359-1360, 1967.
[19] G. A. Malygin, Acoustoplastic effect and the stress superimposition mechanism, *Physical Solid State,* Vol. 42, pp. 72-78, 2000.
[20] R. Pohlman, E. Lehfeldt, Influence of ultrasonic vibration on metallic friction, *Ultrasonics,* Vol. 4, pp. 178-185, 1966.
[21] G. E. Nevill, F.R. Brotzen, Effect of vibration on the yield strength of a low-carbon steel, in First Technical Report, *The Rice Institute, Solid Science Division, Air Force Office of Scientific Research, ARDC,* Washington, 1957.
[22] R. E. Green, Non-linear effects of high-power ultrasonics in crystalline solids, *Ultrasonics,* Vol. 13, pp. 117-127, 1975.
[23] T. Jimma, Y. Kasuga, N. Iwaki, O. Miyazawa, E. Mori, K. Katsuhiko, H. Hatano, An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 80-81, pp. 406-412, 1998.
[24] J. Tsujino, T. Ueoka, K. Takiguchi, H. Satoh, K. Takahashi, Characteristics of bending parts of metal plates using ultrasonic bending systems with a vibration punch and a vibration die, *Japan Journal Application of Physics,* Vol. 32, pp. 2447-2451, 1993.
[25] M. Inoue, Studies on ultrasonic metal tube drawing, *Memoira of Sagami Institute of Technology,* Vol. 19, pp. 1-7, 1984.
[26] M. Murakawa, M. Jin, P. Kaewtatip, Utility of ultrasonic vibration applied to metal-forming processes, *Advanced Technology of Plasticity,* pp. 19–24, 1999.
[27] M. Murakawa, M. Jin, The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 113, pp. 81-86, 2001.
[28] K. Siegert, A. Mock, Wire drawing ultrasonically oscillating dies, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 60, pp. 657-660, 1996.
[29] K. Siegert, J. Ulmer, Superimposing ultrasonic waves on the dies in tube and wire drawing, *Journal of Engineering Materials and Technology,* Vol. 123, pp. 517-523, 2001.
[30] Y. Ashida, H. Aoyama, Press forming using ultrasonic vibration, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 187–188, pp. 118–122, 2007.
[31] M. A. Rasoli, A. Abdullah, M. Farzin, A. Fadaei Tehrani, A. Taherizadeh, Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 212, pp. 1443-1452, 2012.
[32] http://www.atlassteels.com.au
[33] M. J. R. Young, C. E. Winsper, D. H. Sansome, The effect of tool attachment on the resonant characteristics of ultrasonic waveguides, *Applied Acoustics,* Vol. 3, pp. 217-224, 1970.
[34] http://www.3DS.com/simulia
[35] A. R. Vahdati, M. Sedighi, Application of Incremental Sheet Metal Forming (ISMF) process in rapid prototyping of sheet metal parts, B.Sc. Project, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, 2004. (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.5.4]