



Experimental Investigation of Elevated Temperature Single Point Incremental Forming of AA6061 Aluminum Sheet

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Darzi Sh.¹ MSc,
Mirnia M.J.*¹ PhD,
Elyasi M.¹ PhD

How to cite this article

Darzi Sh, Mirnia M, Elyasi M. Experimental Investigation of Elevated Temperature Single Point Incremental Forming of AA6061 Aluminum Sheet. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(8):2171-2184.

ABSTRACT

Single point incremental forming is a cost-effective process with high flexibility and as a result, would be a proper selection for low-batch and high-customized production compared to traditional processes such as pressing. The target market of this process usually consists of medical, automotive, and aerospace industries in which metals with high strength to weight are highly in demand. These materials are usually formed at elevated temperatures due to their low formability at room temperature. In this study, the AA6061 aluminum sheet was homogeneously heated at 25-400°C. In addition, the effects of important process variables of heat-assisted SPIF including temperature, vertical pitch, feed rate, and three types of lubricants were investigated on formability of truncated cones with various wall angles. According to the results, despite the inability of local heating in enhancing the formability of the AA6061 sheet (37% improvement of formability under optimal conditions), the homogenous heating approach which was used in this article leads to a significant improvement in formability (528%). Temperature is the most important parameters effective on the formability, while lubricant and vertical pitch are ranked as the second and third parameters, respectively and the effect of feed rate is negligible. The critical wall angle increases from 60 to 65 degrees with increasing the temperature from 25 to 400°C. In order to choose a suitable set of parameters, the surface roughness should be taken into account, which may alter the results from 1.18 to 4µm as the best and worst surface conditions, respectively. Furthermore, a truncated cone with a wall angle of 65 degrees was successfully formed to 44mm depth using an appropriate combination of process parameters. This demonstrates an outstanding improvement in formability.

Keywords Single Point Incremental Forming; Forming At Elevated Temperatures; Lubricant; Vertical Pitch; Formability

¹Manufacturing Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence

Address: Babol Noshirvani University of Technology, Shariati Avenue, Babol, Mazandaran, Iran. Postal Code: 4714871167.
Phone: +98 (11) 32332071
Fax: +98 (11) 32334201
mirnia@nit.ac.ir

Article History

Received: March 10, 2020
Accepted: June 09, 2020
ePublished: August 15, 2020

CITATION LINKS

[1] Research and progress in incremental sheet forming ... [2] Heat-assisted incremental sheet forming ... [3] Influence of global forced-air warming on the bulge formation in ... [4] Warm incremental forming of magnesium alloys using hot ... [5] Hot incremental forming of magnesium and aluminum alloy sheets by ... [6] Electric hot incremental sheet forming of Ti-6Al-4V titanium, AA6061 aluminum, ... [7] Thermography in incremental forming processes at ... [8] Electric hot incremental forming: A novel ... [9] Warm incremental forming ... [10] Investigation of thermal-related ... [11] Hot incremental forming of titanium human skull prosthesis by using cartridge heaters: a reverse ... [12] A comprehensive experimental investigation on the influences of the process variables on warm incremental forming ... [13] Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static ... [14] Electric assistance hot incremental sheet forming ... [15] Lubrication aspects during single point incremental forming for steel and ... [16] Experimental investigation of formability and surface finish into resistance single-point incremental forming of Ti-6Al-4V ... [17] An experimental study on dimensional accuracy, surface ... [18] Numerical prediction of failure in single point incremental ... [19] Dynamic mechanical behavior of 6061 al alloy at elevated temperatures ... [20] Warm negative incremental forming of magnesium alloy ... [21] Formability in single point incremental forming: A comparative analysis ... [22] Analysis of incremental sheet metal forming using ...

مطالعه تجربی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای دمابالای ورق آلیاژ آلومینیوم AA6061

شایان درزی MSc

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

محمدجواد میرنیا PhD

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

مجید الیاسی PhD

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای، فرآیندی مقرون‌به‌صرفه با انعطاف‌پذیری بالا است و در نتیجه انتخابی مناسب برای تولیدهای حجم پایین- سفارشی در مقایسه با روش‌های سنتی‌تر مانند پرسکاری است. مهم‌ترین صنایع هدف این فرآیند، صنعت‌های پزشکی، خودروسازی و هوافضا است، که در جمیع آنها گرایش به سمت استفاده از فلزاتی با نسبت استحکام به وزن بالا است. این دسته از فلزات شکل‌پذیری بسیار پایینی را در دمای اتاق از خود نشان می‌دهند و برای بهبود شکل‌پذیری آنها فرآیند شکل‌دهی تدریجی در دماهای بالا صورت می‌گیرد. در این پژوهش، گرمایش ورق آلیاژی AA۶۰۶۱ در محدوده دمایی ۲۵ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، به‌صورت یکنواخت انجام شد. نحوه تاثیرگذاری پارامترهای فرآیندی دما، گام عمودی و سرعت پیش‌روی به همراه سه نوع روانکار بر شکل‌پذیری قطعات شکل‌داده‌شده به‌صورت مخروط‌هایی ناقص در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای داغ مطالعه شد. نتایج نشان داد که علی‌رغم ناتوان‌بودن گرمایش نقطه‌ای ورق در افزایش شکل‌پذیری ورق آلومینیوم AA۶۰۶۱ (۳۷٪ بهبود شکل‌پذیری تحت شرایط بهینه) در ادبیات تحقیق، روش گرمایش متفاوت مورد استفاده در این مقاله منجر به افزایش ۵۲۸٪ شکل‌پذیری شد. از لحاظ میزان تاثیرگذاری پارامترها بر شکل‌پذیری، دما مهم‌ترین عامل است. روانکار و گام عمودی در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند و اثر سرعت پیش‌روی قابل چشم‌پوشی است. با افزایش دما از ۲۵ به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، زاویه دیواره بحرانی از ۶۰ به ۶۵ درجه تغییر می‌کند. در انتخاب شرایط مناسب فرآیندی کیفیت سطح قطعات نیز باید مورد توجه قرار گیرد. به‌گونه‌ای که کیفیت سطح قطعات شکل‌داده‌شده در بهترین و بدترین حالت، به ترتیب ۱/۸ و ۴ میکرومتر به‌دست‌آمد. با استفاده از ترکیبی بهینه از پارامترهای فرآیندی، شکل‌دهی مخروطی با زاویه دیواره ۶۵ تا عمق ۴۴ میلی‌متر در یک مرحله میسر شد که نشان‌دهنده افزایش شکل‌پذیری چشم‌گیری است.

کلیدواژه‌ها: شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای، شکل‌دهی دما بالا، روانکار، گام عمودی، شکل‌پذیری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۰

*نویسنده مسئول: mirnia@nit.ac.ir

مقدمه

شکل‌دهی تدریجی ورق (Incremental Sheet Metal Forming; ISF)، روشی برای شکل‌دهی ورق است که از دستگاه‌های کنترل عددی کامپیوتری به‌منظور تولید قطعات

پیچیده ورق فلزی استفاده می‌کند. این فرآیند در ابتدا، برای تامین نیازهای صنعت خودرو ظهور کرد، اما امروزه در بسیاری از صنایع کاربرد دارد. حد شکل‌پذیری در این فرآیند نسبت به فرآیندهای سنتی شکل‌دهی بالاتر است ولی از طرف دیگر به‌دلیل مشکلاتی از جمله سرعت تولید و دقت ابعادی پایین، هنوز به‌طور کامل صنعتی نشده است. ISF را براساس روش شکل‌دهی می‌توان به دو دسته ISF تک‌نقطه‌ای و دوقطه‌ای^[1] و از لحاظ دمای کاری به دو دسته ISF سرد و ISF گرم تقسیم کرد.

در SPIF سرد، به‌عنوان یک فرآیند کارسرد، ماده در دمای محیط شکل داده می‌شود. در میان مواد آزمایش‌شده، فلزاتی مانند منیزیم، تیتانیوم و آلومینیوم (خصوصاً سری 6XXX) در صنایع هوافضا، خودرو و صنعت پزشکی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد به شکل‌پذیری دشوار و چکش‌خواری پایین در دمای اتاق مشهور هستند. در نتیجه، فرآیند یادشده با عنوان ISF سنتی در شکل‌دهی این گونه مواد ناتوان است. به‌منظور برطرف کردن این مشکل، مجموعه‌ای از روش‌های ISF گرمایشی (Heat Assisted ISF; HAISF) مورد بررسی قرار گرفته است^[2].

براساس منبع گرمایشی مورد استفاده، HAISF را می‌توان به‌دسته‌های حرارت با لیزر^[2]، حرارت با لامپ هالوژن^[2]، حرارت با هوای داغ^[3]، حرارت با روغن داغ^[4]، حرارت اصطکاکی^[2]، حرارت الکتریکی^[5-8]، حرارت توسط المنت‌های حرارتی^[9-12] و ترکیبی (ترکیب اصطکاک و المنت‌های گرمایشی^[13]) تقسیم کرد. علاوه بر آن، روش‌های یادشده را می‌توان براساس روش‌های حرارت‌دهی نقطه‌ای یا یکنواخت ورق نیز دسته‌بندی کرد. تمرکز بیشتر پژوهشگران بر نوع نقطه‌ای حرارت‌دهی با توجه به هدررفت پایین‌تر انرژی نسبت به حرارت‌دهی یکنواخت و سیستم آزمایشگاهی ساده‌تر آن بوده است. اما این روش معایبی از قبیل کیفیت سطح نامطلوب، دقت ابعادی پایین، سوختگی ناشی از جرقه بر روی ورق و ابزار، نامناسب‌بودن برای شکل‌دهی چندمرحله‌ای و پیچیدگی روانکاری را دارا است^[2].

حرارت‌دهی الکتریکی به هر دو صورت نقطه‌ای (Local Electric Heating Incremental Forming; LEHIF) و یکنواخت (Homogenous Electric Heating Incremental Forming; HEHIF) مورد آزمایش قرار گرفته است^[14]. برخلاف روش‌های گرمایش نقطه‌ای ورق، در گرمایش یکنواخت ورق، تلاش بر همگن‌سازی هر چه بیشتر حرارت در مساحت ورق است. ون‌سی و تان‌نام^[5] با قراردادن الکترودهای مسی بر دو طرف ورق و عبور جریان از سطح ورق منیزیم AZ31 و آلومینیوم AA5055، عملیات گرمایش ورق به‌صورت یکنواخت را انجام دادند. آنها اثر پارامترهای فرآیندی بر شکل‌پذیری و کیفیت سطح را بررسی نمودند و دریافتند که دما مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده و کلید دستیابی به بالاترین کیفیت محصول نهایی در استفاده از تاثیر متقابل پارامترهای فرآیندی است. در سایر روش‌های HAISF یکنواخت ورق، سیستم آزمایشگاهی همواره دارای یک منبع

در رابطه با بهبود شکل‌پذیری ورق مورد مطالعه این پژوهش (آلومینیوم AA6061)، فرآیند شکل‌دهی تدریجی داغ با استفاده از حرارت‌دهی نقطه‌ای ناتوان بوده است. وحدانی و همکاران^[6] تاثیر استفاده از روانکارهای مختلف بر شکل‌پذیری ورق‌های AA6061، DC01 و Ti-6Al-4V را تحت فرآیند LEHIF در گام‌های متفاوت، سرعت تغذیه‌های مختلف و شدت جریان‌های مختلف با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوشی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که عمق شکل‌پذیری به شدت جریان و نوع روانکار بیشتر از سایر پارامترها وابسته است. علاوه بر آن، حداکثر ارتفاع قابل دست‌یابی در شکل‌دهی ورق AA6061 در شرایط بهینه مخروطی با زاویه دیواره ۶۰ درجه و عمق ۹/۱۴ میلی‌متر گزارش شد (۳۷٪ بهبود شکل‌پذیری).

وحدانی و همکاران در مقاله‌ای دیگر^[16]، تاثیر انواع روانکار گرافیت، مولیبدن‌دی‌سولفید و گریس آنتی‌سبز بر پایه مس بر کیفیت سطح و شکل‌پذیری ورق Ti-6Al-4V را در گام‌های عمودی، سرعت پیش‌روی و شدت جریان‌های مختلف مطالعه کردند. آنها اشاره داشتند که استفاده از روانکارهای پودر گرافیت و گریس آنتی‌سبز بر پایه مس منجر به بیشترین شکل‌پذیری و بهترین کیفیت سطح می‌شوند. امینی‌نجف‌آبادی و قایی^[17] با استفاده از ابزاربندی مشابه با تحقیق وحدانی و همکاران^[6]، اثر پارامترهای فرآیندی ضخامت ورق، گام عمودی و روانکار را بر روی کیفیت سطح، دقت ابعادی و سختی قطعاتی از جنس Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش کردند که حضور روانکار پودری مولیبدن‌دی‌سولفید و کاهش گام عمودی باعث بهبود چشم‌گیر کیفیت سطح شد.

با بررسی دقیق سیستم‌های آزمایشگاهی مختلف مورد استفاده در گرمایش یکنواخت ورق، بهترین آنها از لحاظ کارایی و هزینه، گرمایش ورق با استفاده از کوره حرارتی تشخیص داده شد و مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ایجاد کوره حرارتی کاربردی با کمترین هزینه، بالاترین دقت اندازه‌گیری و مطمئن‌ترین روش کنترل دما، طراحی منحصربه‌فردی به‌کار گرفته شد. علاوه بر این، با توجه به این نکته که پژوهشی بر روی ISF گرم یکنواخت ورق AA6061 صورت نگرفته است، تلاش بر آن شد تا مطالعه دقیقی بر روی تمامی جوانب فرآیندی آن انجام شود. از مهم‌ترین اهداف این پژوهش، می‌توان ارتقای شکل‌پذیری ورق AA6061 را نام برد. پارامترهای مهم فرآیندی شامل دما، گام عمودی، روانکار، زاویه دیواره و سرعت پیش‌روی نیز به‌عنوان ورودی‌های ISF در نظر گرفته شده و تاثیرشان بر شکل‌پذیری بررسی شد.

آزمایش تجربی

از گرده‌های آلومینیومی AA6061 با ضخامت یک و قطر ۱۵ میلی‌متر در شکل‌دهی SPIF استفاده شد. خواص مکانیکی و فیزیکی ورق یادشده به‌ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

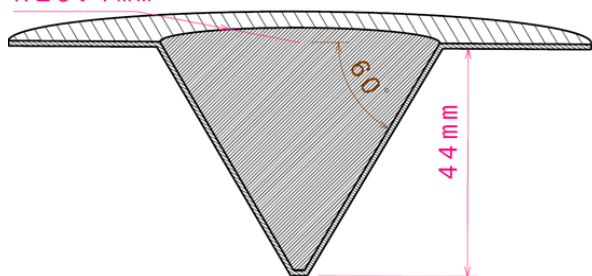
گرمایی است و گرما از طریق یکی از حالت‌های انتقال حرارت (تابش، رسانش و همرفت) به ورق القا می‌شود. گیلدوس و همکاران^[4]، اثر گرمایش با استفاده از دمش هوای گرم بر دقت هندسی نمونه‌هایی از جنس AA5182-0 و اشکال با زاویه دیواره کم را در دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که افزایش دما با کاهش اختلاف تنش در سطح بیرونی و داخلی قطعه، و همچنین کاهش کارسختی موجب کاهش برگشت فنری می‌شود. /رتیز و همکاران^[10]، به‌منظور گرمایش ورق Ti-6Al-4V به‌صورت یکنواخت، از المنت‌های حرارتی بر روی دیواره‌ها و همچنین کف قالب استفاده کردند. آنها با استفاده از روش آزمون و خطا دریافتند که با کاهش نرخ افزایش دما در قالب، ورق از یکنواختی دمای بیشتری برخوردار خواهد بود و در نتیجه، اعوجاج‌های هندسی پیش از عملیات شکل‌دهی کاهش یافته و برگشت فنری نیز کاهش می‌یابد. ضمناً اشاره داشتند که کنترل نحوه خنک‌شدن نمونه نیز می‌تواند اعوجاج در حین خنک‌کاری و همچنین تنش‌های پسماند ناشی از گیربندی را کاهش دهد. از دیگر نکات مورد اشاره نقش مهم خوردگی نفوذی در حین استفاده از یک ابزار صلب و خراشیده‌شدن سطح قطعه و نشست آن بر سطح ابزار بوده است. خزعلی و فرشته‌صنّعی^[12] اثر پارامترهای دمای فرآیند، گام عمودی و قطر ابزار بر روی نمودار حد شکل‌دهی، برگشت فنری، عمق کشش، دمای نهایی قطعه و توزیع ضخامت در فرآیند SPIF گرم یک ورق آلیاژ Ti-6Al-4V را با استفاده از آزمون شیار و در حضور روانکار OKS280 مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش قطر ابزار و گام عمودی شکل‌پذیری افزایش و با زیادشدن دما، برگشت فنری کاهش می‌یابد. آمبروجیو و همکاران^[9]، اثر پارامترهای اصلی فرآیندی را بر روی شکل‌پذیری آلیاژ AZ31 منیزیم به‌صورت تجربی و با استفاده از گرمایش ورق با نوارهای گرمایشی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که پارامترهای دما و عمق گام به‌طور قابل توجهی بر میزان شکل‌پذیری تاثیر دارد، در صورتی که اثر قطر ابزار قابل چشم‌پوشی است. /آزود و همکاران^[15]، اثر روانکارهای مختلف (سه نوع گریس و دو نوع روغن) را بر روی کیفیت سطح، نیروهای شکل‌دهی و دقت هندسی دو نوع ورق آلومینیوم AA1050 و فولاد DP780 در یک فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای مطالعه کردند. آنها دریافتند که کیفیت سطح قطعات دو جنس سخت (فولاد) و نرم (آلومینیوم) رفتار کاملاً متفاوتی را از خود نشان می‌دهد. به‌طوری که کیفیت سطح ورق آلومینیومی به‌طور کلی بعد از شکل‌دهی کاهش می‌یابد ولی در مورد فولاد این طور نیست. در رابطه با فلزات سخت‌تر روانکار با گران‌روی پایین‌تر کیفیت سطح بهتری (و بالعکس) را به‌دست می‌دهند. طبق نتایج آنها، روغن SAE-30 به‌عنوان مناسب‌ترین روانکار (برای آلومینیوم) معرفی شد، که اندازه‌گیری‌های کیفیت سطح، پیش و پس از انجام فرآیند، مقادیر به‌ترتیب ۲۰۵٪ و ۸۷۳٪ میکرومتر را نشان دادند.

پارامتر	توضیحات
جنس ورق	AA6061
چگالی (g/cm^3)	۲/۷
هدایت حرارتی (W/m-K)	۱۶۷

پارامتر	توضیحات
جنس ورق	AA6061
ضریب یانگ (GPa)	۷۴/۲
تنش تسلیم (MPa)	۳۴۹/۲
تنش حد نهایی (MPa)	۳۸۱/۱
ضریب پواسون	۰/۳۴
ازدیاد طول (%)	۵/۴۷
یکنواخت شکست	۶/۹۷

این زاویه به عنوان زاویه بحرانی دیواره در نظر گرفته شد. مخروط ناقص طراحی شده برای شکل نهایی آزمون‌های تجربی در شکل ۲ نشان داده شده است. از مسیر ابزار ماریپیچ استفاده شد. با توجه به مشاهدات تجربی محل پارگی در این مسیر برخلاف مسیر ابزار ارتفاع ثابت که در محل نفوذ ابزار به داخل ورق است، می‌تواند در هر قسمتی از مسیر اتفاق بیفتد. لذا در طی انجام فرآیند، بازرسی چشمی و سمعی انجام شد تا در لحظه پارگی ورق از ادامه فرآیند جلوگیری به عمل آید. بدین صورت که با تشخیص هر گونه ترک بر سطح ورق و یا شنیدن صدای پارگی، فرآیند متوقف شده و ارتفاع شکست، از روی شماره خطی که برنامه در آن متوقف شده بود، خوانده و ثبت شد. ضمناً تلاش شد که نقطه آغازین رشد ترک، با مقایسه میان شبیه‌سازی حرکت ابزار در نرم‌افزار سیمکو و محل پارگی ورق در عمل، با دقت بالایی ثبت و گزارش شود.

R 26.4 mm



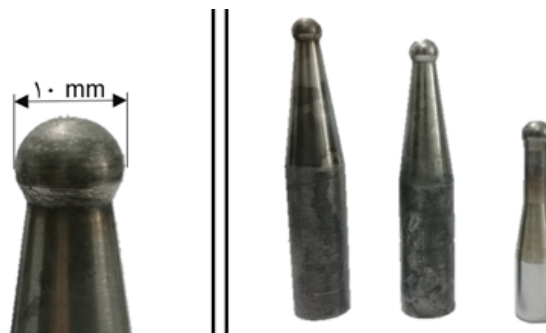
شکل (۲) ابعاد مخروط ناقص طراحی شده جهت آزمون‌های تجربی با توجه به زاویه بحرانی دیواره به دست آمده

تجهیزات شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای گرم

ابزاربندی آزمایشگاهی و اجزای مختلف آن به ترتیب در شکل ۳، شکل‌های ۴- الف و ۴- ب نشان داده شده است. گرده اولیه بر روی صفحه پشتیبان قرار گرفته و با استفاده از ورق‌گیر در جایگاه خود تثبیت شد. صفحه پشتیبان از جنس CK45، به ضخامت ۱۵ و دارای سوراخی با قطر ۶۰ میلی‌متر بود. قالب با استفاده از دو المنت حرارتی سرامیکی بیرونی و داخلی نشان داده شده در شکل‌های ۵- الف و ۵- ب، به ترتیب با توان‌های ۲۰۰۰ و ۸۰۰ وات، گرم شده و به تبع آن، طی فرآیند انتقال حرارت هدایتی، ورق نیز گرم شد. شایان ذکر است که المنت داخلی، علاوه بر گرم کردن دیواره قالب، با افزایش دمای هوای محبوس در محفظه قالب (هوای محبوس زیر ورق)، به بالارفتن دمای ورق و همچنین یکنواخت شدن آن در مساحت گرده از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی نیز کمک کرد. به منظور کاهش هدررفت انرژی حرارتی به هوای محیط، از طریق دیواره‌ها و ورق‌گیر، عایق‌هایی از جنس پشم شیشه و پنبه نسوز به ترتیب مطابق شکل‌های ۶- الف و ۶- ب بر روی مجموعه قالب قرار گرفت. ضمناً تا پیش از آغاز فرآیند نیز سطح ورق، با توجه به ضریب انتقال حرارت بالای آلومینیوم، با استفاده از پشم شیشه پوشانده شد.

SPIF دما بالا

به منظور بررسی فرآیند و پارامترهای موثر بر آن، شکل هدف، مخروط‌هایی با زاویه دیواره، قطر دایره اولیه و عمق مشخص در نظر گرفته شد. متغیرهای فرآیندی ابعاد اولیه نمونه، ضخامت ورق و قطر ابزار جزء متغیرهای ثابت و روانکار، دمای ورق، گام عمودی ابزار و نرخ پیش‌روی ابزار پارامترهای متغیر در نظر گرفته شدند. در تمامی آزمون‌های صورت گرفته از ابزار سرکروی با قطر ۱۰ میلی‌متر مطابق شکل ۱ استفاده شد. لازم به ذکر است که سرعت دورانی ابزار صفر در نظر گرفته شد؛ چرا که دوران ابزار در حین فرآیند می‌تواند باعث افزایش دما به صورت موضعی و همچنین پس‌زدن روانکار پودری و در نتیجه عدم قرارگیری مناسب روانکار در فاصله میان ابزار و ورق شود.



شکل (۱) ابزار سرکروی از جنس VCN150 با قطر ۱۰ میلی‌متر

در فرآیند یادشده، شکل‌پذیری به صورت عمق قابل دسترس از مخروط عاری از هر گونه پارگی با زاویه دیواره مشخص تعریف شد. به منظور تعیین زاویه بحرانی دیواره، آزمون‌هایی در دمای اتاق، گام عمودی یک میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در غیاب روانکار تحت زوایای دیواره ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه انجام شد و با توجه به اُفت ناگهانی شکل‌پذیری در زاویه دیواره ۶۰ درجه،

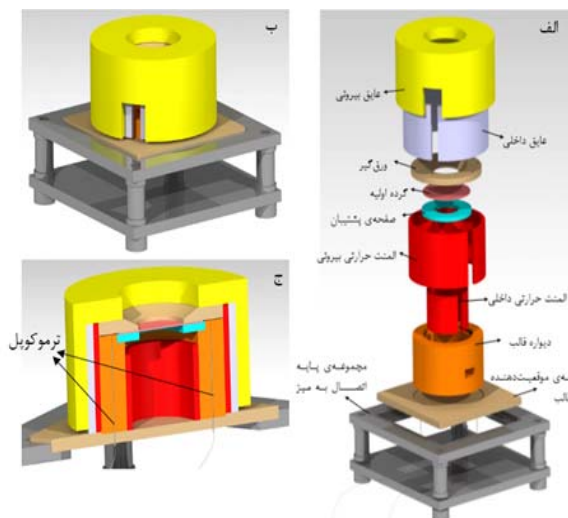


شکل ۶ (الف) عایق پشم شیشه (عایق بیرونی)، (ب) عایق پنبه‌نسوز مورد استفاده در قالب (عایق داخلی)

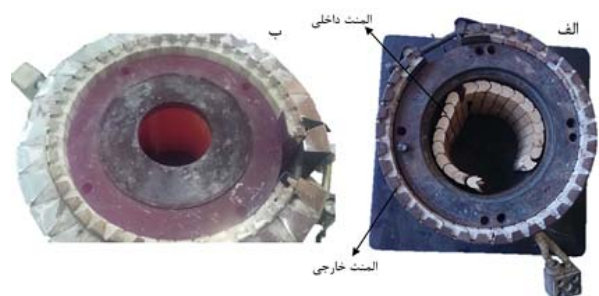
اندازه‌گیری و کنترل دما با استفاده از دو ترموکوپل سوزنی تیپ کا (K-Type) که از زیر صفحه موقعیت‌دهنده، به صورت انطباق فشاری در عمق دیواره قرار گرفته بودند، صورت پذیرفت. بدین ترتیب با قرارگیری ترموکوپل‌ها در عمق دیواره قالب، دمای قالب با دقتی بسیار بالا، همواره تحت کنترل بود. از طرفی دیگر با قرارگرفتن دو ترموکوپل در دو نقطه مخالف یکدیگر، از یکنواخت‌بودن دما در مساحت قالب نیز می‌شد تا حد مطلوبی اطمینان حاصل کرد (شکل ۴-ج). یکنواخت‌بودن دمای دیواره قالب، با توجه به تقارن حرارت‌دهی و همچنین عایق‌کاری در راستای شعاعی، یکنواختی دما در ورق را به دست داد. در فرآیندهای SPIF گرم انجام‌شده، دمای هدف، بر روی هر کدام از کنترل‌رهای متصل به هر المنت که در شکل ۳-الف قابل مشاهده است به صورت جداگانه تعیین شده و کنترلر، دمای خوانده‌شده توسط ترموکوپل متصل به خود را با دمای تنظیمی مقایسه می‌کرد؛ اگر دمای تنظیمی بالاتر از دمای ترموکوپل بود، دستور اتصال جریان توسط ترموستات به رله ارسال می‌شد و در نتیجه رله (مانند یک کلید قطع و وصل است) جریان را به المنت تحت کنترل وصل کرده و دمای المنت به سرعت بالا می‌رفت. با نزدیک شدن دمای خوانده‌شده توسط ترموکوپل به دمای تنظیمی با توجه به عدد پسماند تعیین‌شده در کنترلر، المنت خاموش شد. پسماند به نوعی با ایجاد یک رواداری مجاز در اطراف دمای تنظیمی از خاموش و روشن شدن مداوم منبع گرمایی جلوگیری می‌کند. در نتیجه ورق به آرامی همراه با قالب گرم شد. به محض دستیابی به دمای تنظیم‌شده بر روی نمایشگرها، المنت تحت فرمان هر کدام از ترموکوپل‌ها خاموش شده تا دما در محدوده دقیقی (رواداری ۲ درجه سانتی‌گراد) از دمای تنظیم‌شده ثابت بماند. در صورت سرد شدن قالب در طول فرآیند نیز با روشن شدن مجدد المنت‌ها، دما، باری دیگر در محدوده تنظیمی قرار گرفت. در نتیجه تمامی آزمون‌ها در شرایطی صورت گرفت که دو نمایشگر دما، دمای یکسانی با حداکثر اختلاف ۲ درجه سانتی‌گراد را نشان دادند. ضمناً در هنگام تعویض ورق به منظور انجام آزمون جدید، پس از اعلام رسیدن به دمای هدف توسط کنترل‌رهای دما، به مدت ۱۰ دقیقه، از آغاز عملیات شکل‌گیری خودداری شد تا از هم‌دماشدن گرده با مجموعه قالب اطمینان حاصل شود. سپس



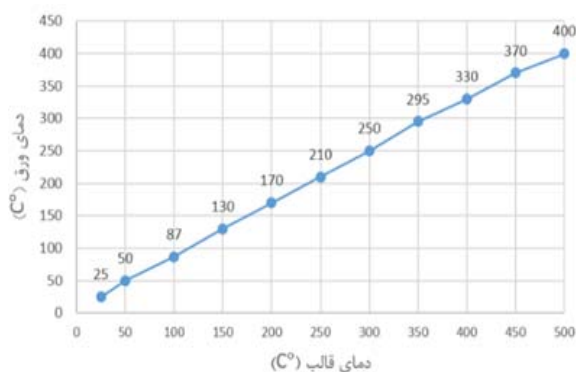
شکل ۳ (الف) مجموعه قالب، (ب) نمایشگر کنترلر دمایی مربوط به هر المنت سوار بر مدار کنترل دما، (ج) دستگاه فرز cnc



شکل ۴ (الف) شماتیک قالب به همراه اجزای تشکیل‌دهنده آن، (ب) شماتیک قالب مونتاژ شده، (ج) نمای مقطع قالب و نحوه قرارگیری ترموکوپل‌ها در دیواره



شکل ۵ (الف) نحوه قرارگیری المنت‌های داخلی و خارجی بر روی قالب در حالت سرد، (ب) قالب گرم‌شده توسط المنت‌های داخلی و خارجی



نمودار ۱) منحنی رابطه میان دمای خوانده شده توسط ترموکوپل ها و دمای واقعی ورق

جدول ۳) پارامترهای مورد مطالعه و سطوح انتخابی برای هر کدام از آنها در طراحی آزمایش تاگوچی

پارامتر	سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
دما (°C)	۱۰۰	۲۵۰	۴۰۰
روانکار	گرافیت	مولیبدن دی سولفید	آنتی سیز بر پایه مس
گام عمودی (mm)	۰/۳	۰/۶	۱
پیشروی (mm/min)	۳۰۰	۶۰۰	۹۰۰

رابطه ۱ که بیانگر بزرگترین مناسب است، مورد استفاده قرار گرفت. در هر آزمایش همواره بالاترین نسبت سیگنال به نویز مطلوب است. خروجی اندازه گیری شده در این دسته آزمایش های اولیه، عمق شکل پذیری (ارتفاع پارگی) است که در گروه هر چه بیشتر باشد، بهتر است قرار می گیرد. در رابطه ۱، n بیانگر شماره آزمایش و y ویژگی کیفی را بیان می دارد.

$$SN_s = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{i2}\right) \quad (1)$$

برای این کار، از نرم افزار مینی تب ۱۷ استفاده شد. روش تاگوچی برای چهار فاکتور ورودی سه سطحه، آرایه متعامد L_9 را پیشنهاد می کند. بنابراین نه آزمون، طبق سطوح آرایه شده در جدول ۴ انجام شد. هر کدام از آزمون ها به منظور افزایش اعتماد پذیری داده ها، با دوبار تکرار انجام شدند.

پس از انجام آزمایش های آرایه شده توسط طراحی آزمایش تاگوچی و بررسی نتایج حاصل از آن، آزمایش های دیگری مطابق جدول ۵ به منظور بررسی دقیق تر سه پارامتر فرآیندی دما، نوع روانکار و گام عمودی طراحی شد. همان طور که مشاهده می شود، آزمایش های شماره ۴، ۶ و ۱۰ مشابه یکدیگر هستند. لازم به ذکر است که تمامی آزمون ها با حداقل دو بار تکرار انجام پذیرفتند.

گاهی اوقات نتایج به دست آمده از آزمون در زاویه دیواره ۶۰ درجه پاسخ مورد نیاز برای تحلیل مناسب یک متغیر را به دست نمی داد؛ که خود ناشی از وابستگی شدید فرآیند به متغیری دیگر و در نتیجه افزایش زاویه بحرانی دیواره بود. در نتیجه در مواردی، با هدف مطالعه جامع تر فرآیند، آزمون هایی در زوایای ۶۵ و ۷۰ درجه نیز صورت پذیرفت.

عایق قرار گرفته بر روی ورق را برداشته و ابزار سرکروی با سطح ورق مماس شد. در ادامه با ارسال برنامه نوشته شده برای حرکت مارپیچی ابزار به دستگاه CNC سه محوره (شکل ۳- ج)، عملیات شکل دهی آغاز شده و در صورت استفاده از روانکار نیز ماده روانکار به صورت پیوسته به ناحیه شکل دهی توسط اپراتور تغذیه شد. مسیر حرکتی ابزار نیز با استفاده از استخراج مختصات نقاط یک منحنی مارپیچ از نرم افزار کتیا (CATIA) به دست آمد.

دمای ورق به صورت مستقیم اندازه گیری نشد. چرا که اندازه گیری و کنترل این دما در حین عملیات شکل دهی، مستلزم استفاده از تجهیزات گران قیمت بوده و امری دشوار است. لذا به منظور کاهش هزینه و به طور همزمان حفظ دقت در کار، دمای ورق به صورت تابعی از دمای قالب اندازه گیری شد. در اندازه گیری های صورت گرفته توجه شد که در هر ایستگاه مشخص شده (گام های ۵۰ درجه سانتی گراد)، خواندن دمای ورق پس از مکث ۱۰ دقیقه ای صورت گیرد. ضمناً روی ورق نیز با استفاده از پشم شیشه پر شده تا هدررفت انرژی به هوای مجاور توسط ورق آلومینیومی به حداقل برسد. پس از رسیدن دمای قالب به دماهای تنظیمی، ترموکوپل نشان داده شده در شکل ۷ بر روی سطح ورق به صورت دستی قرار گرفته و پس از زمان اندکی، دمای ثابتی را نشان می دهد. دمای خوانده شده توسط ترموکوپل به صورت تابعی از دمای نشان داده شده توسط نمایش گرهای دمایی در نمودار ۱ نشان داده شده است.

به منظور بررسی اولیه میزان تاثیر پارامترهای مختلف روانکار، دمای ورق، گام عمودی ابزار و نرخ پیشروی ابزار بر عمق شکل پذیری (عمق پارگی)، از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شد. سطوح پارامترها مطابق جدول ۳ تنظیم شد. با توجه به عیوب سطحی ایجاد شده در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی گراد، این دما به عنوان حداکثر دما انتخاب شد.



شکل ۷) ترموکوپل مورد استفاده برای اندازه گیری دمای ورق

ابزار، شکل می‌گیرد در حقیقت ازدیاد تنش‌های کششی در دیواره ورق عامل ترک هستند. این عیب، معمول‌ترین عیب به‌وجودآمده در هنگام استفاده از روانکار پودری است. تجمع پودر روانکار، مطابق شکل ۱۱ تنها یک سوراخ بر روی سطح قطعه‌کار ایجاد خواهد کرد (پارگی نقطه‌ای). در حالتی دیگر، اگر نیروی ورق‌گیر به‌درستی تنظیم نشده باشد، ورق به‌سمتی جابه‌جا می‌شود. در این صورت، بر اثر پدیده برش مطابق شکل‌های ۱۲- الف و ۱۲- ب می‌توان شاهد پارگی در ناحیه نزدیک به فلنج ورق بود. در شکل ۱۲- ج می‌توان کشیدگی ورق به سمت ناحیه یک و در نتیجه کوچک‌شدن شعاع شکل‌دهی در آن و بروز پدیده برش را دید. ترک نیز در ناحیه‌ای که در آن برش رخ می‌دهد آغاز به رشد می‌کند. مهم‌ترین مشخصه و تفاوت این نوع ترک در محل شکل‌گیری آن است (بسیار نزدیک به صفحه نگه‌دارنده‌ی ورق).



شکل ۸) اعوجاج ناشی از پیچش در ورق (آزمون در زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۰/۶ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و بدون روانکار صورت گرفته است)



شکل ۹) ترک پیش‌رونده پدیدار شده در سطح قطعه (آزمون در زاویه دیواره ۷۰ درجه، دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۰/۶ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار گرافیت صورت گرفته است)



شکل ۱۰) ترک پایدار مشاهده‌شده در سطح داخلی و بیرونی قطعه (آزمون در زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۰/۶ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار مولیبدن‌دی‌سولفید صورت گرفته است)

جدول ۴) آزمون‌های ارایه‌شده توسط طراحی آزمایش تاگوچی

آزمون	دما (°C)	روانکار	گام عمودی (mm)	پیش‌روی (mm/min)
۱	۱۰۰	گرافیت	۰/۳	۳۰۰
۲	۱۰۰	آنتی‌سبز بر پایه مس	۰/۶	۶۰۰
۳	۱۰۰	مولیبدن‌دی‌سولفید	۱	۹۰۰
۴	۲۵۰	مولیبدن‌دی‌سولفید	۰/۳	۶۰۰
۵	۲۵۰	گرافیت	۰/۶	۹۰۰
۶	۲۵۰	آنتی‌سبز بر پایه مس	۱	۳۰۰
۷	۴۰۰	آنتی‌سبز بر پایه مس	۰/۳	۹۰۰
۸	۴۰۰	مولیبدن‌دی‌سولفید	۰/۶	۳۰۰
۹	۴۰۰	گرافیت	۱	۶۰۰

جدول ۵) آزمون‌های طراحی‌شده برای بررسی تاثیر پارامترهای فرآیندی

نوع آزمون	شماره آزمون	دما (°C)	روانکار	پارامتر	
				گام عمودی (mm)	پیش‌روی (mm/min)
تاثیر دما	۱	۲۵	گرافیت	۰/۶	۶۰۰
	۲	۱۰۰	گرافیت	۰/۶	۶۰۰
	۳	۲۵۰	گرافیت	۰/۶	۶۰۰
	۴	۴۰۰	گرافیت	۰/۶	۶۰۰
تاثیر نوع روانکار	۵	۴۰۰	-	۰/۶	۶۰۰
	۶	۴۰۰	گرافیت	۰/۶	۶۰۰
	۷	۴۰۰	مولیبدن دی‌سولفید	۰/۶	۶۰۰
	۸	۴۰۰	آنتی‌سبز بر پایه مس	۰/۶	۶۰۰
تاثیر گام عمودی	۹	۴۰۰	گرافیت	۰/۳	۶۰۰
	۱۰	۴۰۰	گرافیت	۰/۶	۶۰۰
	۱۱	۴۰۰	گرافیت	۱	۶۰۰

تفسیر نتایج

عیوب مشاهده‌شده در ورق در حین فرآیند

در حین SPIF گرم ورق آلومینیومی عیوب مختلفی از جمله پیچش ورق، ترک پیش‌رونده، ترک پایدار، پارگی نقطه‌ای و پارگی در ناحیه شعاع‌دار صفحه پشتیبان مشاهده شد. در غیاب روانکار، اصطکاک شدید میان ابزار و ورق، ورق را در راستای حرکتی ابزار اندکی می‌کشد و نتیجتاً اعوجاجی از جنس پیچش در سطح ورق مطابق شکل ۸ ایجاد می‌شود. ترک پیش‌رونده، در محل تماس میان ابزار و روانکار رخ می‌دهد و پس از پدیدار شدن، با هر گونه ادامه فرآیند مطابق شکل ۹ رشد کرده و تا مرز پیوستن از دو طرف ترک به یکدیگر و جدا شدن یک تکه از قطعه‌کار ادامه می‌یابد. ترک پایدار برخلاف نوع پیش‌رونده آن، با ادامه فرآیند شکل‌دهی رشد نمی‌کند و برنامه همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است تا انتها قابلیت اجرا را دارد. این نوع ترک، معمولاً بر اثر تجمع پودر روانکار بین ورق و ابزار شکل می‌گیرد. بعضاً به محض اعمال نیرو بین روانکار و ورق، این نوع پارگی پدیدار می‌شود و گاهی اوقات نیز مدت‌ها پس از عبور ابزار از نقطه مورد نظر می‌توان شاهد آن بود. در حالتی که ترک پس از عبور

دیواره ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۳/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۹۰۰ میلی‌متر و در حضور روانکار آنتی‌سبز بر پایه مس؛ ۱۳- ح، آزمون ۸ با زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۶/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار مولیبدن‌دی‌سولفید؛ ۱۳- ط، آزمون ۹ با زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی یک میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار گرافیت هستند. عمق پارگی و همچنین نسبت سیگنال به نویز در تحلیل تاگوچی در آزمون‌های جدول ۴، در جدول ۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ قطعات شکل‌داده‌شده در طراحی آزمایش تاگوچی مطابق جدول ۴ برای: الف) آزمون ۱، ب) آزمون ۲، ج) آزمون ۳، د) آزمون ۴، ه) آزمون ۵، و آزمون ۶، ز) آزمون ۷، ح) آزمون ۸، ط) آزمون ۹

جدول ۶ عمق نهایی قطعه و نسبت سیگنال به نویز طراحی آزمایش تاگوچی

شماره آزمون	عمق نهایی قطعه (mm)	نسبت سیگنال به نویز
۱	۷/۸۹	۱۷/۹۴
۲	۱۱/۳۲	۲۱/۴۵
۳	۱۰/۳۴	۲۰/۲۹
۴	۱۱/۸۰	۲۱/۴۴
۵	۱۲/۵۰	۲۱/۹۴
۶	۱۳/۷۲	۲۲/۷۵
۷	۴۴	۳۲/۸۷
۸	۴۴	۳۲/۸۷
۹	۴۴	۳۲/۸۷

طبق نتایج به‌دست‌آمده دما را می‌توان تنها عامل موثر بر عمق شکل‌پذیری در آزمون‌های انجام‌شده بیان کرد اما این نتیجه‌گیری درستی نیست. چرا که در مجموعه آزمون‌های انجام‌شده در طراحی آزمایش، با توجه به تعداد محدود آزمون‌ها و وابستگی بالای شکل‌پذیری به دما، اثر سایر پارامترها نادیده گرفته شد. لذا به‌منظور تعیین نحوه تاثیرگذاری پارامترها بر شکل‌پذیری مجموعه دیگری از آزمون‌ها طراحی و عامل دیگری از جمله زاویه دیواره نیز در بررسی‌ها لحاظ شد.



شکل ۱۱ ترک پایدار مشاهده‌شده در سطح داخلی و بیرونی قطعه (آزمون در زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۶/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار گرافیت صورت گرفته است)



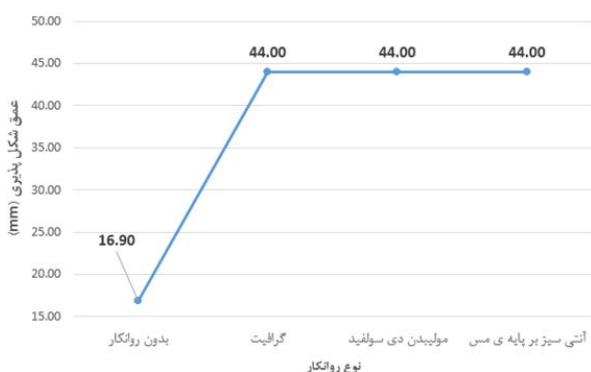
شکل ۱۲ الف) پارگی زودرس مشاهده‌شده در ناحیه نزدیک به فلنج در سطح خارجی ورق، ب) پارگی در ناحیه نزدیک به فلنج در سطح داخلی ورق، ج) کشیدگی ورق به یک سمت و بروز پارگی در ناحیه شماره ۱ (آزمون در زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۶/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار گرافیت صورت گرفته است)

نتایج طراحی آزمایش تاگوچی

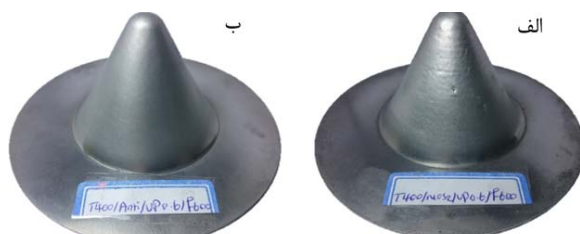
قطعات شکل‌داده‌شده در طراحی آزمایش تاگوچی در شکل ۱۳ قابل مشاهده هستند. که شکل‌های ۱۳- الف، آزمون ۱ با زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۳/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار گرافیت؛ ۱۳- ب، آزمون ۲ با زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۶/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار آنتی‌سبز بر پایه مس؛ ۱۳- ج، آزمون ۳ با زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی یک میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۹۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار مولیبدن‌دی‌سولفید؛ ۱۳- د آزمون ۴ با زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۳/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار مولیبدن‌دی‌سولفید؛ ۱۳- ه، آزمون ۵ با زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۶/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۹۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار گرافیت؛ ۱۳- و، آزمون ۶ با زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی یک میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در حضور روانکار آنتی‌سبز بر پایه مس؛ ۱۳- ز، آزمون ۷ با زاویه

تأثیر روانکار بر شکل‌پذیری

روانکار با کاهش میزان اصطکاک بین ورق و ابزار از نازک‌شدگی ورق جلوگیری می‌کند و در نتیجه شکل‌پذیری ورق افزایش خواهد یافت. به‌طوری که مطابق نمودار ۳، استفاده از روانکار در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد عمق شکل‌پذیری ورق را از ۱۶/۹ (بدون روانکار) به ۴۴ میلی‌متر (در حضور روانکار پودر گرافیت) افزایش داد که به‌ترتیب در شکل‌های ۸، ۱۴-د، ۱۵-الف و ۱۵-ب مشاهده می‌شود. البته با توجه به نقش موثرتر دما در شکل‌پذیری ورق، با تغییر در نوع روانکار مورد استفاده، تفاوتی در عمق شکل‌پذیری در زاویه دیواره ۶۰ درجه ایجاد نشد و در تمامی حالت‌ها ورق تا ارتفاع نهایی تعریف‌شده در برنامه، شکل گرفت. نکته مهم دیگر، با مقایسه میان کیفیت سطح بیرونی قطعات در شکل‌های ۱۴-د، ۱۵-الف و ۱۵-ب روشن می‌شود. به‌گونه‌ای که با مشاهده این شکل‌ها، تأثیر روانکار بر کیفیت قطعه تولیدی را می‌توان دید. در شکل ۱۵-الف عیوب مشاهده‌شده در شکل‌دهی با استفاده از روانکار گرافیت، باری دیگر در حضور روانکار مولیبدن دی‌سولفید نیز رخ داد. در صورتی که نمونه شکل‌داده‌شده با استفاده از روانکار گریسی آنتی‌سبز بر پایه مس مطابق شکل ۱۵-ب عاری از هر گونه عیب در سطح خارجی خود است. زبری سطح داخلی این قطعات نیز به‌ترتیب برابر با ۳/۹۵، ۳/۰۷، ۲/۵۱ و ۳/۳۷ میکرومتر است.



نمودار ۳ منحنی تأثیر نوع روانکار بر عمق شکل‌پذیری در زاویه ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۶/۱ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در حالت‌های مختلف روانکاری

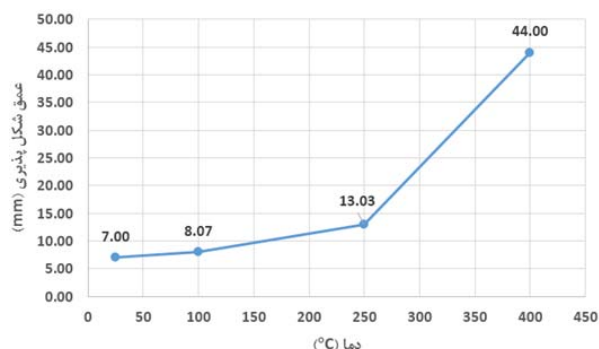


شکل ۱۵ نمونه‌های شکل‌داده‌شده در زاویه ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۶/۱ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از روانکار: الف) مولیبدن دی‌سولفید، ب) آنتی‌سبز بر پایه مس

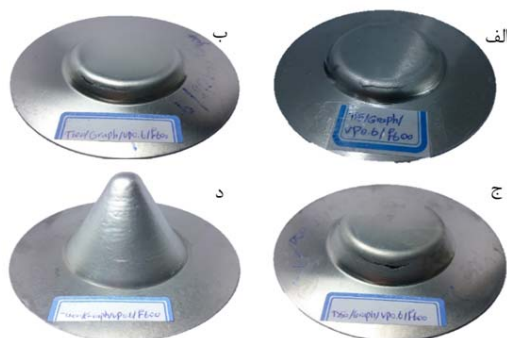
به‌منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر روانکار بر روی عمق شکل‌پذیری سه آزمون دیگر در زاویه دیواره‌ی بالاتر (۶۵ درجه) طراحی شد. تنها

تأثیر دما بر شکل‌پذیری

مطابق نمودار ۲ می‌توان دریافت که به‌طور کلی عمق شکل‌پذیری ورق آلومینیومی با افزایش دما افزایش می‌یابد. شکل‌پذیری، از دمای اتاق تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، با شیب کمی افزایش یافته و در دماهای بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، نرخ افزایش شکل‌پذیری شدت می‌گیرد. به‌گونه‌ای که از ۱۳/۰۳ میلی‌متر در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به ۴۴ میلی‌متر در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. به این دلیل که با افزایش دما، انرژی ناهم‌جایی‌ها برای حرکت‌های صعودی و لغزش افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه ناهم‌جایی‌ها مانع‌ها را راحت‌تر رد کرده و شکل‌پذیری آسان‌تر می‌شود. با گذرکردن از نیمی از دمای ذوب ماده (۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) و تغییرات در ریزساختار ماده از جمله کاهش چگالی ناهم‌جایی ناشی از تشدید پدیده تبلور مجدد دینامیکی و همچنین فعال‌شدن صفحات لغزشی بیشتر، شکل‌پذیری ماده دوچندان افزایش می‌یابد [19]. در دمای اتاق، ورق شکل‌پذیری پایینی را از خود نشان داد و مطابق شکل ۱۴-الف در ارتفاعات پایینی (۷ میلی‌متر) دچار پارگی شد. نمونه‌های شکل‌داده‌شده در دماهای ۱۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز به‌ترتیب در شکل‌های ۱۴-ب، ۱۴-ج و ۱۴-د مشاهده می‌شوند. در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ورق تا مقدار نهایی ارتفاع طراحی شده (۴۴ میلی‌متر) شکل گرفت؛ این نتیجه، نشان‌دهنده مقدار قابل توجه ۵۲۸٪ افزایش شکل‌پذیری نسبت به دمای اتاق است.



نمودار ۲ منحنی تأثیر دما بر عمق شکل‌پذیری در زاویه ۶۰ درجه، گام عمودی ۶/۱ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در حضور روانکار پودر گرافیت



شکل ۱۴ تأثیر دما بر عمق شکل‌پذیری در زاویه ۶۰ درجه، گام عمودی ۶/۱ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در حضور روانکار پودر گرافیت در دماهای الف) ۲۵، ب) ۱۰۰، ج) ۲۵۰، د) ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

نکته متمایزکننده این دسته از آزمون‌ها نسبت به آزمون‌های پیشین انجام شده، زاویه دیواره ۶۵ درجه بود. پس از انجام سه آزمون یادشده در زاویه دیواره ۶۵ درجه، استخراج ارتفاعات پارگی، مشخص شد که نوع روانکار تأثیر به‌سزایی بر عمق شکل‌پذیری ورق دارد. به‌گونه‌ای که مطابق نمودار ۴ با استفاده از روانکار آنتی‌سبز بر پایه مس، شکل‌دهی گرده آلومینیومی تا پایان برنامه مسیر ابزار (۴۴ میلی‌متر) ممکن شد. در ارتباط با روانکارهای مولیبدن‌دی‌سولفید و گرافیت نیز شکل‌پذیری ورق، اُفت شدیدی را از خود نشان داده و به‌ترتیب تا عمق‌های ۱۹/۲ و ۱۴/۶ میلی‌متر انجام شد. دلیل اختلاف شکل‌پذیری در حضور روانکارهای مختلف را می‌توان در توانایی روانکار در نفوذ به میان ابزار و ورق و عیوب ناشی از آن جستجو کرد. روانکار آنتی‌سبز بر پایه مس، دارای ذرات پودر مس پخش‌شده در گریس است و در نتیجه با چسبیدن به سطح ابزار، پودر مس لازم برای روانکاری را در ناحیه مورد نظر همواره حفظ می‌کند. ولی در مورد روانکارهای پودری، به‌دلیل عدم اتصال مناسب روانکار به ورق، با حرکت ابزار، ذرات روانکار به اطراف رانده می‌شوند. از طرف دیگر استفاده از روانکارهای مولیبدن‌دی‌سولفید و یا گرافیت به‌صورتی که ابزار در آن نیمه‌غرق باشد نتیجه مطلوبی نخواهد داشت و محصول با ترک‌های بسیاری همراه خواهد بود [20]. لذا تأمین همیشگی روانکار پودری لازم به ناحیه شکل‌دهی در طول فرآیند، امری دشوار است. البته روانکار مولیبدن‌دی‌سولفید با توجه به ریزش‌پذیری ذرات پودر آن نسبت به پودر گرافیت، نفوذ بالاتری داشته و در نتیجه به شکل‌پذیری بیشتری منجر می‌شود. عیوب سطحی ناشی از عملکرد ضعیف‌تر روانکارهای پودری در مقایسه با گریس می‌تواند دلیل اصلی شکل‌پذیری پایین‌تر ورق در حضور آنها باشد. به‌طور کلی می‌توان بیان داشت که روانکار آنتی‌سبز بر پایه مس، بهترین کیفیت سطح و بیشترین شکل‌پذیری را به‌طور همزمان به‌دست می‌دهد. این نکته مزیت دیگری از روش مورد استفاده در این فرآیند را روشن می‌سازد. در ادبیات تحقیق، وحدانی و همکاران [16]، علی‌رغم تأیید این روانکار برای دست‌یابی به بهترین کیفیت سطح، مشکل جرقه‌زنی ذرات مس را عامل محدودکننده شکل‌پذیری بیان کردند. در صورتی که این مشکل در روش ارایه‌شده رفع شده است. شایان ذکر است، در هیچ یک از آزمون‌های صورت‌گرفته ابزار دچار خوردگی نیز نشد.

تصاویر نمونه‌های یادشده در حضور روانکارهای آنتی‌سبز بر پایه مس، پودر مولیبدن‌دی‌سولفید، و پودر گرافیت به‌ترتیب در شکل‌های ۱۶- الف، ۱۶- ب و ۱۶- ج قابل مشاهده است.

تأثیر گام عمودی بر شکل‌پذیری

با کاهش گام عمودی، شکل‌دهی، تدریجی‌تر انجام می‌شود و در نتیجه عموماً کاهش گام عمودی، افزایش شکل‌پذیری را به همراه خواهد داشت [21]. اما نمودار استخراج‌شده از نتایج، در نمودار ۵ نشان می‌دهد که علی‌رغم این‌که در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، در گام‌های عمودی ۰/۶ و یک میلی‌متر، ورق تا بالاترین ارتفاع

تعریف‌شده در برنامه شکل‌گرفت، با کاهش عمق گام از ۰/۶ به ۰/۳ میلی‌متر، شکل‌پذیری ورق به‌طور چشم‌گیری کاهش یافت. به‌گونه‌ای که از ۴۴ در گام ۰/۶ میلی‌متر به ۱۳/۰۴ در گام یک میلی‌متر رسید. نمونه‌های شکل‌داده‌شده در گام‌های عمودی ۰/۳، ۰/۶ و یک میلی‌متر به‌ترتیب در شکل‌های ۱۷، ۱۴- د و ۱۳- ط قابل مشاهده است؛ بنابراین می‌توان اذعان داشت که کاهش گام عمودی همواره به معنای افزایش عمق شکل‌پذیری نیست و رابطه بین گام عمودی و عمق شکل‌پذیری دارای اکسترممی است.

دلایل محتمل عامل این پدیده را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: ۱- همپوشانی سطحی از ورق که ابزار در گام‌های متوالی طی می‌کند [16]. با کاهش بیش از اندازه گام، میزان این همپوشانی بالا رفته و در نتیجه یک سطح مشخص از ورق در گام‌های متوالی مکرراً تحت تنش‌های عمودی و اصطکاکی قرار گرفته و به تبع آن عیوب بیشتری در ماده شکل‌گرفته و پارگی، زودتر از موعد، نسبت به گام‌های عمودی بالاتر (به‌طور مثال گام عمودی ۰/۶ میلی‌متر) رخ می‌دهد.

۲- عبور مکرر ابزار از یک ناحیه یکسان از ورق و خوردگی بالاتر ورق [16].

۳- نیرویی که از ابزار به ورق بر اثر محبوس شدن پودر روانکار در میان ابزار و ورق وارد می‌شود. با افزایش ارتفاع مخروط شکل‌دهی‌شده، ابزار سرکروی در دایره کوچک‌تری حرکت می‌کند و پودر گرافیت در مواقعی فضای حرکت ابزار را محدود کرده و در نتیجه پرشدن ناحیه شکل‌دهی با پودر، ابزار نیروی ناگهانی شدیدی را به ورق وارد می‌کند و نیرو با توجه به شدت آن به شکل یک پارگی نقطه‌ای و یا یک ترک در دیواره ورق تخلیه می‌شود. ترک‌های ایجادشده نیز گاهی اوقات پایدار هستند و در برخی موارد دیگر رشد کرده و ورق دچار پارگی می‌شود.

به‌منظور تشخیص دلیل اصلی پارگی رخ‌داده در نمونه نشان‌داده‌شده در شکل ۱۷ کافی است به نتیجه آزمون نشان‌داده‌شده در شکل ۱۳- ز توجه شود. این آزمون نیز، در زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت پیش‌روی ۹۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و گام عمودی ۰/۳ میلی‌متر انجام شده ولی از روانکار غیرپودری آنتی‌سبز بر پایه مس بهره برد و تا انتهای برنامه و بدون هر گونه عیبی شکل گرفت. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در زاویه دیواره ۶۰ درجه، عامل اصلی پارگی، از نوع دسته سوم یاد شده در بالا است (تجمع روانکار پودری).

آزمونی دیگر به‌منظور بررسی امکان‌پذیری استفاده از روانکار پودری در گام‌های پایین انجام شد. این آزمون نیز در زاویه دیواره ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، گام عمودی ۰/۳ میلی‌متر و اما با استفاده از روانکار مولیبدن‌دی‌سولفید انجام شد. این آزمون با وجود پدیدارشدن عیوب پارگی‌های نقطه‌ای و همین‌طور ترک‌های پایدار در سطح ورق، مطابق شکل ۱۸ تا انتهای برنامه (۴۴ میلی‌متر) شکل گرفت. دلیل این نکته که ورق به مانند شکل‌دهی با روانکار گرافیت در



شکل ۱۷) نمونه شکل‌داده‌شده در زاویه ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، با استفاده از روانکار پودر گرافیت در گام عمودی ۳/۰ میلی‌متر



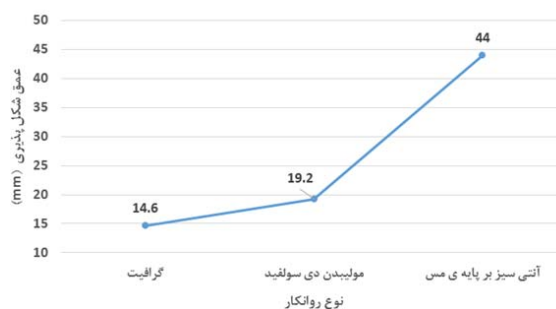
شکل ۱۸) عیوب مختلف مشاهده شده در شکل‌دهی ورق در زاویه ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۳/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از روانکار مولیبدن‌دی‌سولفید

به‌منظور بررسی دقیق‌تر نکته یادشده در مورد رابطه میان گام عمودی و عمق شکل‌پذیری در گام‌های پایین آزمون‌های جدیدی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و گام‌های عمودی مختلف ۳/۰، ۶/۰ و یک میلی‌متر ولی این‌بار در زاویه دیواره ۶۵ درجه طراحی شد. پس از استخراج نتایج آزمون‌های یادشده، همان‌طور که در نمودار ۶ نشان داده شده است، باری دیگر این نکته مشاهده می‌شود که با افزایش گام عمودی، عمق شکل‌پذیری ورق بالا رفته است. با این تفاوت که این‌بار با افزایش گام از ۶/۰ به یک میلی‌متر نیز عمق شکل‌پذیری بالا رفته است (از ۱۴/۶ به ۱۶/۹۵ میلی‌متر). با مقایسه میان این نتایج و نمونه مشابه در زاویه دیواره کمتر با پارامترهای فرآیندی یکسان می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه دیواره میزان حساسیت به گام‌های عمودی پایین افزایش می‌یابد. دلیل این نکته را می‌بایست در میزان همپوشانی عبورهای متوالی ابزار از یک ناحیه جست‌وجو کرد. لذا با توجه به شکل ۱۹ می‌توان رابطه ۲ را نوشت.

$$A = \frac{P}{\sin \alpha} \quad (2)$$

با توجه به رابطه ۲ می‌توان بیان داشت که میزان همپوشانی عبورهای متوالی ابزار از یک نقطه در دو گام متوالی، با افزایش گام عمودی، کاهش، و با افزایش زاویه دیواره، افزایش می‌یابد. لذا با افزایش زاویه دیواره، به‌منظور دستیابی به عمق شکل‌دهی بالاتر باید از گام‌های عمودی بالاتری نسبت به زاویه دیواره کمتر استفاده کرد. چرا که بدین صورت می‌توان از تجمع ذرات پودر بین

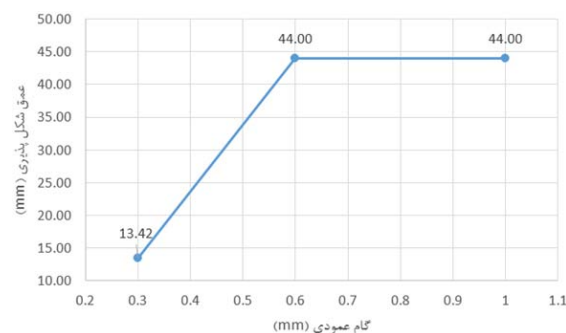
ارتفاعات پایین دچار پارگی نشد را می‌توان در ریزش‌بودن دانه‌های پودر مولیبدن‌دی‌سولفید جست‌وجو کرد. به‌عبارتی دیگر عامل اصلی پارگی ورق در گام‌های عمودی پایین (در صورت استفاده از روانکار پودری)، در واقع نازک‌شدگی ناشی از تجمع ذرات پودر روانکار بین ورق و ابزار است که در روانکار گرافیت (دانه درشت‌تر است) این پدیده بیشتر رخ داده و ورق به‌صورت موضعی نازک شده و پاره می‌شود. لذا می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که روانکارهای پودری به‌طور کلی در گام‌های پایین ناکارآمد هستند و برای حل این مشکل می‌بایست از انواع دیگر روانکارهای گریسی مانند آنتی‌سبز بر پایه مس و یا ابزارهای با سرکروی غلطان استفاده کرد.



نمودار ۴) منحنی تاثیر نوع روانکار بر عمق شکل‌پذیری در زاویه ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۶/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در حالت‌های مختلف روانکاری



شکل ۱۶) نمونه‌های شکل‌داده‌شده در زاویه ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، گام عمودی ۶/۰ میلی‌متر، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از روانکار: الف) آنتی‌سبز بر پایه مس، ب) مولیبدن‌دی‌سولفید، ج) گرافیت



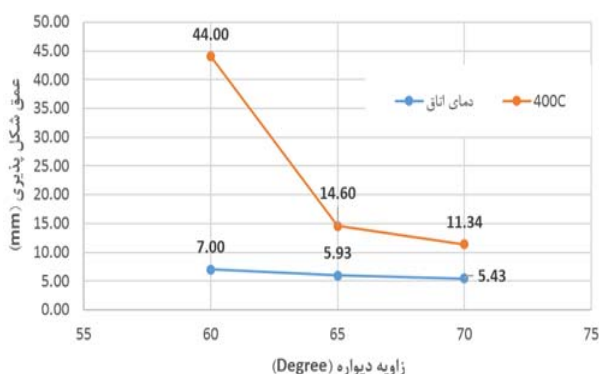
نمودار ۵) نمودار تاثیر گام عمودی بر عمق شکل‌پذیری در زاویه ۶۰ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از روانکار پودر گرافیت در گام‌های عمودی مختلف



شکل ۲۰) ترک استاتیک ایجاد شده در سطح قطعه شکل داده شده در زاویه ۶۵ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، گام عمودی ۳/۰ میلی متر، سرعت پیش روی ۶۰۰ میلی متر بر دقیقه با استفاده از روانکار آنتی سیز بر پایه مس به دلیل عبور مکرر ابزار از یک ناحیه

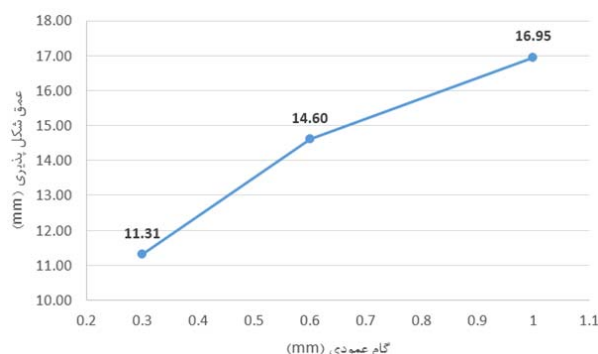
امکان پذیری شکل دهی زوایای بالا

با هدف بررسی میزان افزایش شکل پذیری ناشی از گرمایش ورق در زوایای دیواره‌ی بالاتر از ۶۰ درجه، آزمون‌هایی مطابق با شرایط ثابت پارامترها (دما ۴۰۰ درجه سانتی گراد، گام عمودی ۰/۶ میلی متر، روانکار گرافیت و سرعت پیش روی ۶۰۰ میلی متر بر دقیقه) در زوایای ۶۵ و ۷۰ درجه با حالت‌های شکل دهی سرد هر کدام مقایسه شد. پس از انجام این آزمون‌ها، نتایج، مطابق نمودار ۷ نشان داد، که افزایش شکل پذیری ناشی از دما، با افزایش زاویه دیواره، کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش زاویه دیواره میزان کرنش در دیواره ورق افزایش می‌یابد و در نتیجه آن نازک شدگی و پارگی در عمق‌های کمتری نسبت به زوایای دیواره کمتر اتفاق می‌افتد. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش دمای ورق از دمای اتاق به دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد در زوایای ۶۰، ۶۵ و ۷۰ به ترتیب ۵۲۸/۵۷، ۱۴۶/۲۰ و ۱۰۸/۸۴٪ افزایش شکل پذیری را نتیجه می‌دهد که به ترتیب در شکل‌های ۲۱-الف، ۲۱-ب، ۲۱-ج و ۲۱-د نشان داده شده است.

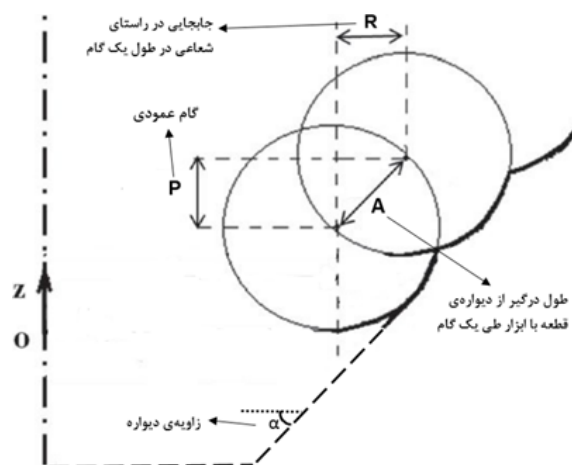


نمودار ۷) منحنی مقایسه میان عمق شکل پذیری نمونه‌های شکل داده شده در زوایای ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه با گام عمودی ۰/۶ میلی متر و سرعت پیش روی ۶۰۰ میلی متر بر دقیقه و روانکار پودر گرافیت در دو دمای ۴۰۰ و ۲۵ درجه سانتی گراد

ابزار و ورق و یا ازدیاد عیوب (حالت اول پارگی) جلوگیری کرد. همچنین رابطه ۲، نشان می‌دهد که هر چه A بزرگ‌تر باشد، کیفیت سطح پایین‌تری حاصل خواهد شد. از طرف دیگر اگر A کوچک باشد، تعداد دفعات عبور ابزار از یک نقطه مشخص بالا رفته و موجب بروز نازک شدگی شدیدتر و پارگی زودرس می‌شود. همچنین گام عمودی به طور مستقیم بر مدت زمان انجام فرآیند نیز تاثیرگذار است. لذا انتخاب گام عمودی مناسب، امری وابسته به کیفیت سطح مورد نظر و همچنین مدت زمان فرآیند است.



نمودار ۶) منحنی تاثیر گام عمودی بر عمق شکل پذیری در زاویه ۶۵ درجه، دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، سرعت پیش روی ۶۰۰ میلی متر، با استفاده از روانکار پودر گرافیت در گام‌های عمودی مختلف



شکل ۱۹) نحوه حرکت ابزار در یک گام کامل [22]

آزمون دیگری در حضور روانکار گریس آنتی سیز بر پایه مس، گام عمودی ۰/۳ میلی متر و سرعت پیش روی ۶۰۰ میلی متر بر دقیقه، با هدف صحت سنجی دلیل یاد شده برای اثبات رابطه مستقیم میان گام عمودی و عمق شکل دهی در زاویه دیواره ۶۵ درجه انجام شد. مطابق شکل ۲۰ در این آزمون ورق به طور کامل تا انتهای برنامه شکل گرفت و دیگر ورق در ارتفاعات پایین به مانند آن چه در مورد روانکارهای پودری مشاهده شد، پاره نشد. البته تنها یک ترک پایدار مشاهده می‌شود که منشا آن، تجمع ذرات پودر روانکار نبوده بلکه حالت اول پارگی در عمق گام کم رخ داده است (عبور مکرر ابزار از یک ناحیه و رشد عیوب ناشی از تنش‌های عمودی و اصطکاکی).

۴- در حضور روانکار آنتی‌سبز بر پایه مس، شکل‌پذیری مخروطی با زاویه دیواره ۶۵ درجه تا عمق ۴۴ میلی‌متر در یک مرحله انجام شد که نشان‌دهنده بهبود چشم‌گیر شکل‌پذیری ۶۴۲٪ است. با استفاده از این روانکار قطعاتی با زبری سطح بسیار مناسب ۱/۳۷ میکرومتر به‌دست آمد.

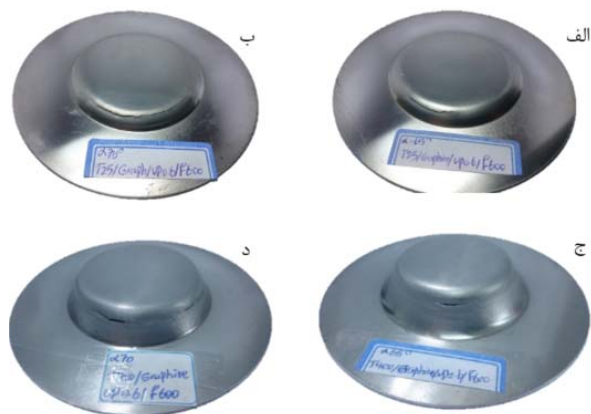
۵- رابطه میان گام عمودی و عمق شکل‌پذیری رابطه‌ای خطی نیست و گاهی اوقات در گام‌های عمودی بسیار پایین عمق شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. وقوع این پدیده به میزان همپوشانی مسیرهای عبوری ابزار در دو گام متوالی وابسته است. در رابطه با روانکارهای پودری، همپوشانی زیاد باعث محبوس شدن پودر روانکار در بین ابزار و ورق و در نتیجه اعمال نیروی زیاد به ورق و پارگی آن می‌شود. ولی در رابطه با روانکارهای گریسی قرارگیری پی‌درپی تحت تنش‌های عمودی و اصطکاکی عامل پارگی در گام‌های عمودی پایین است.

۶- میزان حساسیت شکل‌پذیری ورق به گام‌های عمودی پایین با افزایش زاویه دیواره افزایش می‌یابد. لذا در زوایای دیواره بالاتر خصوصاً در حضور روانکارهای پودری، باید از گام‌های عمودی بالاتری استفاده شود.

۷- نحوه اعمال روانکار به ناحیه شکل‌دهی از عوامل تاثیرگذار بر نمونه به‌دست‌آمده است. در حین استفاده از روانکارهای پودری باید از نیمه‌غرق شدن ابزار در روانکار جلوگیری شده و در عین حال از کافی بودن روانکار در ناحیه برخورد ابزار و ورق اطمینان حاصل شود. در حین استفاده از روانکارهای گریسی نیز باید به‌طور پیوسته روانکارهای سوخته با روانکار جدید به طریقی جایگزین شود. چرا که در حین شکل‌دهی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، روغن موجود در گریس شروع به سوختن می‌کند و در طول فرآیند، اپراتور باید گریس سوخته را با مقداری از گریس سالم جایگزین کند.

۸- در طول انجام این فرآیند مشکلات مختلفی از جمله پارگی‌های پایدار، نقطه‌ای، پیش‌رونده، اعوجاج سطحی و پارگی‌های نزدیک به ناحیه فلنج ممکن است رخ دهد. پارگی پایدار معمولاً در قسمت‌های از ورق که پیش‌تر ابزار از آن عبور کرده است رخ می‌دهد و با ادامه فرآیند شکل‌دهی رشد نمی‌کند. ولی پارگی پیش‌رونده، در محل تماس ابزار با ورق ایجاد شده و با حرکت ابزار رشد می‌کند. پارگی نقطه‌ای معمولاً بر اثر محبوس شدن مقداری زیاد از روانکار پودری در میان ابزار و ورق رخ می‌دهد و به‌صورت سوراخی در سطح ورق ظهور می‌کند. اعوجاج سطحی در اثر اصطکاک بسیار زیاد میان ابزار و ورق در غیبت روانکار و به‌صورت اعوجاج‌های پیچشی در سطح بیرونی قطعه ایجاد می‌شود. از طرفی دیگر، در صورت عدم تنظیم درست نیروی ورق‌گیر، در حین عملیات شکل‌دهی، ورق با حرکت ابزار بر روی آن به جهتی کشیده می‌شود و در نواحی نزدیک به سوراخ صفحه پشتیبان پارگی رخ می‌دهد.

براساس نتایج به‌دست‌آمده، از آنجا که آلایژ آلومینیومی مورد



شکل ۲۱) نمونه‌های شکل‌داده شده با گام عمودی ۰/۶ میلی‌متر و سرعت پیش‌روی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در، الف) دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و زاویه دیواره ۶۰ درجه، ب) دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و زاویه دیواره ۷۰ درجه، ج) ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه دیواره ۶۰ درجه، د) ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه دیواره ۷۰ درجه

نتیجه‌گیری

برخی از نتایج مهم به‌دست‌آمده، در ذیل بیان شده است:

۱- در ادبیات تحقیق، بهبود شکل‌پذیری مخروط دارای زاویه دیواره ۶۰ درجه از جنس آلومینیوم AA6061 در دمای بالا با استفاده از LEHIF در حدود ۳۷٪ گزارش شده بود. با استفاده از یک ابزاربندی جدید به‌منظور گرمایش ورق به‌صورت یکنواخت، شکل‌پذیری ورق آلومینیومی AA6061 تحت زاویه دیواره ۶۰ درجه از ۷ میلی‌متر در دمای اتاق به ۴۴ میلی‌متر در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بهبود پیدا کرده است (۵۲۸٪ بهبود شکل‌پذیری). علاوه بر آن، مشخص شد که با افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، زاویه بحرانی دیواره از ۶۰ به ۶۵ درجه افزایش یافته است.

۲- مهم‌ترین عامل موثر بر عمق شکل‌پذیری با اختلاف زیادی دمای ورق است. به‌گونه‌ای که تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد شکل‌پذیری رشد چندانی ندارد. اما با عبور از حدوداً نیمی از دمای ذوب ورق، شکل‌پذیری به‌طور ناگهانی رشد زیادی پیدا می‌کند. به‌طوری که با افزایش دما از ۲۵۰ به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل‌پذیری از ۱۳/۰۳ به ۴۴ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

۳- روانکار نیز بر عمق شکل‌پذیری تاثیر به‌سزایی دارد و بیشترین شکل‌پذیری ورق در حضور روانکار گریس آنتی‌سبز بر پایه مس رخ می‌دهد. روانکارهای مولیبدن‌دی‌سولفید و گرافیت نیز در رتبه‌های بعدی عمق شکل‌پذیری قرار می‌گیرند. روانکار آنتی‌سبز بر پایه مس در LEHIF طبق نتایج پژوهش‌های پیشین بر اثر پدیده جرقه‌زنی، تنها کیفیت سطح مناسبی به‌دست می‌داد و پودر گرافیت نتیجه مناسب‌تری را از لحاظ عمق شکل‌پذیری دارا بود. اما ابزاربندی منحصربه‌فرد، امکان استفاده از روانکار آنتی‌سبز بر پایه مس را بدون جرقه‌زنی میسر نمود. در نتیجه، استفاده از این روانکار علاوه بر کیفیت سطح بسیار مناسب، بهترین عمق شکل‌پذیری را نیز به همراه داشت. همچنین، نبود پدیده جرقه‌زنی، عدم هر گونه خوردگی ابزار را نیز به ارمغان آورد.

- 9- Ambrogio G, Filice L, Manco GL. Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31. *CIRP Annals*. 2008;57(1):257-260.
- 10- Ortiz M, Penalva M, Iriondo E, de Lacalle LNL. Investigation of thermal-related effects in hot SPIF of Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2020;7(2):299-317.
- 11- Saidi B, Moreau LG, Mhemed S, Cherouat A, Adragna PA, Nasri R. Hot incremental forming of titanium human skull prosthesis by using cartridge heaters: a reverse engineering approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;101(1-4):873-880.
- 12- Khazaali H, Fereshteh-Saniee F. A comprehensive experimental investigation on the influences of the process variables on warm incremental forming of Ti-6Al-4V titanium alloy using a simple technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(9-12):2911-2923.
- 13- Palumbo G, Brandizzi M. Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high tool rotation speed. *Materials & Design*. 2012;40:43-51.
- 14- Li Z, Lu S, Zhang T, Zhang C, Mao Z. Electric assistance hot incremental sheet forming: an integral heating design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96(9-12):3209-3215.
- 15- Azevedo NG, Farias JS, Bastos RP, Teixeira P, Davim JP, de Sousa RJA. Lubrication aspects during single point incremental forming for steel and aluminum materials. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015;16(3):589-595.
- 16- Vahdani M, Mirnia MJ, Gorji H, Bakhshi-Jooybari M. Experimental investigation of formability and surface finish into resistance single-point incremental forming of Ti-6Al-4V titanium alloy using taguchi design. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019;72(4):1031-1041.
- 17- Amini Najafabady S, Ghaei A. An experimental study on dimensional accuracy, surface quality, and hardness of Ti-6Al-4 V titanium alloy sheet in hot incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(9-12):3579-3588.
- 18- Mirnia MJ, Shamsari M. Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;244:17-43.
- 19- Fan X, Suo T, Sun Q, Wang T. Dynamic mechanical behavior of 6061 al alloy at elevated temperatures and different strain rates. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2013;26(2):111-120.
- 20- Zhang Q, Xiao F, Guo H, Li C, Gao L, Guo X, et al. Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210(2):323-329.
- 21- McNulty T, Jeswiet J, Doolan M. Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017;16:43-54.
- 22- Mirnia MJ, Mollaei Dariani B. Analysis of incremental sheet metal forming using the upper-bound approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012;226(8):1309-1320.

استفاده قابلیت رسوب سختی دارد، بررسی میکروساختار قطعات شکل داده شده در دمای بالا می تواند بسیار ارزشمند باشد. این موضوع به عنوان کار آینده در دست مطالعه است.

تشکر و قدردانی: از زحمات آقای مهندس جمشید صادقی کارشناس کارگاه ماشین های ابزار CNC دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل جهت کمک در انجام کارهای تجربی تشکر و قدردانی را می شود.

تاییدیه اخلاقی: نتایج ارایه شده حاصل کار پژوهشی نویسندگان بوده و همگی فعالیت داشته اند.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: شایان درزی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ محمدجواد میرنیا (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ مجید الیاسی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۲۰٪).

منابع مالی: توسط بودجه تحقیقاتی پایان نامه کارشناسی ارشد اعطایی توسط دانشگاه به مهندس شایان درزی تامین شد.

فهرست علائم

A	طول درگیر از دیواره ی قطعه با ابزار در طول یک گام
N	شماره آزمایش
P	گام عمودی
R	جابجایی در راستای شعاعی در طول یک گام
SN	نسبت سیگنال به نویز
Y	ویژگی کیفی
α	زاویه ی دیواره

منابع

- 1- Echrf SBM, Hrairi M. Research and progress in incremental sheet forming processes. *Materials and Manufacturing Processes*. 2011;26(11):1404-1414.
- 2- Liu Z. Heat-assisted incremental sheet forming: a state-of-the-art review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;98(9-12):2987-3003.
- 3- Mohammadi A, Vanhove H, Weise D, Van Bael A, Landgrebe D, Dufloy JR. Influence of global forced-air warming on the bulge formation in shallow sloped SPIF parts. *Procedia Engineering*. 2017;183:149-154.
- 4- Galdos L, Sáenz de Argandoña E, Ulacia I, Arruebarrena G. Warm incremental forming of magnesium alloys using hot fluid as heating media. *Key Engineering Materials*. 2012;504-506:815-820.
- 5- Van Sy L, Thanh Nam N. Hot incremental forming of magnesium and aluminum alloy sheets by using direct heating system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013;227(8):1099-1110.
- 6- Vahdani M, Mirnia MJ, Bakhshi-Jooybari M, Gorji H. Electric hot incremental sheet forming of Ti-6Al-4V titanium, AA6061 aluminum, and DC01 steel sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;103(1-4):1199-1209.
- 7- Husmann T, Magnus CS. Thermography in incremental forming processes at elevated temperatures. *Measurement*. 2016;77:16-28.
- 8- Fan G, Gao L, Hussain G, Wu Z. Electric hot incremental forming: A novel technique. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008;48(15):1688-1692.