



مقایسه تجربی نمودار حد شکل‌دهی و تغییرات فاز آلیاژ Ti-6Al-4V در روش‌های شکل‌دهی نموی گرم و شکل‌دهی نموی گرم به کمک ارتعاشات فراصوت

مهدي جعفري وردنجانى*، سعيد اميني

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m-jafari@nus.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۹ شهریور ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۹ دی ۱۴۰۳

کلیدواژه‌گان:

شکل‌دهی نموی گرم

فراصوت

نمودار حد شکل‌دهی

Ti-6Al-4V

روش شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی یک روش جدید شکل‌دهی ورق فلزی برای مواد با شکل‌پذیری کم مانند آلیاژهای منیزیم و تیتانیوم است. برخی عیوب در روش شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی از جمله کیفیت پایین سطح، پارگی غیرمنتظره ورق و اکسیداسیون قطعات ساخته شده وجود دارد. این عیوب استفاده گسترده‌ی این روش را محدود کرده است. در این پژوهش از ارتعاشات فراصوت ابزار در فرایند شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی برای ورق‌های Ti-6Al-4V استفاده شده است. این ارتعاشات منجر به کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک و بهبود کیفیت سطح قطعه کار شده است. همچنین ترکیبی از ارتعاشات مکانیکی و گرما دمای تبدیل فاز α را به فاز شکل‌پذیرتر β به دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش داد و شکل‌پذیری ورق Ti-6Al-4V را بهبود بخشید. در این تحقیق، کرنش‌های کششی و فشاری مختلفی با ساخت هندسه‌های گوناگونی مانند مخروط، هرم ناقص، هذلولی و پنج‌پره ایجاد شد. این کرنش‌ها برای مقایسه نمودار حد شکل‌دهی در دو روش شکل‌دهی نموی گرم با کمک ارتعاشات فراصوت و روش معمول (بدون کمک ارتعاشات فراصوت) استفاده شدند. برای شناسایی شرایط بهینه به منظور ایجاد بزرگترین کرنش‌ها از طراحی آزمایش و تحلیل واریانس استفاده شد. همچنین عوامل موثر با روش سطح پاسخ بهینه شدند. سپس کرنش‌های اصلی در محورهای اول و دوم در دیاگرام حد شکل‌دهی برای هر دو روش مقایسه شدند. این نتایج نشان داد که کرنش‌های به‌دست‌آمده در روشی که به کمک ارتعاشات فراصوت انجام شده بود تا حدود ۲۵٪ بیشتر از آن‌هایی هستند که با فرایند بدون کمک ارتعاشات فراصوت ایجاد شده‌اند.

Experimental comparison of the forming limit diagram in hot incremental forming and ultrasonic vibration assisted hot incremental forming on Ti-6Al-4V alloy

Mehdi Jafari Vardanjani*, Saeed Amini

Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: m-jafari@nus.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 9 September 2024

Accepted: 18 January 2025

Keywords:

Hot Incremental Forming

Ultrasonic

Forming Limit Diagram

Ti-6Al-4V

Abstract

Electric hot incremental forming (EHIF) technique is a novel sheet metal forming method for low formability materials like Mg and Ti-6Al-4V alloys. There are some defects in EHIF including low surface quality, unexpected sheet tear and oxidation of the fabricated workpieces. These defects limit its widespread use. In this paper, longitudinal ultrasonic vibrations (UV) of forming tool are used for Ti-6Al-4V sheets in the EHIF process. This technique led to a significant reduction of friction coefficient and improvement of workpieces surface quality. Also, combination of mechanical vibrations and heat reduced the phase transformation temperature of α phase (HCP structure) to the more formable β phase (BCC structure) at 600 °C. It improved Ti-6Al-4V sheets formability. In this study, various tensile and compressive strains were created by manufacturing different geometries such as cone, frustum, torespherical, and five-lobe. These strains are used to compare the Forming Limit Diagram (FLD) of the ultrasonic-assisted and conventional hot incremental forming. Design of experiment and analysis of variance (ANOVA) were employed to identify the optimum condition for creating the largest strains. Also, effective parameters were optimized by Response Surface Methodology (RSM). Then major and minor strains for both techniques were compared. Achieved strains in all types of geometries for ultrasonic-assisted technique were about 25% higher than those achieved by conventional process.

Please cite this article using:

Jafari Vardanjani M, Amini S. Experimental comparison of the forming limit diagram in hot incremental forming and ultrasonic vibration assisted hot incremental forming on Ti-6Al-4V alloy. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Mar 21;12(1):14-28. doi: 10.22034/ijme.2025.477192.2005 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

روش شکل‌دهی نموی^۱ (IF) یک روش نسبتاً جدید و مبتکرانه است که برای تولید هندسه‌های پیچیده، به ویژه برای نمونه سازی سریع استفاده می‌شود. از آنجایی که در اکثر موارد قالب از فرایند حذف می‌شود، می‌توان آن را با سرعت و صرفه اقتصادی بیشتری انجام داد. از سوی دیگر، شکل‌دهی برخی از مواد مانند آلیاژهای تیتانیوم Ti-6Al-4V در دمای اتاق به دلیل خواص ویژه آنها مانند استحکام بالا و بازگشت فنری زیاد امکان پذیر نیست. برای حل این مشکل، دوفلو و همکاران [۱] یک ایده نوآورانه ارائه کردند، آن‌ها ورق را به صورت محلی گرم کردند این عمل شکل‌پذیری ورق را به میزان قابل توجهی افزایش داد. همچنین در پژوهشی، فرایند شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی^۲ (EHIF) بر روی ورق‌های Ti-6Al-4V توسط فن و همکاران [۲] انجام شد، معرفی لایه نیکل ۲۰ میکرون و پودر سولفید مولیبدن MoS₂ به عنوان روانکارهایی که به طور مؤثری بر اصطکاک شدید بین ورق و ابزار غلبه می‌کند، از نتایج تحقیق ایشان است. همچنین در تحقیق ایشان محدوده دمایی بهینه برای حداقل اکسیداسیون این آلیاژ تیتانیوم بین ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. طبق نظر شیانی و همکاران [۳] تنش تسلیم Ti-6Al-4V در این دما به نصف کاهش خواهد یافت.

اورتیز [۴] دو رویکرد را برای بهبود دقت هندسی قطعات ساخته شده از آلیاژ Ti-6Al-4V با روش شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای^۳ (SPIF) پیشنهاد کرده است: (i) تصحیح مسیر ابزار با فرایند اعمال یک مدل هوشمند که انحراف مسیر ابزار را شناسایی و خنثی می‌کند. (ii) کاهش انحرافات شکل‌دهی مربوط به برگشت فنری در طول محیط نمونه بر اساس بهبود طراحی هندسه. پاندر و همکاران [۵] تحقیقات تجربی و عددی را بر روی فولاد اتومات DP با استفاده از فرایند شکل‌دهی نموی ورق در دو دمای اتاق و همچنین دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند. آن‌ها مشخصه‌های مهم شکل‌پذیری مانند دیاگرام حد شکل‌پذیری^۴ (FLD) ورق، حداکثر زاویه دیواره قطعه قبل از شکست، نیروهای شکل‌دهی، توزیع ضخامت و دقت هندسی را تجزیه و تحلیل کردند. در مطالعه آن‌ها محدودیت‌های شکست ورق‌های فلزی با شکل دادن انواع هندسه‌های مخروطی و هرمی مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج تحقیق ایشان، دیاگرام محدوده شکست مواد شکل‌دهی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۴٫۶ درصد بالاتر از دیاگرام حد شکست در دمای اتاق بود.

تاهان نام [۶] به منظور شکل‌دهی گرم نموی آلیاژهای AA5055 و AZ31 از یک منبع جریان مستقیم استفاده کرد. در این روش وی با اتصال قطب‌های مخالف به قطعه کار و ابزار دمای قطعه را بر مبنای قانون ژول، افزایش داد. کومار و همکاران [۷] قابلیت‌های EHIF در شکل‌دهی CP-Ti Grade-2 را بررسی کردند. بارواج و همکاران [۸] از روش تاگوچی برای بهینه سازی شکل‌پذیری فرایند SPIF آلومینیوم استفاده کرده‌اند. در مطالعه آن‌ها، گام، نرخ پیشروی و روانکاری به عنوان عوامل تأثیر گذار ورودی فرایند و زبری سطح به عنوان عوامل پاسخ خروجی انتخاب شدند. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از آرایه متعامد L9 انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل نتایج نشان داد که مؤثرترین عوامل فرایند روانکاری و گام حرکت عمودی ابزار است.

ژیائو و همکاران [۹] از فرایند SPIF برای تغییر شکل ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم AA7075-T6 در دماهای مختلف به صورت تجربی استفاده کردند. در این تحقیق شکل‌پذیری و نیروهای شکل‌دهی در دماهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. بارانی و همکاران [۱۰] و هنرپیشه و همکاران [۱۱] فرایند EIHF را برای آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V انجام دادند و عامل‌های مؤثری مانند زاویه دیواره، قطر ابزار، گام عمودی حرکت ابزار، توزیع ضخامت و نیروی اعمال شده به ابزار را بررسی نمودند. در پژوهشی دیگر، امینی و همکاران [۱۲] تحقیقی بر روی فرایند EHIF آلیاژ Ti-6Al-4V انجام دادند. آن‌ها از جریان متناوب (AC) استفاده کردند و توانستند ورق را به طور مؤثری بر مبنای اثر ژول گرم کنند. در تحقیقی که لیو و همکاران [۱۳] بر روی EHIF آلیاژ Ti-6Al-4V انجام دادند، سختی، شکل‌پذیری، ریزساختار و کیفیت سطح در دماهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها گزارش دادند که کنترل دمای فرایند EHIF با استفاده از سیستم بازخورد در زمان شکل‌دهی ورق TC4 موجب پایداری فرایند خواهد شد. در این مطالعه مشخص شد که وقتی دمای سر ابزار در حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کنترل شود، ورق TC4 بهترین شکل‌پذیری را داشته و زاویه شکل‌گیری قطعات

¹ Incremental Forming

² Electric Hot Incremental Forming

³ Single Point Incremental Forming

⁴ Forming Limit Diagram

شکل‌دهی شده از ۴۱,۱ درجه، به ۶۳,۵ درجه و همچنین ارتفاع نمونه‌ها به میزان ۴,۵ میلی‌متر در مقایسه با نمونه‌های شکل‌دهی شده در دمای اتاق افزایش خواهد یافت.

بناتریس و همکاران [۱۴] با انجام فرایند EIHF دو نقطه‌ای عوامل شکست ورق‌های Ti-6Al-4V را مطالعه کردند این فرایند برای تولید نمونه‌هایی با شکل محدب و انحنای دوگانه استفاده می‌شود.

سعیدی و همکاران [۱۵] یک سیستم IF جدید بر اساس استفاده از المنت‌های حرارتی را بررسی کردند. آن‌ها این سیستم را برای توزیع یکنواخت و ثابت حرارت در طول فرایند EIHF برای ساخت پروتز جمجمه از آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V ایجاد کردند. همچنین وینینگ لی و همکاران [۱۶] با انجام فرایند EIHF آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V ریزساختار آن را در دماهای مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای نمونه‌های EHIF در دمای ۷۰۰°C، ریزساختار همسانگردی بیشتری نسبت به دماهای پایین‌تر ایجاد می‌کند. در پژوهشی که توسط غفاری و همکاران [۱۷] انجام شد، شکل‌دهی دورانی گرم آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به روش مقاومتی اجرا و انتقال حرارت بین اجزای مختلف مدار در حین فرایند بررسی شد.

بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین، انجام برخی از فرایندهای تولیدی به کمک ارتعاشات فراصوت^۱ UV می‌تواند اثرات قابل توجهی به‌همراه داشته باشد، همچنین اثرات UV بر EIHF برای ورق Ti-6Al-4V مطالعه جدیدی است. بنابراین، پژوهش حاضر به منظور ترکیب UV با EHIF برای ورق Ti-6Al-4V انجام شده است. در ادامه چندین مطالعه مربوط به اثرات UV بر فرایندهای تولیدی بررسی شده است. بالاموث [۱۸] اشاره کرد که در فرایند کشش سیم با کمک ارتعاشات فراصوت شکل‌پذیری و بازدهی افزایش یافته و نیروی شکل‌دهی مورد نیاز کاهش یافته است. امینی و همکاران [۱۹] تایید کردند که ارتعاشات فراصوت اثرات مثبت قابل توجهی بر فرایند IF دارد و نیروی شکل‌دهی تا ۳۶ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین طبق نتایج پژوهش ایشان ارتعاشات UV مقدار برگشت فنری را کاهش خواهد داد. رسولی و همکاران [۲۰] در یک پژوهش درمورد شکل‌دهی لوله نشان دادند که استفاده از UV باعث افزایش سختی سطح بیرونی لوله شده است، در حالی که تاثیر قابل توجهی بر سختی سطح داخلی نداشته است. همچنین طبق نتایج پژوهش ایشان کیفیت سطح داخلی نیز با استفاده از UV با توان کم بهبود یافته است. علاوه بر این، لین و همکاران [۲۱] در یک مطالعه با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی، اصطکاک و رفتار فلز در حین شکل‌دهی را در حالت‌های با کمک UV و بدون کمک UV ارزیابی کردند. همچنین عابدینی و همکاران [۲۲] از ارتعاشات UV هنگام فشردن سازی داغ پودر های آلومینیوم و تیتانیوم استفاده کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که استفاده از این ارتعاشات موجب دستیابی به چگالی‌های بالاتر در قطعات ساخته شده خواهد شد.

در پژوهش دیگری که توسط حسین روحی و همکاران [۲۳] انجام گرفت. فرایند SPIF گرم با گرمادهی همگن به ورق به‌صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. شکل‌پذیری ورق بر مبنای آزمون شیار مستقیم شرایط مختلف فرایند با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش اجزای محدود انجام شد. در پژوهش ایشان گرمایش ابزار به همراه اعمال سیستم گرمایش همگن به ورق باعث هم‌دما شدن ابزار و ورق شده و با کاهش اتلاف حرارت در منطقه تغییر شکل موجب بهبود فرایند تغییر شکل شده و امکان دستیابی به حدود شکل‌دهی بالاتر را میسر ساخت.

دانستن ماکزیمم کرنش‌های قابل دستیابی در طی فرایندهای شکل‌دهی برای پژوهشگران این حوزه حائز اهمیت است. پیش از این، دیاگرام‌های حد شکل‌دهی FLDS برای برخی از آلیاژها به عنوان معیاری برای پیش‌بینی حداکثر کرنش‌های قابل دسترسی استفاده شده است. برای مثال، جوئیست و همکاران [۲۴] IF را برای آلومینیوم انجام داد و FLD برای این آلیاژ را با مش بندی و شکل‌دهی پنج هندسه مختلف به دست آورد. سیلوا و همکاران [۲۵] نشان دادند که باریک‌شدگی موضعی در فرایند SPIF نمایش داده نمی‌شود به طوری که FLDهای سنتی برای توصیف شکست قطعه غیرقابل استفاده هستند. بنابراین، به جای آن باید از نمودارهایی که حد شکست را نشان می‌دهند استفاده شود.

با توجه با اینکه در مورد استخراج FLD توسط فرایند EHIF با کمک ارتعاشات فراصوت برای ورق Ti-6Al-4V هنوز گزارشی داده نشده است؛ هدف اصلی پژوهش پیش‌رو مقایسه FLD بدست آمده از هر دو روش EHIF با کمک ارتعاشات فراصوت و بدون کمک ارتعاشات فراصوت برای ورق از جنس Ti-6Al-4V می‌باشد. در این مقاله از خاصیت مقاومت الکتریکی نقطه‌ای برای گرم کردن ورق Ti-6Al-4V بر مبنای اثر ژول استفاده شد و همزمان با یک سازوکار ابداعی ارتعاشات طولی به ابزار شکل‌دهی اعمال می‌شود.

¹ Ultra sonic Vibration

۲- جزئیات فرایند

۲-۱- جزئیات شکل‌دهی نموی گرم

در روش IF، یک ابزار با سرکروی در امتداد مسیر هندسی منطبق بر دیواره داخلی هندسه قطعه مورد نظر حرکت می‌کند و آن را به تدریج شکل می‌دهد در حالی که دمای ورق همان دمای محیط است. این روش برای ورق‌های شکل پذیر مانند آلومینیوم و آلیاژهای فولادی مناسب است. این روش را نمی‌توان برای آلیاژهایی که ریز ساختارهایی با شکل‌پذیری پایین مانند تیتانیوم و منیزیم در دمای اتاق به کار برد. ریز ساختار آلیاژ Ti-6Al-4V متشکل از دو فاز α (با ساختار^۱ HCP) و β (با ساختار^۲ BCC) می‌باشد. در دمای محیط فاز α درصد حجمی بیشتری دارد و بدلیل تعداد سیستم با خصوصیت لغزش کم این فاز در شکل‌پذیری، نقش منفی قابل توجهی ایفا می‌کند. از این رو ایجاد تغییر شکل پلاستیکی یکنواخت در دمای محیط دشوار است، بنابراین معمولاً شکل‌دهی این آلیاژ در دماهای بالا انجام می‌شود. در این پژوهش برای گرم کردن قطعه کار از جریان الکتریکی با شدت آمپر بالا استفاده شده است و یک ناحیه تماس کوچک بین ابزار و قطعه کار بر مبنای اثر گرمایش ژول تا حدود 600°C گرم می‌شود. به این ترتیب همانطور که قبلاً توسط شین‌لی و همکاران [۳] گزارش شده بود، تنش تسلیم به نصف کاهش می‌یابد. این موضوع نیروی شکل‌دهی را کاهش می‌دهد در حالی که شکل‌پذیری ورق را افزایش می‌دهد. بخش‌های اصلی فرایند EHIF به شرح زیر است:

۱. کَلگی دستگاه فرز کنترل عددی
۲. ابزارگیر
۳. جاروبک مخصوصی که برای رساندن جریان الکتریکی به ابزار شکل‌دهی طراحی شده است
۴. ابزار شکل‌دهی وارد شده به ابزارگیر عایق شده
۵. کابل‌های برق
۶. عایق الکتریکی برای جلوگیری از جریان الکتریکی به میز فرز کنترل عددی
۷. میز فرز کنترل عددی
۸. قید مناسب برای نگه داشتن ورق
۹. مبدل جریان برق برای تبدیل ولتاژ ۲۲۰ ولت به ۱٫۲ ~ ۱٫۵ ولت و جریان بالا

۲-۲- ساخت و راه اندازی تجهیزات شکل‌دهی نموی گرم با کمک امواج فراصوت

مشکلات و عیوب متعددی در هنگام استفاده از روش EHIF برای شکل‌دهی ورق Ti-6Al-4V ایجاد می‌شود که از آن جمله می‌توان به اکسیداسیون، زبری سطح بالا و شکست زودهنگام ورق اشاره کرد. این مشکلات عمدتاً به دلیل اصطکاک زیاد بین ابزار و ورق، روانکاری کاری نامناسب و خواص شکل‌پذیری پائین مربوط به ریزساختار ایجاد می‌شوند. همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد ارتعاشات فراصوت اثرات قابل توجهی بر کاهش اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی دارد به منظور استفاده از این اثرات تجهیزات نشان داده شده در شکل ۱ برای تولید ارتعاشات مکانیکی فراصوت با دامنه کم و فرکانس 1 ± 20 کیلوهرتز و انتقال آن‌ها به ابزار شکل‌دهی ساخته شد. مطابق شکل ۱، عناصر اصلی فرایند EHIF عبارتند از: (۱) مولد جریان مورد نیاز با بسامد ۲۰ کیلوهرتز، (۲) مبدل انرژی^۳، (۳) کَلگی ماشین فرز، (۴) سیستم یاتاقان‌بندی، (۵) تسمه دندانه‌دار، (۶) عایق‌ها، (۷) کابل انتقال جریان برق فشار قوی، (۸) مجموعه ابزار و تشدیدکننده یا تقویت کننده^۴، (۹) اتو ترانسفورمر (مبدل قابل تنظیم ولتاژ برق شهر)، (۱۰) ورودی برق شهر، (۱۱) ترانس تبدیل جریان بالا و (۱۲) میز ماشین فرز کنترل عددی. در این روش یک ابزار سرکروی ساخته شده از فولاد تندبر^۵ (HSS) که روی تشدید کننده نصب شده و در حال ارتعاش با بسامد فراصوت است، ورق را در دمایی در حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مطابق با هندسه مورد نظر شکل می‌دهد. لازم به ذکر است در حین کار دمای ابزار و ورق توسط دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری می‌شود. تصویری واقعی از فرایند راه‌اندازی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

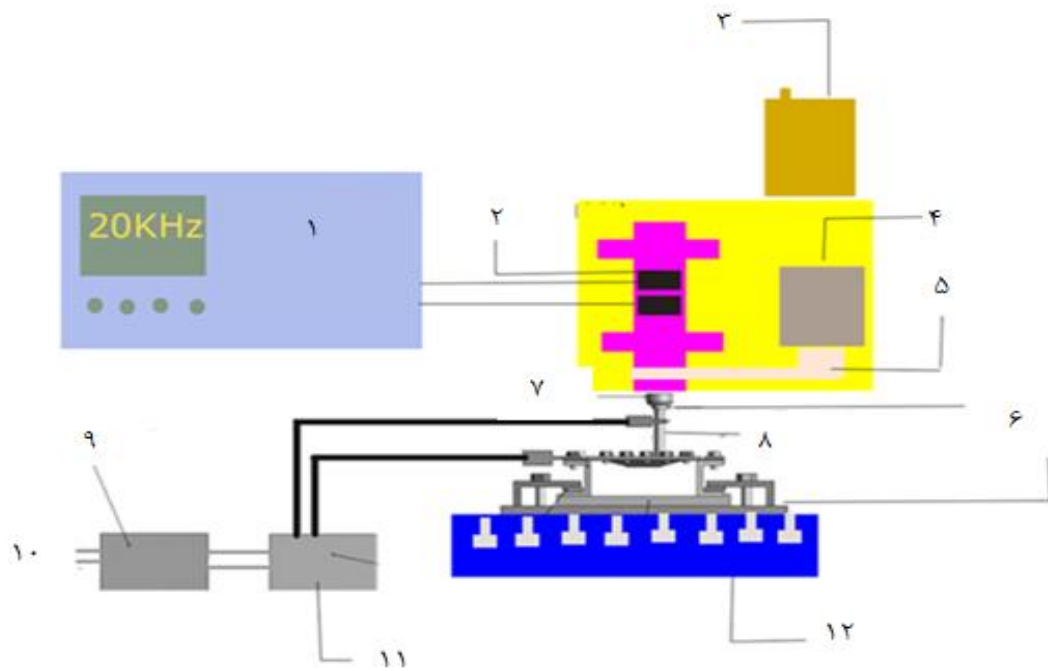
¹ Hexagonal Close Pack

² Body Center Cube

³ Transducer

⁴ Horn

⁵ High Speed Steel



شکل ۱ تصویر شماتیک شکل‌دهی نموی گرم به کمک ارتعاشات فراصوت



شکل ۲ نصب تجهیزات شکل‌دهی گرم نموی به کمک ارتعاشات فراصوت بر روی ماشین فرز کنترل عددی

این مجموعه به طور دقیق طراحی و ساخته شد، اما با چالش‌ها و مشکلاتی مواجه بود. مشکل اصلی عایق کردن بخش الکترونیک دستگاه CNC و جلوگیری از تولید گرما در قسمت مولد ارتعاش بود. این مجموعه عایق بندی باید از انتقال حرارت و جریان به مبدل جلوگیری کند. در غیر این صورت، مولد جریان پالس نمی‌تواند به درستی به وظیفه خود عمل کند.

۲-۳- کارایی تجهیزات

هم‌افزایی دمایی ایجاد شده بر اثر ارتعاشات فراصوت و گرمای ژول در قطعه کار در شکل ۳ نشان داده شده است. این تصویر از توزیع دما با استفاده از دوربین تصویربرداری حرارتی Testo 882 به دست آمده است. همانطور که در این تصویر مشاهده می‌شود، قطعه کار با عبور جریان الکتریکی و ایجاد اثر گرمایش ژول و اعمال همزمان ارتعاشات فراصوت تا حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده است.

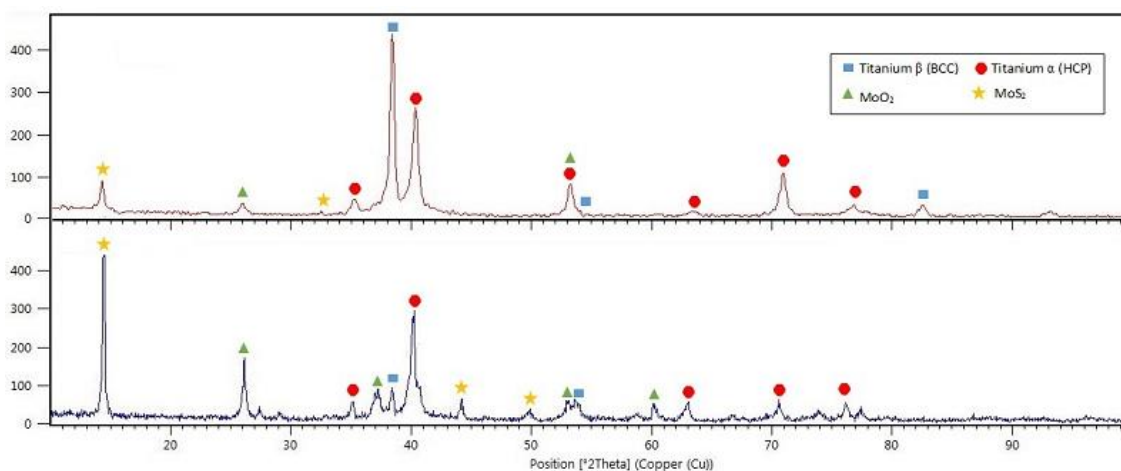


شکل ۳ ترموگرافی هم‌افزایی اثر ارتعاشات فراصوت و گرمای ژول

۲-۴- اثرات فراصوت بر تغییر فاز و ریزساختار قطعات ساخته شده

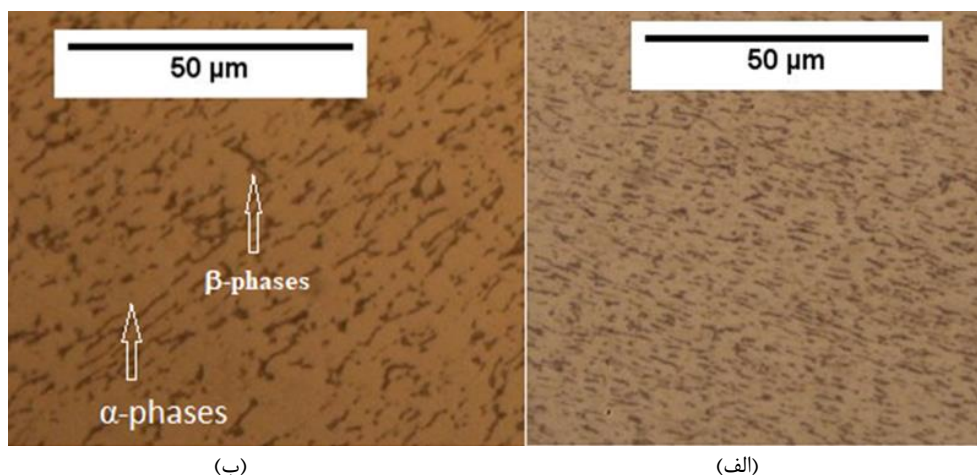
کیفیت قطعات تولید شده توسط EHIF تحت تأثیر عوامل متعددی است. در این بخش از مطالعه اثرات ارتعاشات فراصوت بر شکل‌پذیری و ریزساختار فرایند EHIF بررسی شده است. در این پژوهش برای بررسی تغییرات فاز در طول فرایند، از روش پراش اشعه ایکس^۱ (XRD) استفاده شد. تجزیه و تحلیل نتایج XRD نشان داد که تحریکات مکانیکی ارتعاشات فراصوت دمای انتقال فاز را کاهش می‌دهد (دمای انتقال فاز به عنوان دمای مورد نیاز برای تغییر، از فاز α به فاز β تعریف می‌شود). این موضوع به این مفهوم است که در نمونه‌های ساخته شده با کمک UV حجم بیشتری از فاز غالب α با ساختار HCP به فاز β با ساختار BCC تبدیل شده‌اند. این دگرگونی‌ها در دمایی در حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است در حالی که دمای تبدیل فاز در شرایط معمول حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد است. این موضوع ادعای فوق را تقویت می‌نماید. می‌توان انتظار داشت این پدیده منجر به بهبود شکل‌پذیری شود. نمودارهای تجزیه و تحلیل XRD از قطعه‌های تولید شده در شکل ۴ مقایسه شده‌اند.

برای داشتن نتایج بهتر و درصد حجمی دقیق‌تر از هر فاز، بررسی‌های ریزساختاری برای هر دو مورد توسط میکروسکوپ نوری انجام شد. شکل ۵ ریزساختارهای بدست آمده توسط میکروسکوپ نوری برای یک هندسه مشخص از نمونه‌ها را در هر دو روش نشان می‌دهد. تحلیل این تصاویر نشان می‌دهد که فاز β در نمونه‌های ساخته شده بدون کمک ارتعاشات فراصوت دارای دانه‌های بزرگتر ولی از نظر حجمی کمتر است، در واقع مقدار فاز β در این نمونه‌ها ۲۳ درصد از کل فازهای حجمی است (شکل ۵-الف) در حالی که نسبت حجمی فاز β در نمونه‌های ساخته شده با کمک فراصوت ۳۲ درصد کل فازها است (شکل ۵-ب). به این ترتیب می‌توان گفت نتایج هر دو شکل ۴ و ۵ با یکدیگر همخوانی دارند.



شکل ۴ تجزیه و تحلیل فاز مقایسه قطعات کار ساخته شده با روش‌های سنتی و فراصوت به کمک ارتعاشات

^۱ X-Ray Diffraction



شکل ۵ الف) ریزساختار نمونه‌های ساخته شده با کمک ارتعاشات فراصوت حاوی ۳۲٪ فاز β . ب) ریزساختار نمونه‌های ساخته شده بدون کمک ارتعاشات فراصوت حاوی ۲۳٪ فاز β (رنگ تیره)

با توجه به نتایج ذکر شده و شکل‌پذیری بالاتر ساختار BCC، نویسندگان این مقاله تشویق شدند تا شکل‌پذیری قطعات ساخته شده از ورق‌های Ti-6Al-4V به روش‌های EHIF سنتی و EHIF به کمک ارتعاشات فراصوت را در این پژوهش مورد مطالعه و مقایسه قرار دهند.

۲-۵- معرفی نمودار حد شکل‌پذیری سنتی

همانطور که در قسمت مقدمه ذکر شد، یکی از مهمترین پارامترها در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی، کرنش‌های قابل دسترسی ورق قبل از شکست است. معمولاً برای این منظور از نمودار حد شکل‌دهی FLD استفاده می‌شود. این نمودار برای ارزیابی کرنش‌های اصلی روی دو محور متعامد در ورق قبل از باریک شدن موضعی (گلوئی شدن) و شکست استفاده می‌شود. در این روش، ورق‌هایی با عرض‌های مختلف برش داده می‌شوند، این قطعات توسط دواير با اندازه استاندارد و فاصله یکسان نشانه گذاری می‌شوند و سپس توسط سنبه توپی شکل استاندارد کشیده می‌شوند. در حین تغییر شکل دواير به بیضی‌هایی با دو محور اصلی تبدیل خواهند شد، که اختلاف هریک از قطرهای آن‌ها با دواير اولیه نشان دهنده کرنش‌های اصلی ایجاد شده در ورق می‌باشد؛ این شیوه به عنوان روش کازمارک شناخته می‌شود. در این روش نمودار نهایی دارای دو شاخه است که نشان دهنده نواحی مختلف کرنش‌های مثبت و منفی می‌باشد.

FLDها در روش IF معمولاً با FLDهای فرایندهای شکل‌دهی سنتی ورق‌ها متفاوت هستند. قطعه کار در روش IF به تدریج و از یک نقطه به نقطه دیگر شکل داده می‌شوند، در واقع در این روش تمام کرنش‌ها به یک باره در یک مرحله ایجاد نمی‌شود، بنابراین روش‌های سنتی به دست آوردن FLD برای روش IF مناسب نیست. علاوه بر آن در تحقیقات انجام شده توسط فیلیسی و همکاران [۲۶] تایید شده است، که کرنش‌های بزرگتری با روش IF قابل دسترسی هستند، که در FLDهای سنتی قابل مشاهده نیستند. در تحقیق ایشان برای ایجاد تنوعی از کرنش‌ها در هندسه‌های مختلف با روش IF، یک رویکرد نوآورانه ارائه شده است. در این رویکرد کرنش‌های بحرانی قابل دسترس بر اساس شکل‌گیری هندسه‌های کوناگون پیشنهاد و اعمال می‌شود. در مورد انتخاب هندسه‌ها و ابزارها در این روش بین محققان اتفاق نظر وجود ندارد. به عنوان مثال، جسوویت و همکاران [۲۷] از هندسه‌های مختلفی مانند شکل‌های مخروطی و هرمی برای ایجاد کرنش‌های مختلف استفاده کردند. مایونگ و جونگ [۲۸] در یک روش نوآورانه از ابزار با سر کرومی قابل لغزش که به طور آزاد قابلیت چرخش داشت برای شکل دادن هندسه‌های مختلف استفاده نمودند. این ابتکار اصطکاک را از حالت لغزشی به غلطشی تبدیل نمود و باعث کاهش چشمگیر آن شد. همچنین مارتینز و همکاران [۲۹] چندین قطعه با زاویه‌های مختلف برای ایجاد کرنش‌های کششی و فشاری تولید کردند و FLDهای به دست آمده را ارائه کردند.

در این پژوهش، هندسه‌های مختلفی انتخاب و با دو روش EHIF سنتی و همچنین EHIF با کمک فراصوت شکل‌دهی شده، سپس FLDها با هم مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است هندسه‌های انتخاب شده باید قادر به ایجاد کرنش‌های مثبت و منفی باشند.

در این روش قبل از اعمال تغییر شکل، یک الگوی شبکه‌ای از دایره‌ها روی ورق حک می‌شود. این دایره‌ها معمولاً دارای قطر ۲,۵ میلی‌متر و فاصله مرکز دایره نیز همین مقدار می‌باشد. پس از تغییر شکل، دایره‌ها به بیضی تبدیل می‌شوند و قطر آن‌ها در دو جهت اندازه‌گیری می‌شود. کرنش‌های دو محور اصلی از رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$\varepsilon_1 = \ln d_1/d_0, \quad \varepsilon_2 = \ln d_2/d_0 \quad (1)$$

در این رابطه d_0 قطر دایره اولیه، d_1 و d_2 قطرهای اصلی بیضی‌های تغییر شکل یافته و $\varepsilon_{1,2}$ کرنش‌های ایجاد شده در دو محور اصلی هستند.

به منظور حک کردن دایره اولیه روی سطح قطعه کار معمولاً از روش الکتروشیمیایی یا لیزر استفاده می‌شود. این دو روش حکاکی به دلیل عوامل موثر فرایند مانند ارتعاشات فراصوت، فشار و گرما منجر به تمرکز شدید تنش در قسمت‌های نازک شده می‌شود. در نتیجه، نمونه‌ها قبل از تغییر شکل‌های حداکثری، از لبه دایره‌های حک شده دچار شکست خواهند شد. در این تحقیق برای رفع این مشکل از شابلون همراه با رنگ نسوز استفاده شد، به این ترتیب با حذف نازک شدگی موضعی از پارگی زودرس جلوگیری شد.

۲-۶- طراحی آزمایش

برای شناسایی شرایط بهینه برای ایجاد بزرگترین کرنش‌ها با مهمترین عوامل موثر، طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل واریانس^۱ (ANOVA) بکار گرفته شد. سپس این عوامل موثر با روش سطح پاسخ (RSM) بهینه شدند. به منظور شناسایی و انتخاب مهمترین عوامل موثر بر EHIF ورق از آلیاژ Ti-6Al-4V مطالعات زیادی از منابع ذکر شده در مقدمه پژوهش انجام شد. براساس این مطالعات عوامل جریان (A)، گام عمودی ابزار (B)، نرخ پیشروی (C) در سه سطح، و حالت خاموش یا روشن بودن امواج فراصوت (D)، در دو سطح مطابق جدول ۱ انتخاب شدند. از آنجایی که دستیابی به بزرگترین کرنش‌ها هدف این بخش از مطالعه است، یک هندسه سهموی انتخاب و شکل‌دهی شد. حداکثر زاویه دیوار قابل دستیابی قبل از شکست، بزرگترین کرنش‌ها را ایجاد می‌کند. دلیل نظری این موضوع در بخش ۳-۲-۲ توضیح داده خواهد شد. بنابراین زاویه شکل‌دهی به عنوان تابع هدف انتخاب شد. طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای بهینه‌سازی پارامترها در سه سطح با تنظیم $\alpha=2$ استفاده شد، و زاویه شکل‌دهی به عنوان پاسخ برای بهینه‌سازی عوامل مؤثر از نظر آماری بررسی شد.

لازم به ذکر است در این مطالعه قطر ابزار و ضخامت ورق به ترتیب ۱۰ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر انتخاب شده است. همچنین با توجه به پژوهش فن و همکاران [۱۷] پودر MoS₂ به دلیل پایداری و مقاومت آن در دما و فشار بالا به عنوان بهترین روانکار انتخاب و در تمامی آزمایش‌ها به صورت یکسان استفاده شده است.

جدول ۱ عوامل مؤثر در فرایند، مورد استفاده در طراحی آزمایش

متغیر	سطح اول	سطح دو	سطح سه
جریان (آمپر)	۱۵۰	۱۹۰	۲۲۰
گام عمودی (میلی‌متر)	۰,۱	۰,۲	۰,۳
سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰
ارتعاشات فراصوت	خاموش	روشن	-

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بهینه‌سازی عوامل موثر بر آزمایش

در این مطالعه به بررسی عوامل موثر بر پاسخ از جمله: برهمکنش خطی، مربعی و دو عاملی پرداخته شده است. اعداد تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) برای چهار عامل بر روی حداکثر زاویه حد شکل‌دهی در هندسه کرومی بدست آمد. در این تحلیل P با مقادیر کوچکتر از ۰,۰۵ (p < ۰,۰۵) به عنوان عامل معنی دار و همچنین مقدار F تاثیر هر عامل را نشان می‌دهند. چنانچه مقدار P بیش از

¹ Analysis Of Variance

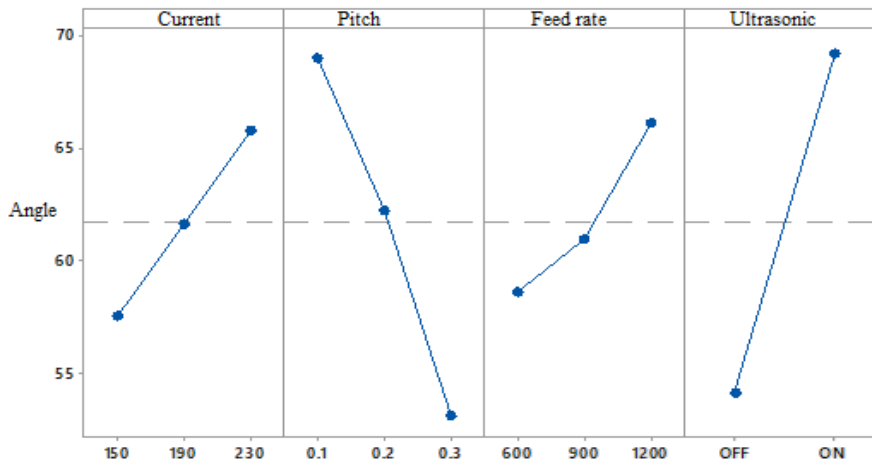
۰,۰۵ باشد نشان دهنده عدم تناسب می‌باشد. جدول آنالیز واریانس در شکل ۶ نمایش نشان داده شده است. همچنین هرچه مقدار F برای هر عامل بیشتر باشد، آن عامل در پاسخ موثرتر می‌باشد. معادله ۲ نیز مدل پاسخ را نشان می‌دهد.

$$Angle = 32.0 + 0.302 A + 55.4 B - 0.0269 C - 5.19 D_{off} + 5.19 D_{ON} - 314 B \cdot B + 0.000037 C \cdot C - 0.142 A \cdot B - 0.000166 A \cdot C \quad (2)$$

جدول ۱ مقادیر کامل آنالیز واریانس

P-Value	F-Value	Adj MS	Adj SS	DF	مرجع
0.000	53.33	333.38	4333.90	13	مدل
.000	166.72	1042.16	4168.64	4	خطی
.000	54.55	340.97	340.97	1	A
.000	202.22	1264.05	1264.05	1	B
.000	44.87	280.50	280.50	1	C
.000	365.25	2283.12	2283.12	1	D
-011 4.51	10.20	28.19	84.57	3	مجذور
-934 0.01		0.04	0.04	1	A*A
-007 8.70		54.35	54.35	1	B*B
.004 9.88		61.77	61.77	1	CxC
-081 2.15		13.45	80.69	6	ارتباط متقابل دو سویه
-371 0.83		5.18	5.18	1	A*B
.004		63.76	63.76	1	A*C
-852 0.04		0.22	0.22	1	A*D
-349 0.91		5.69	5.69	1	B*C
-463 0.55		3.46	3.46	1	B*D
-943 0.38		2.38	2.38	1	C*D
0.98 ~929		6.25	162.52	26	خطا
		6.21	99.40	16	عدم برازش
		6.31	63.12	10	خطای محض

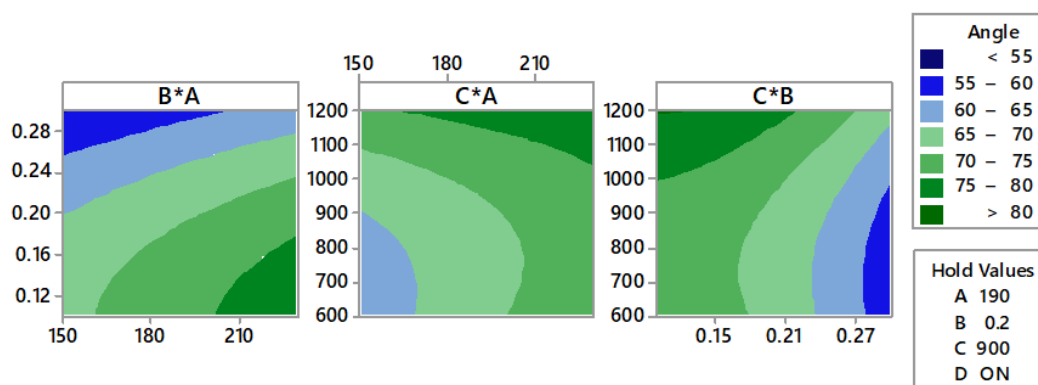
با توجه به نتایج ANOVA برای زاویه شکل‌دهی، گام حرکت عمودی ابزار و ارتعاشات فراصوت مؤثرترین عوامل بر پاسخ هستند. مقادیر F برای حالت روشن ارتعاشات فراصوت و گام عمودی ابزار به ترتیب ۲۰۲,۲۲ و ۳۶۵,۲۲ می‌باشد، که تأثیر بیشتری را برای آن‌ها نشان می‌دهد. همچنین R-sq تنظیم شده ۹۶,۳۹٪ ولی مقدار بدست آمده آن ۹۴,۵۸٪ می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که داده‌ها با مدل پیش‌بینی تناسب دارند. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد که میزان جریان (A) و پیشروی (C) در سطوح بالاتر تأثیر کمتری بر پاسخ دارند؛ همچنین گام (B) دارای اثر منفی و ارتعاشات فراصوت (D) در حالت ON تأثیر مثبت بیشتری بر پاسخ دارند. این نتایج در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶ نمودارهای اثر اصلی برای عوامل با پاسخ

نمودارهای شکل ۷ محدوده پاسخ را برای تعامل بین دو عامل در حالت فراصوت روشن نشان می‌دهند. این نمودارها نشان می‌دهند که کرنش‌های بالاتری در حالت روشن بودن ارتعاشات در دسترس هستند. در نهایت، نقطه بهینه با تنظیم ۲۳۰ آمپر برای جریان، ۰,۲ میلی متر برای گام، و پیشروی ۱۲۰۰ میلی متر در دقیقه و حالت روشن بودن فراصوت به ترتیب برای عوامل A, B, C و D به دست آمد. مناطق بهینه در شکل نشان داده شده است.

توجه به وجود آمدن مناطق بهینه (سبز رنگ) در شکل ۷ می‌تواند به شرح زیر باشد: (۱) در طول شکل‌دهی تدریجی قطعه‌کار، انباشت حرارت که به صورت تصاعدی و غیرقابل کنترل در سطح قطعه کار افزایش می‌یابد. جریان باید به طور مداوم و به صورت برخط کنترل شود تا کیفیت قطعه کار بهبود یابد. به همین دلیل است که می‌توان با سرعت‌های پیشروی بالاتر به عمق‌های بیشتر رسید. (۲) با توجه به تأثیر منفی افزایش گام، می‌توان بیان کرد که با افزایش گام، فرایند از شکل‌دهی تدریجی به کشش سنتی سوق پیدا می‌کند و کرنش‌های کوچک‌تری ایجاد می‌کند.



شکل ۷ نمودارهای دوبعدی برهمکنش عوامل در حالت بهینه

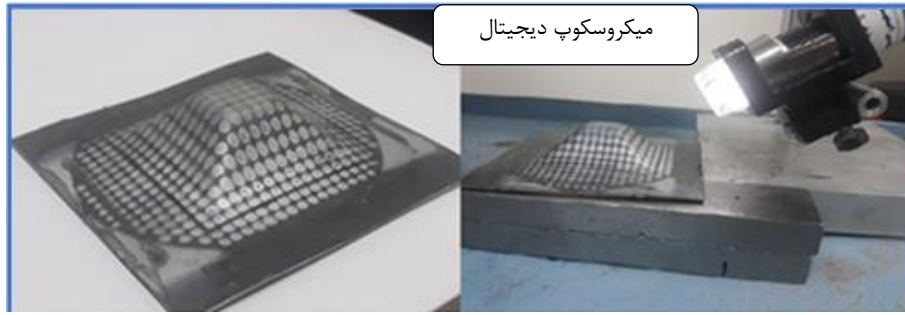
۳-۲- اثر کمک ارتعاش فراصوت بر شکل‌پذیری ورق‌های Ti-6Al-4V

به منظور سنجش میزان شکل‌پذیری ورق‌های فلزی در روش شکل‌دهی تدریجی محققین این حوزه معمولاً هندسه‌های مشخصی را به عنوان معیار انتخاب می‌کنند که هر هندسه یک دسته بندی منحصر به فرد از کرنش‌ها را ایجاد می‌کند به عنوان مثال می‌توان به پژوهش انجام شده توسط جوئیست و همکاران [۲۴] اشاره کرد که قبلاً هم در مقدمه به آن اشاره شد. در تحقیق حاضر با الهام از این پژوهش‌ها هندسه‌های مخروطی، هرمی، سهموی و همچنین هندسه پنج پره در نظر گرفته شدند، سپس هر یک از آن‌ها با استفاده از روش‌های EHIF سنتی و EHIF به کمک فراصوت ساخته شدند. در ادامه نمودارهای کرنش حادی قابل تحمل آن‌ها به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفت و همه کرنش‌های بدست آمده در یک نمودار واحد به عنوان کرنش‌های قابل تحمل نهایی یعنی نتایج FLD برای دو روش مورد مطالعه نمایش داده شدند.

۳-۲-۱- ساخت هندسه هرم ناقص و ایجاد کرنش‌های حداکثری

با توجه به مطالب عنوان شده در بخش قبل یکی از هندسه‌های مورد توجه محققان حوزه شکل‌دهی تدریجی هندسه هرم ناقص نشان داده شده در شکل ۸-ب می‌باشد؛ در شکل‌دهی این هندسه به دلیل شیب‌های بدون انحنا در دیواره قطعه‌کار، کرنش‌های یکنواخت در مقایسه با سایر هندسه‌ها به دست می‌آید. در این پژوهش هندسه هرم ناقص با زاویه دیواره ۴۵ درجه شکل داده شد، سپس به منظور اندازه‌گیری کرنش‌های بدست آمده از میکروسکوپ دیجیتال OLYMPUS مدل CX23 با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر استفاده شد. با توجه به تخت بودن سطح میکروسکوپ به حالت عمود بر سطح تنظیم شده و کرنش‌های اصلی در دو محور عمود بر هم بر روی بیضی تغییر شکل یافته اندازه برداری شده‌اند. روش اندازه برداری کرنش‌ها توسط میکروسکوپ دیجیتال در شکل ۸-الف نشان داده شده است.

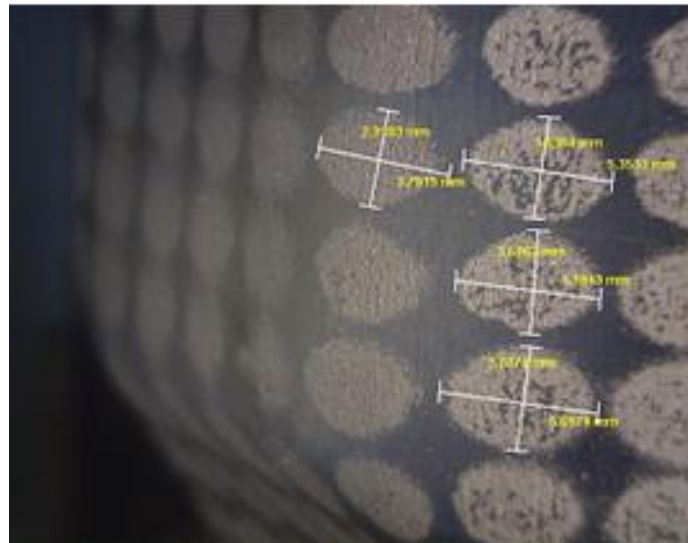
روش خواندن مقادیر کرنش‌ها به این صورت است در نرم افزار مربوط به میکروسکوپ دیجیتالی دو خط مطابق با محورهای بیضی تغییر شکل یافته ترسیم می‌شود و سپس با توجه به مقیاس اندازه این دو خط در رابطه کرنش یعنی رابطه ۱ وارد می‌شود. در شکل ۹ نحوه خواندن این کرنش‌ها نمایش داده شده است.



(ب)

(الف)

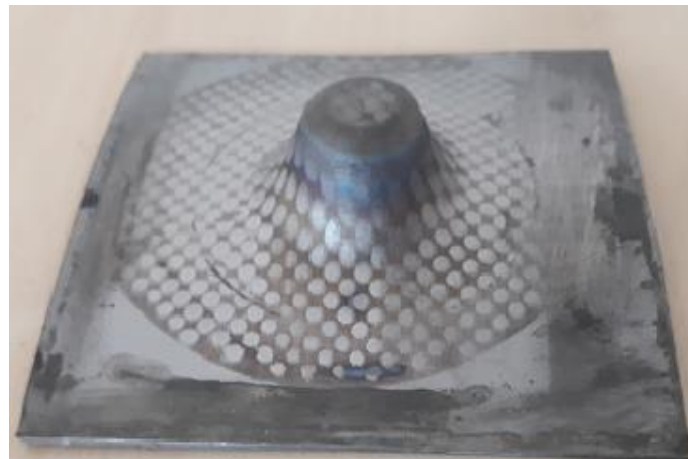
شکل ۸ الف) اندازه‌گیری کرنش‌ها، ب) هرم شکل‌داده شده



شکل ۹ نحوه قرائت کرنش‌های ایجاد شده

۳-۲-۲- ساخت هندسه‌های مخروطی و سهموی و ایجاد کرنش‌های حداکثری در آنها

از آنجایی که هندسه سهموی می‌تواند در حین شکل‌گیری کرنش‌هایی با دامنه‌های مختلف ایجاد کند، یکی از مهم‌ترین هندسه‌های مورد استفاده محققان است. هندسه مخروطی برای به دست آوردن عناصر مقعر و هندسه سهموی برای عناصر محدب استفاده می‌شود. نمونه قطعه شکل‌داده با هندسه سهموی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ هندسه سهموی ساخته شده با کمک ارتعاشات فراصوت

همانطور که در این شکل نشان داده شده است، در هندسه سهموی با افزایش عمق زاویه دیواره افزایش می‌یابد، در نتیجه کرنش‌های دو محوری بزرگتر و ضخامت‌های کمتری در مقایسه با هندسه مخروطی به دست می‌آید. ضخامت دیواره قطعه ساخته شده در هر زاویه از رابطه ۳ به دست می‌آید که به رابطه سینوس معروف است (در این رابطه ϕ زاویه و t ضخامت دیواره هندسه می‌باشد).

$$t_f = t_0 \cdot \sin \phi \quad (3)$$

طبق رابطه ۳ با افزایش زاویه دیواره هندسه منجر به کاهش ضخامت قطعه کار یعنی ε_3 می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه ۴ که رابطه حجم ثابت در تغییر شکل پلاستیک است، کرنش‌های ضخامت منفی بزرگتر باید با دو کرنش مثبت درون صفحه جبران شوند.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (4)$$

بنابراین، کرنش‌های اصلی بزرگتر (ε_1 و ε_2) با شکل‌دهی زوایای بزرگتر به دست می‌آیند.

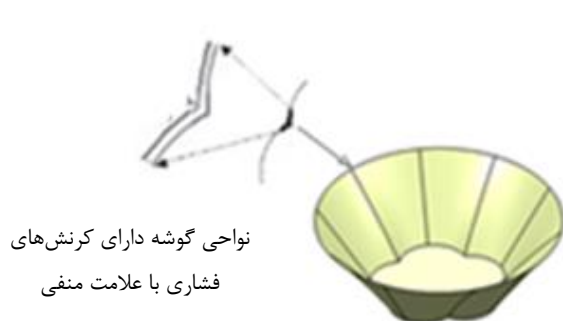
لازم به توضیح است نحوه انتخاب برای اندازه گیری کرنش‌های حادی انتخاب بیضی تغییر شکل یافته سالم یکی قبل از نشانه گذاری گسیخته شده می‌باشد. در تصویر ۱۱ یک نمونه گسیخته شده و محل اندازه گیری کرنش حادی نشان داده شده است.



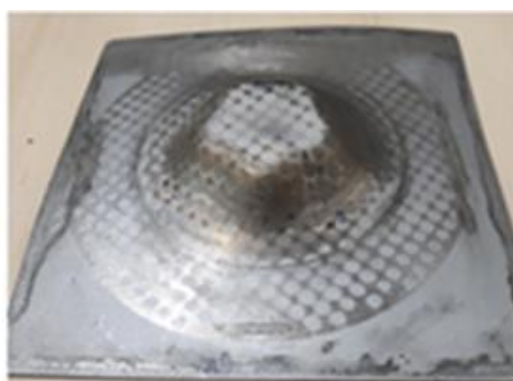
شکل ۱۱ محل اندازه‌گیری کرنش حادی در نمونه تغییر شکل یافته و گسیخته شده

۳-۲-۳- مطالعه کرنش‌ها برای هندسه پنج پره

هندسه پنج پره در شکل ۱۲-الف برای بررسی طیف گسترده‌ای از کرنش‌های قابل دسترس از جمله کرنش‌های فشاری شکل داده شده است. گوشه‌های شکل ۱۲-ب نواحی با کرنش‌های منفی هستند.



نواحی گوشه دارای کرنش‌های فشاری با علامت منفی



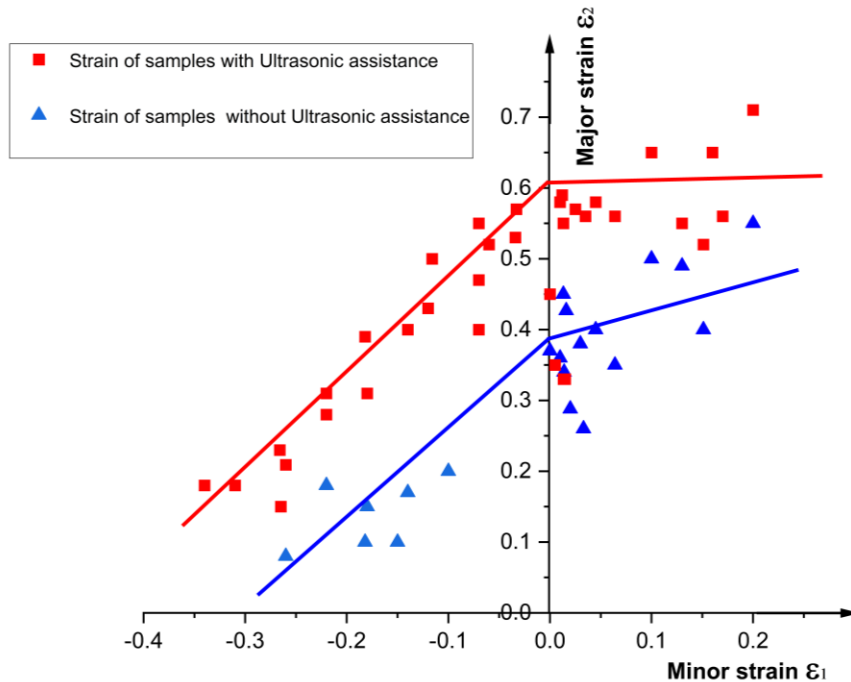
(الف)

(ب)

شکل ۱۲ (الف) قطعه پنج پره ساخته شده، (ب) هندسه طراحی شده ایده آل

۳-۲-۴- خلاصه نتایج FLD برای هندسه‌های مختلف ایجاد شده توسط EHIF سنتی و EHIF به کمک ارتعاشات فراصوت

تمام کرنش‌های به‌دست آمده برای هندسه‌های مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند تا تخمینی از کرنش‌های قابل دسترس در هر دو فرایند شکل‌دهی گرم با کمک فراصوت و سنتی ارائه شده باشد. بر اساس این نتایج، استفاده از کمک ارتعاشات فراصوت منجر به افزایشی در حدود ۲۵ تا ۳۵ درصدی منحنی حد شکل‌پذیری شده است. این افزایش را می‌توان با افزایش فاز شکل‌پذیرتر β همانطور که در تجزیه و تحلیل XRD و ریزساختار که پیش‌تر در بخش ۲-۴ بیان شد توجیه نمود.



شکل ۱۳ نمودار نهایی مقایسه FLD برای ورق آلیاژ Ti-6Al-4V شکل داده شده با دو روش EHIF به کمک ارتعاشات فراصوت و EHIF بدون کمک ارتعاشات فراصوت

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، تجهیزات EHIF با کمک فراصوت برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی با شکل‌پذیری پائین از جمله آلیاژ Ti-6Al-4V طراحی و ساخته شد. این تجهیز دمای ناحیه شکل‌دهی را تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد افزایش داد. در این پژوهش ابتدا عوامل موثر فرایند به روش RSM و ANOVA در نرم افزار Minitab بهینه سازی شدند، و نقطه بهینه پاسخ به دست آمد، سپس با تنظیم عوامل موثر فرایند بر مبنای این مقادیر بهینه، نمودار حد شکل‌دهی استخراج شد. در انتها نمودار حد شکل‌دهی حاصل شده از روش جدید و روش شکل‌دهی گرم معمولی برای آلیاژ Ti-6Al-4V مقایسه شده است. نتایج مهم به شرح زیر است:

- ارتعاشات فراصوت منجر به کاهش اصطکاک و جلوگیری از پارگی و پوسته شدن زود هنگام شده است.
- شکل ظاهری FLD های که با روش EHIF استخراج می‌شود کاملاً متفاوت از نتایج FLD سنتی می‌باشد.
- شکل‌دهی گرم با کمک ارتعاشات فراصوت منجر به کاهش دمای انتقال فاز شد. بنابراین باعث افزایش تا ۱۰ درصد فاز شکل‌پذیرتر BCC و رسیدن به کرنش‌های بالاتر در دماهای پایین تر شد.
- اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایند EHIF باعث افزایش ۲۵٪~۳۵٪ سطح منحنی FLD شد.
- به دلیل محدودیت های کم شکل‌دهی فرایند EHIF معمولی را می‌توان برای شکل دادن قطعات با هندسه‌های ساده استفاده کرد. با این حال با توجه به FLD های به دست آمده برای Ti-6Al-4V، EHIF به کمک فراصوت می‌تواند برای تولید هندسه های پیچیده تر و برای شرایطی که به کرنش‌های بالاتر قبل از پارگی نیاز دارند، استفاده شود.
- حداکثر مقادیر کرنش قابل حصول از هر دو فرایند EHIF با کمک فراصوت و فرایندهای EHIF معمولی برای ورق‌های Ti-6Al-4V ارائه شد.

References

- [1] Dufloy JR, Callebaut B, Verbert J, De Baerdemaeker H. Laser assisted incremental forming: formability and accuracy improvement. *CIRP annals*. 2007 Jan 1;56(1):273-6. doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.063
- [2] Fan G, Sun F, Meng X, Gao L, Tong G. Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010 Aug;49:941-7. doi: 10.1007/s00170-009-2472-2
- [3] Lee RS, Lin HC. Process design based on the deformation mechanism for the non-isothermal forging of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998 Jul 1;79(1-3):224-35. doi: 10.1016/S0924-0136(98)00016-8
- [4] Ortiz M, Penalva M, Iriondo E, López de Lacalle LN. Accuracy and surface quality improvements in the manufacturing of Ti-6Al-4V parts using hot single point incremental forming. *Metals*. 2019 Jun 20;9(6):697. doi: 10.3390/met9060697
- [5] Pandre S, Kumar GP, Kotkunde N, Suresh K, Singh SK. Analysis of forming characteristics for dual phase steel under warm incremental forming process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024 Apr;238(2):511-9. doi: 10.1177/09544089221094209
- [6] 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 Aug;227(8):1099-110. doi: 10.1177/0954405413484014
- [7] Kumar P, Tandon P. Process capabilities of commercially pure titanium grade 2 formed through warm incremental sheet forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021 Sep;235(11):1779-89. doi: 10.1177/0954405421995669
- [8] Baruah A, Pandivelan C, Jeevanantham AK. Optimization of AA5052 in incremental sheet forming using grey relational analysis. *Measurement*. 2017 Aug 1;106:95-100. doi: 10.1016/j.measurement.2017.04.029
- [9] Xiao X, Kim CI, Lv XD, Hwang TS, Kim YS. Formability and forming force in incremental sheet forming of AA7075-T6 at different temperatures. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019 Aug;33:3795-802. doi: 10.1007/s12598-022-02171-2
- [10] Honarpisheh M, Abdolhoseini MJ, Amini S. Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming of Ti-6Al-4V sheet using electrical current. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016 Apr;83:2027-37. doi: 10.1007/s00170-015-7717-7
- [11] Barani Shooli A, Amini Najafabadi S, Farzin M. Experimental formability investigation of titanium alloy in hot incremental sheet forming process. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 Aug 10;15(6):107-14. [In Persian]
- [12] Najafabady SA, 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 Dec;87:3579-88. doi: 10.1007/s00170-016-8712-3
- [13] Liu C, Duan H, Chu X, Li H, Zhao Z, Ao D. Formability and microstructure evolution of Ti-6Al-4 V alloy in electric hot incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022 Mar;119(5):2935-44. doi: 10.1007/s00170-021-08583-1
- [14] Valoppi B, Zhang Z, Deng M, Ghiotti A, Bruschi S, Ehmann KF, Cao J. On the fracture characterization in double-sided incremental forming of Ti6Al4V sheets at elevated temperatures. *Procedia Manufacturing*. 2017 Jan 1;10:407-16. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.014
- [15] Saidi B, Giraud Moreau L, 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 Mar 17;101:873-80. doi: 10.1007/s00170-018-2975-9
- [16] Li W, Attallah MM, Essa K. Experimental and numerical investigations on the process quality and microstructure during induction heating assisted incremental forming of Ti-6Al-4V sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022 Jan 1;299:117323. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117323
- [17] Ghafari M, Elyasi M, Mirnia MJ. Thermal analysis of hot spinning of commercially pure titanium by resistance heating. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023;10(10):43-58. doi: 10.22034/ijme.2024.411268.1814 [In Persian]
- [18] Balamuth L. Progress in ultrasonic metal forming. *SAE Technical Paper*; 1965 Feb 1.
- [19] Amini S, Hosseinpour Gollo A, Paktinat H. An investigation of conventional and ultrasonic-assisted incremental forming of annealed AA1050 sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017 May;90:1569-78. doi: 10.1007/s00170-016-9458-7
- [20] Rasoli MA, Abdullah A, Farzin M, Tehrani AF, Taherizadeh A. Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012 Jun 1;212(6):1443-52. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.006

- [21] Lin J, Li J, Liu T, Zhu L, Chu X, Zhao G, Guan Y. Evaluation of friction reduction and frictionless stress in ultrasonic vibration forming process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021 Feb 1;288:116881. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2020.116881](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116881)
- [22] Abedini R, Abdullah A, Alizadeh Y, Fartashvand V. Effect of ultrasonic on hot compaction of AA1100 and Ti-6Al-4V powders. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2017;3(3):1-12. [In Persian]
- [23] Roohi H, Deilami Azodi H, Safari M. Investigation on Forming Limit of Aluminum Sheet in Warm Incremental Forming Process. *Modares Mechanical Engineering*. 2019 Feb 10;19(2):259-68. [In Persian]
- [24] Jeswiet J, Geiger M, Engel U, Kleiner M, Schikorra M, Duflou J, Neugebauer R, Bariani P, Bruschi S. Metal forming progress since 2000. *CIRP Journal of manufacturing Science and technology*. 2008 Jan 1;1(1):2-17.
- [25] Silva MB, Skjødtt M, Atkins AG, Bay N, Martins PA. Single-point incremental forming and formability—failure diagrams. *The journal of strain analysis for engineering design*. 2008 Jan 1;43(1):15-35. doi: [10.1243/03093247JSA340](https://doi.org/10.1243/03093247JSA340)
- [26] Filice L, Fratini L, Micari F. Analysis of material formability in incremental forming. *CIRP Annals*. 2002 Jan 1;51(1):199-202. doi: [10.1016/S0007-8506\(07\)61499-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61499-1)
- [27] Jeswiet J, Hagan E, Szekeres A. Forming parameters for incremental forming of aluminium alloy sheet metal. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2002 Oct 1;216(10):1367-71. doi: [10.1243/095440502320405458](https://doi.org/10.1243/095440502320405458)
- [28] Shim MS, Park JJ. The formability of aluminum sheet in incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001 Jun 15;113(1-3):654-8. doi: [10.1016/S0924-0136\(01\)00679-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00679-3)
- [29] Martins PA, Bay N, Skjødtt M, Silva MB. Theory of single point incremental forming. *CIRP annals*. 2008 Jan 1;57(1):247-52.