سال ۲۹، شماره ۱۳۱، صفحات ۴۴–۵۵، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

بررسی کاربردی فرایند شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای و چندنقطه‌ای فلزات

مجتبی حسنلو[۱ و *]، سینا مکاری[۲]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، طراحی کاربردی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

[۲] کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان، ایران

*مسئول مکاتبات: hasanlumojtaba@gmail.com

چکیده

اختصاصاً شکل‌دهی نموی ، فرآیندی نوین در زمینه شکل‌دهی ورق محسوب می‌شود، که نسبتاً کم‌هزینه، چابک و قابل اجرا با تجهیزات ساخت‌وتولیدی به نسبت ساده و دسترس، مانند: یک ابزار سرکروی و یک دستگاه فرز CNC و یک نگهدارنده ساده به منظور مهار ورق، قابل انجام شده است؛ این روش ازانعطاف پذیری بالاتری نسبت به سایر روش‌های نمونه‌سازی سریع برخوردار است. در این فرآیند برای شکل‌دهی ورق نیاز به ساخت قالب به شکل متداول نیست، همچنین نیاز به دستگاه پرس و از این قبیل تجهیزات، نیست؛ در نتیجه این شیوه فرم‌دهی ورق، بسیار روشی مناسب و اقتصادی به منظور تولید قطعات ورق‌گونه با تیراژ کم و یا آماده‌سازی نمونه‌های سریع جهت ارائه به مشتری یا بازار شده است، زیرا با استفاده از این نوع شکل‌دهی می‌توان از دو مقوله مهم در راستای تولید این چنین قطعات، که هزینه و زمان زیاد آماده‌سازی تجهیزات لازم شده است، صرفه‌جویی کرد. شکل‌دهی ورق در این روش، نتیجه درکنار هم قرارگرفتن تغییر شکل‌های پلاستیک موضعی، که درناحیه کوچکی زیر ابزارسرکروی با حرکت به نسبت آهسته ابزار به‌وجود می‌آید، تشکیل می‌شود؛ همان طور که بیان شد حرکت ابزار و درنتیجه سرعت فرآیند آهسته شده است، بنابراین روش مناسبی، برای تولید انبوه نیست.

واژگان کلیدی

شکل‌دهی فلزات
نموی تک نقطه‌ای و چند نقطه‌ای
ابزار شکل‌دهی
سرعت پیشروی
اسپیندل

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۶/۲۰
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۹/۱۱

۱ مقدمه

شکل‌دهی نموی چند مرحله‌ای ایده جدیدی به حساب نمی‌آید زیرا در سال ۱۹۹۷ در ژاپن توسط کیتازاوا[۱] و همکاران، مقاله‌ای به چاپ رسید [۱] که در آن شکل هندسی نیمه بیضی‌گون را مورد آزمایش قرار دادند و حد شکل‌دهی را تا قبل از شکست ورق، برای نسبت ارتفاع به شعاع‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. جسویت[۲] و همکاران در سال ۲۰۰۲ طی مقاله‌ای [۲] آزمایشی را ارائه دادند که در آن، در سه مرحله شکل‌دهی نموی توانستند رفلکتور چراغ جلوی اتومبیلی را نمونه‌سازی نمایند. به طور کلی هدفی که در شکل‌دهی نموی چند مرحله‌ای دنبال می‌شود، برطرف نمودن نسبی محدودیت‌های موجود در روش شکل‌دهی نموی تک‌مرحله‌ای شده است، بعنوان مثال، همان طور که پیش از این به آن اشاره شد، یکی از محدودیت‌های این روش با توجه به قانون سینوسی، مقادیر زاویه‌ای بوده، که با روش چند مرحله‌ای که بسیار امیدبخش در حل این مشکل شده است، این محدودیت تا حد چشم‌گیری برطرف گردیده، در ادامه با بیان مقاله‌ای که در این زمینه منتشر شده درکی بهتر از این موضوع می‌توان پیدا نمود.اسکجوئیت و بای[۳] در سال ۲۰۰۸ در مقاله‌ای [۳]، شکل‌دهی نموی را با توجه به مسیر حرکت ابزار در پنج مرحله انجام دادند، طی این تحقیق، قطعه استوانه‌ای شکل با ارتفاع و شعاع یکسان، از ورقی تخت، فرم داده شد که نکته حایز اهمیت در این بررسی، رسانیدن زاویه دیواره نزدیک به ۹۰ درجه بوده است، که پیش از آن این مسئله از محدودیت‌های فرآیند مذکور به حساب می‌آمد. در شکل ۱ نمونه آزمایشگاهی تحقیق به تصویر کشیده شده است.

شکل ۱: شکل‌دهی چندمرحله ی، تأثیر تفاوت در مسیر حرکت ابزار [۳].

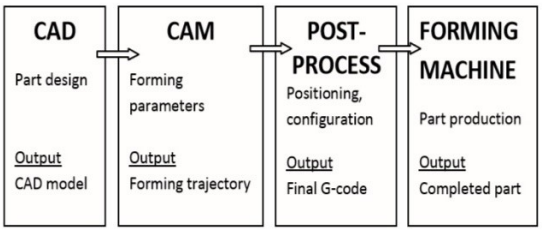
فرآیند فرم‌دهی نموی ورق‌های فلزی، در سال‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۶۷ میلادی به ترتیب توسط آقایان راکس و لیزاک[۴] به‌عنوان یک طرح اولیه مطرح گردید [۴]. به تدریج تحقیقات گسترده‌ای در کشور ژاپن از سال ۱۹۹۰ با انجام آزمایشاتی آغاز شد، تا اینکه در سال ۱۹۹۴ در شرکت Matsubara (ژاپن) از این روش به‌عنوان راهکاری جهت آماده‌سازی نمونه‌های اولیه در تیراژ کم استفاده گردید [۵]. درابتدا به‌گونه‌ای از این روش استفاده می‌گردید، که مسیرهای حرکت ابزار سه بعدی بسیار ساده بودند اما به تدریج با پیشرفت دستگاه‌های CNC[۵] از نظر سخت‌افزاری و نرم‌افزاری و همچنین پایین‌تر آمدن قیمت اینگونه تجهیزات، این فرآیند بیشتر از قبل مورد توجّه قرار گرفت، چون دیگر این امکان فرآهم آمده بود که با ترکیب نرم‌افزارهای توانمند CAD/CAM[۶]، قطعات نامتقارن[۷] ورقی شکل را در مدت زمانی به نسبت

[1] Kitazawa [2] Jeswiet [3] M. Skjoedt, N. Bay [4] Raux, Leszak [5] Computer Numerical Control [6] Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing [7] asymmetric

کوتاه، بدون سرمایه گذاری هنگفت تولید نمود [۶]. شکل‌دهی نموی ورق، از نظر تکنولوژی اساساً، تکیه دارد به دو اصل، یکی اتوماسیون و دیگری سیستم کنترل عددی، به‌گونه‌ای که قطعه مورد نظر توسط نرم‌افزارهای CAD مدل و طراحی می‌شود، که این مدل به‌عنوان مبنایی برای ایجاد مسیر شکل‌دهی توسط نرم‌افزار CAM به‌کارگرفته می‌شود، سپس می‌بایست این مسیرهای شکل‌دهی از طریق پردازنده، تبدیل به کدهایی قابل شناسایی برای دستگاه CNC شوند، تا بتوان قطعه با فرمی مطلوب را از یک ورق فلزی تخت که توسط فیکسچر[8] (نگهدارنده) مهار شده، تولید نمود.

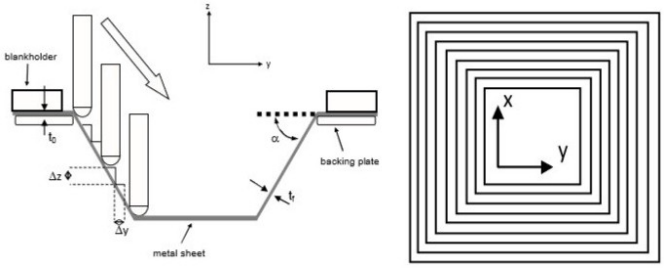
۲ ساختار فرآیند شکل‌دهی

شکل‌دهی نموی ورق، از نظر تکنولوژی اساساً تکیه دارد به دو اصل، یکی اتوماسیون و دیگری سیستم کنترل عددی، به‌گونه‌ای که قطعه مورد نظر توسط نرم‌افزارهای CAD مدل و طراحی می‌شود، که این مدل به‌عنوان مبنایی برای ایجاد مسیر شکل‌دهی توسط نرم‌افزار CAM به‌کارگرفته می‌شود، سپس می‌بایست این مسیرهای شکل‌دهی از طریق پردازنده[9]، تبدیل به کدهایی قابل شناسایی برای دستگاه CNC شوند، تا بتوان قطعه با فرمی مطلوب را از یک ورق فلزی تخت که توسط فیکسچر مهارشده، تولید نمود؛ برای درک بهتر، مراحل ساختاری فرآیند مذکور در شکل ۲ آورده شده است [۷].



شکل ۲: مراحل ساختاری فرآیند شکل‌دهی نموی ورق [۷].

همان‌طور که پیش از این ذکر گردید، دلیل استفاده از این روش، بالا بودن سرعت و انعطاف پذیری این گونه فرم‌دهی ورق نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد، به‌طوریکه تغییر تنظیمات و استراتژی‌های حرکتی ابزار به سادگی امکان‌پذیر شده است، حتی در عمل برای تولید و طراحی قطعات با هندسه ساده خیلی سریع می‌توان ایده را به واقعیت و نمونه تبدیل نمود. از جهاتی می‌توان گفت، اساس این فرآیند مبتی بر شکل‌دهی لایه به لایه شده است؛ از انباشته شدن و روی هم قرار گرفتن این لایه‌ها، شکل مورد نظر ایجاد می‌گردد، برای درک بهتر موضوع، از شکل ۳ استفاده شده است.



شکل ۳: تصویری از شکل‌دهی لایه‌به‌لایه [۸].

۱.۲ کاربرد فن آوری شکل‌دهی نموی

با توجه به ویژگی‌هایی که در خصوص فن‌آوری شکل‌دهی نموی ذکر گردید، کاملاً واضح‌است که این روش می‌تواند در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی و ساخت‌وتولیدی از محبوبیت و اولویت خاصی برخوردار باشد، در این بخش به تعدادی از حوزه‌های کاربردی این فن‌آوری مهم می‌پردازیم.

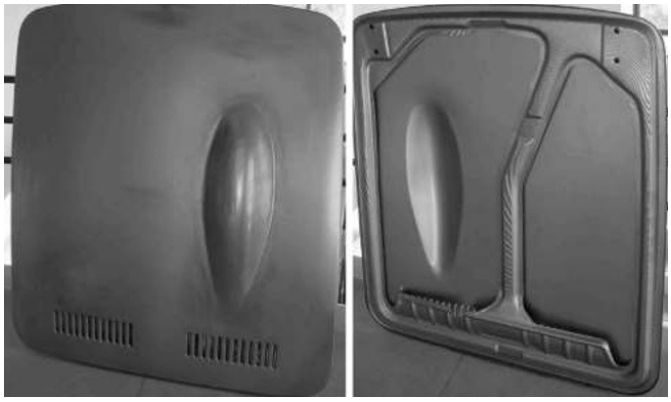
۲.۲ کاربرد در صنایع ریلی و خودرو

همان‌طور می‌دانیم، صنعت خودرو یکی از پویاترین صنایع موجود می‌باشد، به دلیل رقابتی که بین شرکت‌های مختلف خودروسازی وجود دارد، سالانه با حجم زیادی از تغییرات در شکل ظاهری بدنه و حتی در داخل کابین خودرو روبرو هستیم؛ ازآنجایی که اجزای خودرو از قطعات به نسبت بزرگ تشکیل شده است، لذا برای اجرایی کردن یک ایده می‌باست، هزینه‌های سنگین قالب‌سازی را متقبل شد و زمان زیادی را سپری نمود، این دو موضوع با پویایی و رقابتی بودن این صنعت منافات دارد، بنابراین روشی با ویژگی‌های (ISF) می‌تواند از محبوبیت ویژه‌ای در این صنعت برخوردار باشد مخصوصاً در مراحل تحقیق و توسعه[10].

برای درک بهتری از کاربردهای این روش، در زیر چند عکس از کارهای انجام شده در این حوزه آورده شده‌است. شکل ۴ نمونه از کاسه چراغ اتومبیل نشان داده شده است.

شکل ۴: کاسه چراغ جلوی اتومبیل [۲].

شکل ۵ و شکل ۶ نمونه‌ای از درب موتور خودروی هوندا S800 است که با کمک روش شکل‌دهی نموی ساخته شده است [۹].



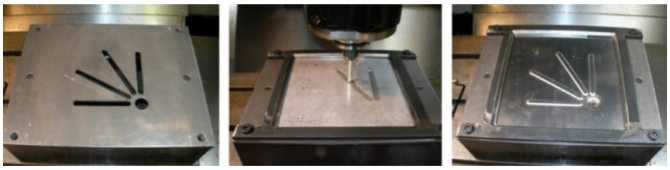
شکل ۵: نمونه درب موتور خودروی هوندا S800 [۹].

[8]fixture [9]post processor [10]research & development

شکل ۶: ساخت نمونه دماغه قطار توسط فرآیند (ISF) [۹].

۳.۲ کاربرد در صنایع وسایل خانگی

یکی دیگر از حوزه‌های کاربرد فن‌آوری (ISF) ساخت نمونه‌های اولیه وسایل منزل می‌باشد، که این موضوع باعث می‌شود این دسته از شرکت‌ها، بدون سرمایه‌گذاری بتوانند نمونه و طرح‌های آینده خود را در نمایشگاه‌های مربوطه عرضه کنند تا از استقبال یا عدم استقبال از طرح آگاهی یابند. در شکل ۷ و ۸ نمونه‌ای از این گونه تجهیزات آمده است.



شکل ۷: مراحل ساخت نمونه‌ای از سینک اشپزخونه [۱۰].

شکل ۸: نمونه تکمیل‌شده [۱۰].

۴.۲ کاربرد در صنایع تجهیزات پزشکی

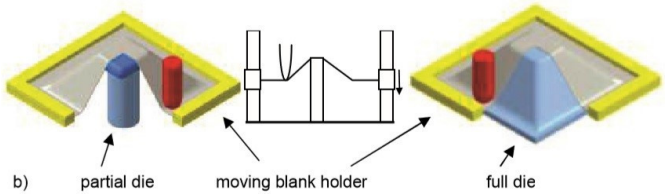
با توجه به پیشرفت روزافزون علم پزشکی و استفاده از مواد فلزی و مصنوعی جهت درمان و برطرف نمودن نسبی نواقص ومعلولیت‌های جسمی و حرکتی و همچنین تفاوت‌های ابعادی اندام هر شخص با شخص دیگر، مشخص می‌کند که روش (ISF) در این عرصه نیز میتواند نقش پررنگی را ایفا کند، که اشکال ۹ و ۱۰، مهر تأییدی بر این گفته است.

شکل ۹: ساخت پوسته فلزی جمجمه [۱۱]. بخشی از دندان مصنوعی [۱۲].

شکل ۱۰: مدل‌کردن و سخت نمونه قوزک پای مصنوعی [۱۳].

۵.۲ شکل‌دهی نموی دو نقطه‌ای

در این روش، زیر ورق خالی نیست و سنبه فرمی(ساپورت) زیر ورق وجود دارد که می‌بایست ابزار سرکروی با حرکت تدریجی و کنترل شده از طریق کنترلر CNC، ورق مهار و ثابت شده را روی سنبه فرمدار بخواباند و ورق، شکل سنبه فرم را به خود بگیرد؛ یکی از نکات قابل توجه در این نوع شکل‌دهی، مهار ورق نسبت به روش اول می‌باشد، زیرا در این روش، قفل یا Clamped شدن ورق توسط فریم متحرک، که توسط میل‌راهنما فقط در راستای گام عمودی (معمولا محور Z) قابل حرکت می‌باشد مهار می‌شود، این مسئله باعث جلوگیری از انحرافات افقی ورق نسبت به سنبه فرم می‌شود و فرم قابل قبولی برای ورق حاصل می‌گردد، شکل ۱۱ نشان دهنده نمونه‌ای از شکل‌دهی نموی دو نقطه‌ای است.



شکل ۱۱: شمای فیزیکی از روش‌های شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای ساپورت کامل (سمت راست)، ساپورت جزئی (سمت چپ) [۱۴].

بنابراین در این روش مجموعه قالب، سنبه فرم و ورق‌گیر، روی میز دستگاه CNC نصب می‌شوند. حرکت تدریجی نوک ابزار با لحاظ کردن فاصله‌ای تقریباً به اندازه ضخامت ورق، روی قطعه به آرامی حرکت می‌کند، در نتیجه تحت نیروی وزن ورق‌گیر و نیروی فشاری ابزار روی ورق، فرم مورد نظر پدید می‌آید. در این شرایط ناحیه در حال شکل‌پذیری، در دو نقطه دارای تماس فیزیکی است؛ از پایین تماس با سنبه فرم و از بالا نوک ابزار شکل‌دهی؛ به همین دلیل به این روش شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با نام اختصاری TPIF[11] می‌گویند [۱۵]، چون فرم و حرکت ورق به سمت بالا به صورت محدب[12] و برآمده است این حالت را با نام مثبت[13] نیز می‌شناسند. شکل ۱۲ نمونه آزمایشگاهی از فرایند شکل‌دهی نموی نمایش داده شده است.

[11] two point incremental forming [12] convex [13] positive

شکل ۱۲: نمونه آزمایشگاهی از شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای قالب کامل[۱۴] [۱۵].

البته لازم به ذکر است که دسته دوم شکل‌دهی نموی (TPIF)، را می‌توان با توجه به نوع ساپورت به دو حالت تقسیم بندی نمود [۱۶].

- شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با ساپورت ثابت[۱۵]
- شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با ساپورت متحرک[۱۶]

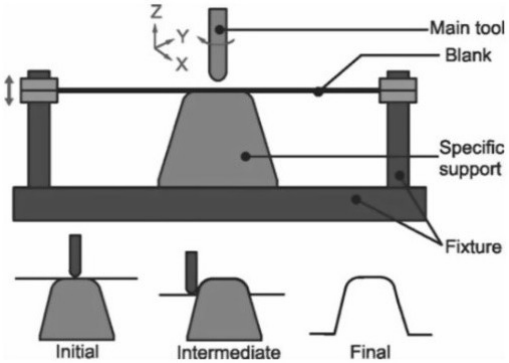
اشکال ۱۳، ۱۴ و ۱۵ می‌تواند درکی بهتر از تفاوت بین دو مورد ذکر شده در قسمت بالا ایجاد نمایند.

۳ روش‌های نوین شکل‌دهی نموی نقطه‌ای

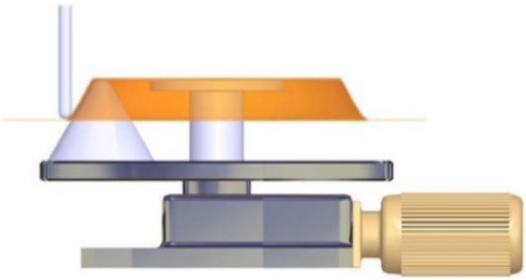
همان طور که در بخش‌های قبلی به آن اشاره شد روش شکل‌دهی نموی ورق (ISF) فرآیندی چابک، انعطاف‌پذیر و در عرصه شکل‌دهی ورق بسیار توانمند است و از لحاظ اقتصادی، نسبت به سایر روش‌های متداول شکل‌دهی ورق، بسیار کم‌هزینه است؛ بنابراین با توجه به خصوصیات ذکرشده، محققان و دانشمندان بسیاری به طور روزافزون با هدف وسعت بخشیدن به دامنه کاربرد فرآیند (ISF)، دست به ادغام این روش شکل‌دهی با سایر فن‌آوری‌ها نوین زده‌اند؛ به موجب این تلاش‌ها و اقدامات، در دهه اخیر روش‌هایی در جهت بهبود و افزایش قابلیت فرآیند شکل‌دهی نموی ایجاد شده است که در این قسمت به چند مورد اصلی می‌پردازیم.

۱.۳ شکل‌دهی نموی به کمک لیزر[۱۷]

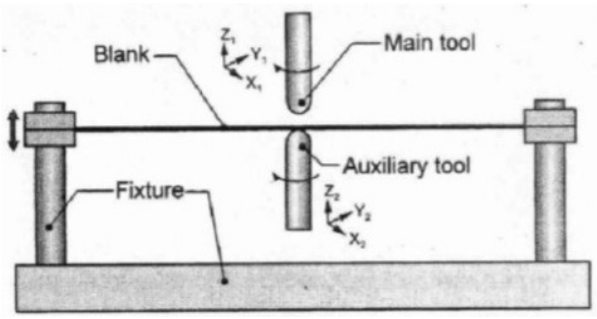
همان طور که می‌دانیم، حرارت و بالا رفتن دمای ورق، باعث کاهش تنش تسلیم و درنتیجه افزایش قابلیت فرم‌پذیری ماده می‌گردد؛ در فرآیند شکل‌دهی نموی نقطه‌ای، برای فرم دادن ورق در ابعاد بزرگ، گرم کردن تمامی ورق کاری مناسب نیست، زیرا هم انرژی زیادی را نیاز دارد و هم رسیدن به ابعاد مورد نظر، کاری غیرممکن می‌گردد؛ توسط فن‌آوری لیزر می‌توان حرارت‌های نقطه‌ای و موضعی دقیقاً در حوزه‌ای که ابزار سرکروی شکل‌دهی نموی، در حال فرم‌کاری است ایجاد نمود، که این امر باعث کاهش انرژی لازم جهت کرنش‌های نموی می‌گردد، همچنین با کم کردن اثر برگشت فنری، دقت ابعادی مطلوب‌تری به دست می‌آید [۱۶]. شکل ۱۶ نمونه از شکل‌دهی نموی با دستگاه لیزر نمایش داده شده است.



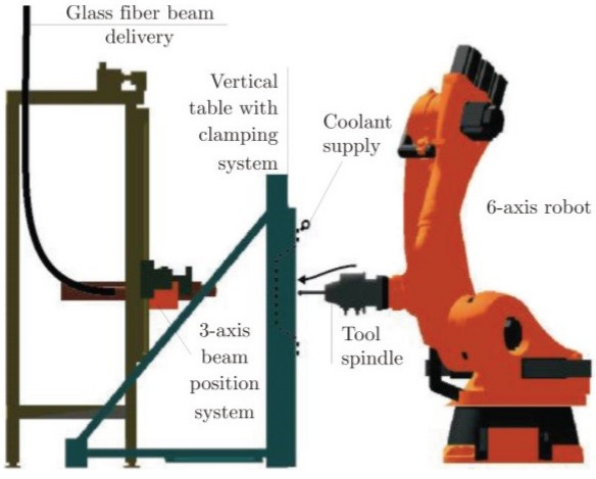
شکل ۱۳: شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با ساپورت ثابت [۱۶].



شکل ۱۴: شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با ساپورت متحرک [۱۶].



شکل ۱۵: شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با ساپورت متحرک متقابل به روش IFWCT[۱۸] [۱۷].

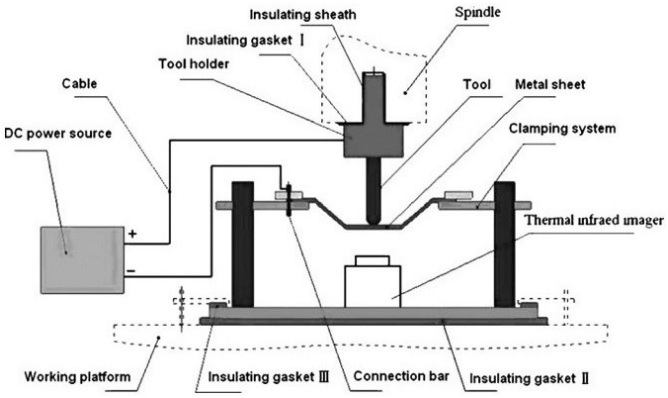


شکل ۱۶: شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای با کمک لیزر [۱۶].

[14]TPIF with complete die [15]TPIF with static support [16]TPIF with kinematic support [17]Laser support SPIF [18]incremental forming with counter tool

۲.۳ شکل‌دهی نموی به کمک جریان الکتریکی[۱۹]

همان طور که در خصوص شکل‌دهی نموی از طریق لیزر ذکر گردید، ایجاد حرارت در نوک ابزار سرکروی به صورت موضعی باعث بهبود فرآیند (ISF) میگردد، در شکل‌دهی نموی به کمک جریان الکتریکی، تأمین کننده انرژی جهت ایجاد حرارت، جریان الکتریکی مستقیم[۲۰] می‌باشد [۱۸]. شکل ۱۷ نمونه‌ای از شکل‌دهی نموی به کمک جریان الکتریکی نمایش داده شده است.

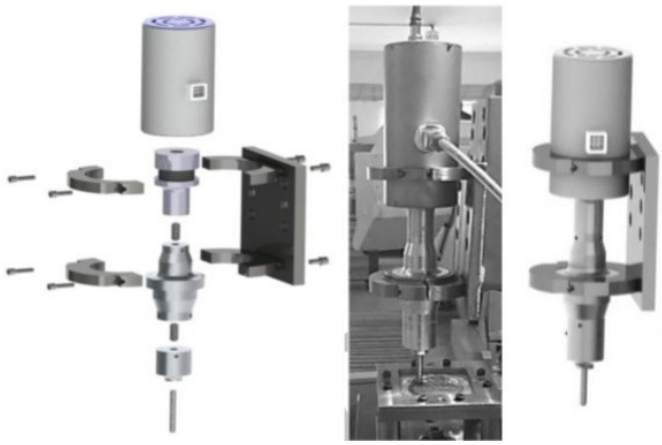


شکل ۱۷: شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای با کمک جریان الکتریکی [۱۸].

همان طور که در تصویر می‌توان مشاهده کرد باعبور جریان بین ابزار و قطعه‌کار، دمای نقطه تماس به نسبت قدرت منبع قدرت، بالا می‌رود؛ می‌بایست برای عبور بهتر جریان از سیال‌های مناسب که در دمای بالا خاصیتشان از بین نرود استفاده نمود (روانکارهای گرافیتی).

۳.۳ شکل‌دهی نموی به کمک نوسانات مافوق صوت[۲۱]

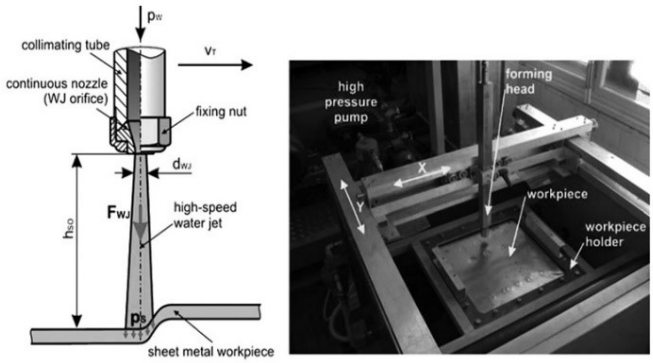
یکی دیگر از روش‌های نوین استفاده از نوسانات مافوق صوت(آلتراسونیک) در شکل‌دهی نموی ورق است، در واقع نوسانات مافوق صوت باعث کاهش اصطکاک وهمچنین کاهش تنش سیلان (اثر بلاها[۲۲]) به منظور شکل‌دهی می‌گردد، که همین امر باعث بهبود کیفیت سطح و افزایش سرعت فرآیند می‌شود [۱۹]. شکل ۱۸ نمونه‌ای از شکل‌دهی نموی به کمک نوسانات مافوق صوت نمایش داده شده است.



شکل ۱۸: شکل‌دهی نموی با کمک نوسانات مافوق صوت [۱۹].

۴.۳ شکل‌دهی نموی به کمک واتر جت[۲۳]

در این روش از طریق نیروی فشاری آب فرم نموی ورق صورت می‌پذیرد و ابزار صلب دیگر در این فرآیند حذف شده است. از مزیت‌های این روش،می‌تواند کیفیت سطح و انعطاف‌پذیری بالای که دارد باشد و از نظر هزینه تجهیزات نیز اقتصادی تر است ، اما از معایب این روش می‌توان به دقت پایین ابعادی و مصرف انرژی و زمان بیشتر نسبت به فرآیند شکل‌دهی نموی با ابزار صلب سرکروی نام برد. در زیر تصویری از تجهیزات و ساختار فرآیند آورده شده است [۲۰]. شکل ۱۹ نمونه‌ای از شکل‌دهی نموی به کمک واتر جت نمایش داده شده است.



شکل ۱۹: شکل‌دهی نموی با کمک فشار بالای آب [۲۰].

۵.۳ شکل‌دهی نموی به کمک ربات[۲۴]

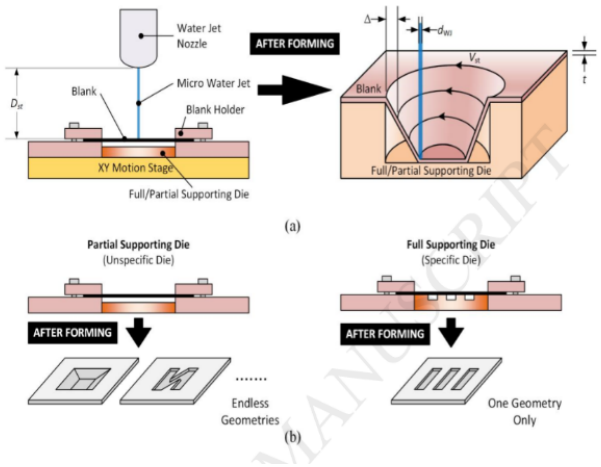
یکی دیگر از فن‌آوری‌های نوین و بسیار کاربردی، ترکیب شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با روبات به صورت دو طرفه است، این فرآیند از سرعت و دقت بسیار بالاتری نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی نموی برخوردار است، به‌طوری که می‌توان گفت، این نوع شکل‌دهی نموی، در واقع ترکیبی از شکل‌دهی نموی ـ نقطه‌ای، مثبت و منفی است، برای روشن شدن مطلب از تصویر زیر که خود گویای ارتقای فن‌آوری شکل‌دهی نموی است، استفاده شده است. شکل ۲۰ نمونه‌ای از شکل‌دهی نموی به کمک ربات نمایش داده شده است.

شکل ۲۰: شکل‌دهی نموی از طریق ترکیب دو ربات [۱۴].

ایشی[۲۵] و همکاران [۲۱] به بررسی تجربی عملیات شکل‌دهی نموی با

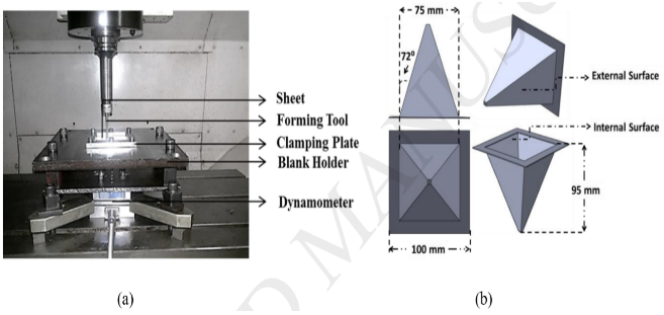
[19]electric hot incremental forming (EHIF) [20]direct current [21]ultrasonic [22]Blaha effect [23]water jet single incremental forming (WJISMF)
[24]robot forming [25]Yi Shi

استفاده از واترجت پرداختند این تحقیق بعنوان یک نمونه جدید در فرایندهای شکل‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرد در این روش بجای استفاده از ابزار شکل‌دهی صلب از آب با فشار و سرعت بالا جهت تغییر شکل پلاستیک استفاده می‌شود. در شکل ۲۱ عملیات شکل‌دهی نموی با واترجت نشان داده شده است.



شکل ۲۱: فرایند شکل‌دهی نموی با واترجت با انواع ساپورت‌ها [۲۱].

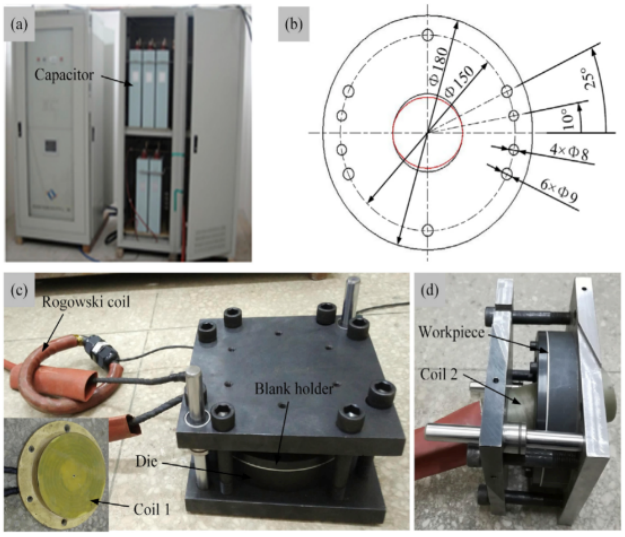
تاندون و همکاران [۲۲] به بررسی بافت و زیرساختارهای ورق شکل‌دهی الومینیوم با روش فرم‌دهی نموی تک نقطه‌ای پرداختند. آن‌ها پارامترهایی نظیر دقت اندازه‌گیری، ضخامت یکنواخت، کرنش‌های صفحه‌ای، تنش ون میزز و کرنش پلاستیک معادل مورد بررسی قرار داده و به جواب‌های معقولی نیز دست یافتند. که این تحلیل بر پایه روش EBSD[۲۶] و XRD[۲۷] صورت پذیرفت. در شکل ۲۲ نمونه شبیه‌سازی و ساخته شده از این فرایند به نمایش گذاشته شده است.



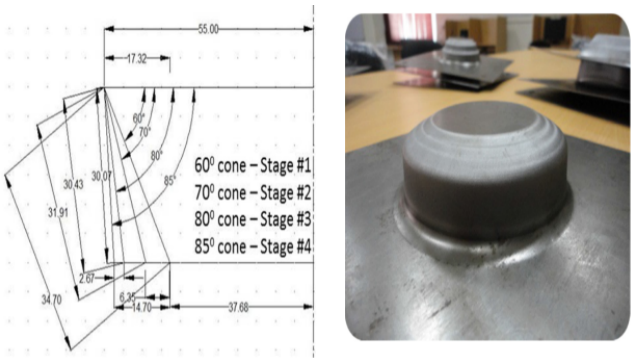
شکل ۲۲: a) مدل تجربی b) مدل شبیه‌سازی شده [۲۲].

سو[۲۸] و همکاران [۲۳] به بررسی شکل‌دهی دونقطه‌ای مغناطیسی پرداختند. جهت حفظ ویژگی‌های محلی یک شکل‌دهی در قطعه کارهای بزرگ روش نوینی تحت عنوان شکل‌دهی دومرحله‌ای الکترومغناطیسی پیشنهاد شده است این روش ترکیبی از دو روش شکل‌دهی و کالیبراسیون الکترومغناطیسی است که برای شکل‌دهی ورق‌های بزرگ جهت سوراخ‌کاری مورب[۲۹] می‌تواند روش قابل ملاحظه‌ای محسوب گردد. که در شکل ۲۳ نمونه آزمایشگاهی به نمایش گذاشته شده است.

رگالا[۳۰] و همکاران [۲۴] به بررسی شبیه‌سازی المان محدود شکل‌دهی نموی چند مرحله‌ای پرداختند. در شبیه‌سازی المان محدود یک فرایند چند مرحله‌ای شکل‌دهی نموی به نتایج قابل ملاحظه‌ای جهت حفظ کرنش و ضخامت یکنواخت و همچنین افزایش دقت هندسی منجر شود. که در شکل ۲۴ هندسه مورد آزمایش ساخته و به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۲۳: تجهیزات آزمایشگاهی تست آزمایشگاهی مغناطیسی [۲۳].

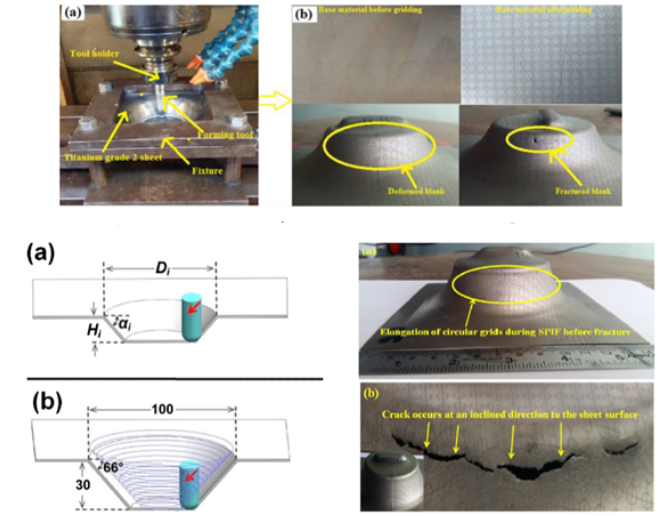


شکل ۲۴: هندسه مدل ساخته‌شده شکل‌دهی نموی چندمرحله‌ای [۲۴].

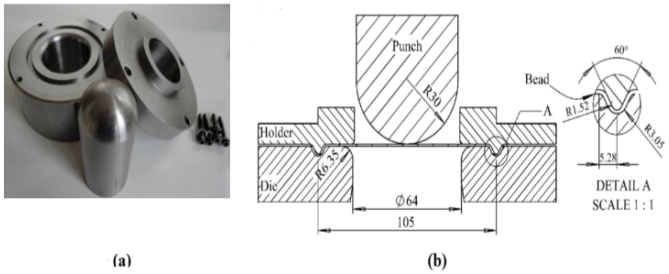
نارایانان[۳۱] و همکاران [۲۵] به بررسی پدیده شکست در ورق‌های تیتانیوم درجه ۲ با استفاده از شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای با استفاده از روش EDS[۳۲] پرداختند. بدین صورت که ۲ پارامتر تاثیر بسزایی در شکست ورق حین فرایند شکل‌دهی خواهد داشت که این پارامترها قطر ابزار شکل‌دهی و سرعت اسپیندل است که قطر ابزار و سرعت اسپیندل به ترتیب نباید بیشتر از ۱۲ میلی‌متر و ۶۰۰ rpm باشد. که در شکل ۲۵ نمونه‌های آزمایشی از این تست به نشان داده شده است.

زاهدی و همکاران [۲۶] به بررسی تجربی پدیده گلویی شدن به همراه مدلسازی عددی جهت تخمین شکست در حین فرایند شکل‌دهی منحنی محدود ورق‌های چند لایه‌ای آلومنیوم و کروم با استفاده از مدل خرابی پلاستیسیته پرداختند. این دو لایه مختلف با استفاده از تست پانچ به همدیگر متصل می‌کنیم و سپس با استفاده از مدلسازی تئوری پلاستیسیته از اثرات فشار هیدرو استاتیک[۳۳] و زاویه لود[۳۴] دست پیدا کردند. در شکل ۲۶ مدل طراحی شده و نمونه ساخته شده نشان داده شده است.

[26]electron back scatter diffraction [27]x-ray diffraction [28]Su [29]oblique hole-flanged [30]Regalla [31]Narayanan [32]energy dispersive x-ray spectroscopy [33]hydrostatic pressure [34]Lode angle

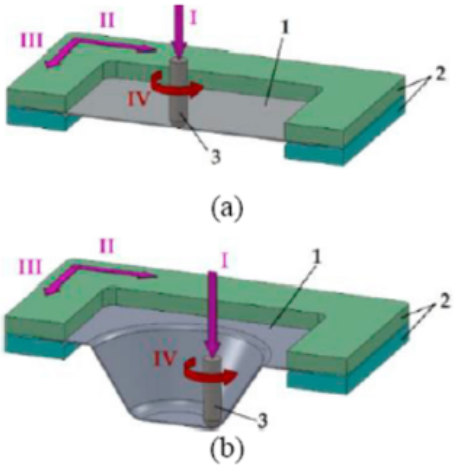


شکل ۲۵: مدل‌های آزمایشگاهی شکل‌دهی‌شده به روش EDS [۲۵].



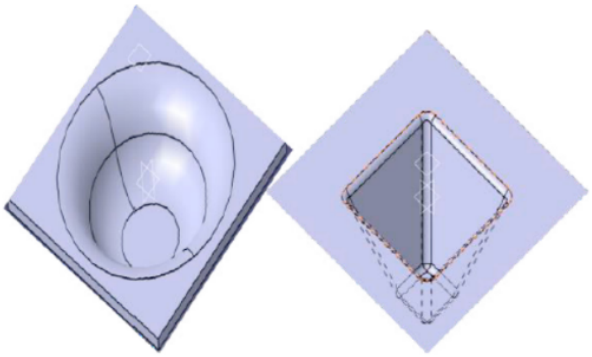
شکل ۲۶: a) تجهیزات تجربی b) مدل طراحی شده [۲۶].

بلوگا[۳۵] و همکاران [۲۷] به بررسی منطق فازی در فرایند تولید شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای پرداختند. از آنجایی که هنوز به طور کامل صنایع مختلف از پذیرش استفاده از روش شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای استقبال نمی‌شود در پژوهش مورد نظر سعی شده با استفاده از ارائه یک روش تحت عنوان AHP[۳۶] بهره برده و استفاده از یک سیستم روابط فازی بعنوان خروجی روش شکل‌دهی نموی طراحی گردید و توانست از استقبال چندین صنعت پیشرو در زمینه شکل‌دهی گردد. شکل ۲۷ روند شکل‌گیری نمونه ساخته شده را نشان داده است.



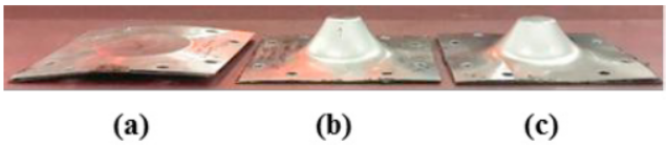
شکل ۲۷: شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای نامتقارن a) در ابتدای شکل‌دهی b) در پایان فرآیند [۲۷].

پاتل[۳۷] و همکاران [۲۸] به بررسی شبیه سازی و کنترل شکل‌دهی نموی با استفاده از دستگاه CNC پرداختند. کنترل ماشین ابزار CNC خود تاثیر بسزایی در کیفیت فرایند شکل‌دهی نموی خواهد گذاشت. از آنجایی که در فرآیند شکل‌دهی با عوامل مختلفی اعم از خمش، کشش عمیق و پرس روبرو هستیم لازم است که مدل کنترلی مناسبی جهت افزایش دقت هندسی ارائه گردد. شکل ۲۸ به بررسی شبیه‌سازی و کنترل شکل‌دهی نموی پرداخته است.



شکل ۲۸: شبیه‌سازی کشش عمیق [۲۸].

داورپناه و همکاران [۲۹] به بررسی فرم‌پذیری و خرابی در ورق ساندویچی چند لایه فلز–پلیمر در فرایند شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای بعنوان موضوع مورد بحث قرار گرفت که خرابی و تورق به ضخامت فلز و پلیمر وابسته بوده و تحقیق تجربی بیانگر این است که بالا بودن ضخامت پلیمر منجر به بالا رفتن فرم‌پذیری ورق می‌شود. در شکل ۲۹ روند شکل‌دهی ورق چند لایه با فلز–پلیمر نشان داده شده است.



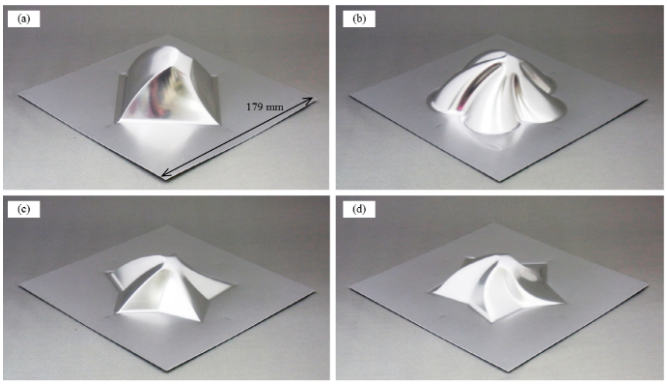
شکل ۲۹: روند شکل‌پذیری ورق ساندویچی چندلایه [۲۹].

ایکیهارا[۳۸] و همکاران [۳۰] به بررسی و توسعه شکل‌دهی نموی بر پایه الاستومتری پرداختند. جهت تولید محصولات منحنی شکل نیاز به توسعه شکل‌دهی نموی دو نقطه‌ای بر پایه الاستومتر[۳۹] است. در اثر آزمایش چندین تست بیانگر این است که جابه‌جایی مواد در اثر شکل‌دهی صرفا در راستای خط مستقیم شکل‌دهی نیست بلکه در مسیر منحنی شکل مورد نظر و دلخواه نیز می‌تواند این جابه‌جایی افزایش یابد. شکل ۳۰ نشان‌دهنده نمونه‌های تولید شده به روش شکل‌دهی نموی است.

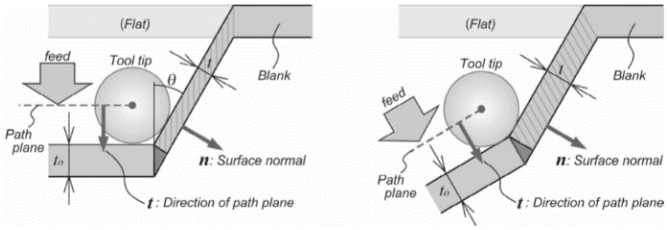
تاناکا[۴۰] [۳۱] به بررسی شکل‌دهی نموی فنجان مکعبی در یک فرایند چندمرحله‌ای پرداخت. شکل‌دهی نموی جهت فرمدهی یک فنجان مکعبی شکل با در نظر گرفتن یک فرایند چندمرحله‌ای مورد تست آزمایشگاهی قرار گرفت هدف از این تحقیق تجربی، کنترل انتقال مواد و اصلاح مسیر حرکتی ابزار شکل‌دهی در شیب تند دیواره فنجان مکعبی می‌باشد در حقیقت مسیر حرکتی ابزار بصورت صفحات غیر افقی بوده است و همچنین به این نتیجه رسیدن که قانون سینوسی در تخمین فرمدهی بعنوان قانونی به حساب می‌آید که ضخامت ورق عمودی را به صفر میل می‌دهد. همچنین در شکل ۳۱

[35]Bologa [36]analytic hierarchy process [37]Patel [38]Ichihara [39]elastomer-based [40]Tanaka

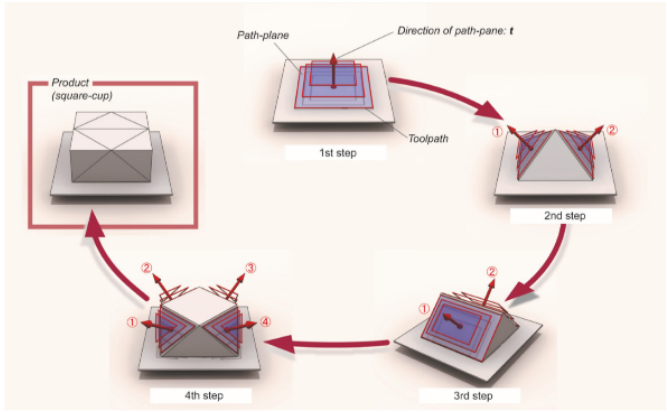
به بررسی قانون سینوس‌ها می‌پردازیم و در شکل ۳۲ نمونه شکل‌دهی‌شده چندمرحله‌ای به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۳۰: نمونه‌های تولیدشده به روش شکل‌دهی نموی [۳۰].



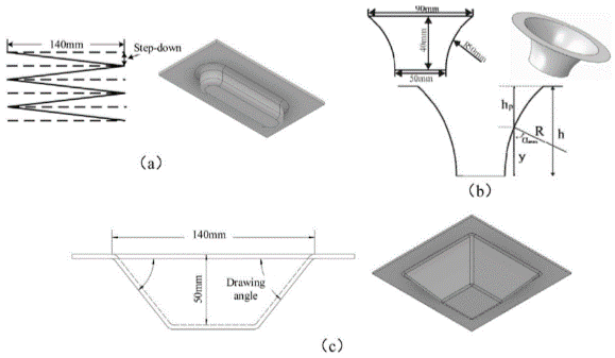
شکل ۳۱: قانون سینوس‌ها [۳۱].



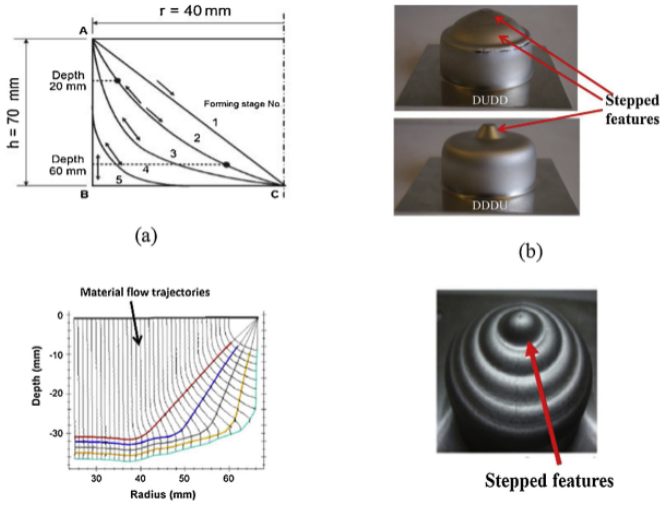
شکل ۳۲: شکل‌دهی نموی چندمرحله‌ای [۳۱].

لیو[41] و همکاران [۳۲] به بررسی شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای با رویه کامپوزیت آلومینیوم–مس پرداختند. بررسی مفهومی رفتار شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای بر روی ورق کامپوزیتی Cu–Al در ۲ حالت ترتیبی Cu/Al و Al–Cu انجام پذیرفت و نتایج نشان داد که فرم‌پذیری و افزایش نیروی شکل‌دهی در حالت Al/Cu نسبت به حالت Cu/Al بیشتر و بهتر بوده است و به شکل مورد نظر از لحاظ دقت هندسی و استحکام بیشتر خواهد بود. نمونه طراحی شده در شکل ۳۳ نشان داده شده است.

چنگ[42] و همکاران [۳۳] به بررسی پیش‌بینی حرکت جسم صلب در شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای چند مرحله‌ای پرداختند. همچنین جهت صحت‌سنجی مدل تجربی، مسیر ابزار بصورت مدل ریاضی ارائه شده است و مشخص کرده‌اند که پارامترهای دو بعدی از هندسه سه بعدی ورق شکل گرفته صحت مدل تجربی را ارائه نمودند. که در شکل ۳۴ روند شکل‌دهی به نمایش گذاشته شده است.

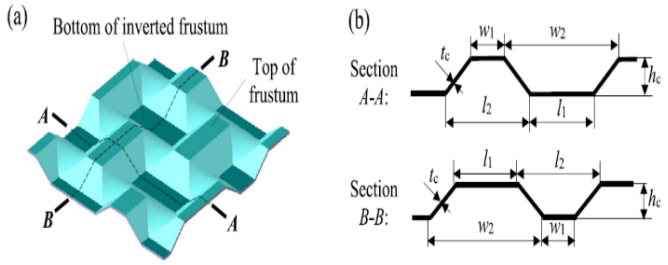


شکل ۳۳: طراحی مدل هندسی تک‌نقطه‌ای با رویه کامپوزیت [۳۲].



شکل ۳۴: استراتژی شکل‌دهی نموی چندمرحله‌ای [۳۳].

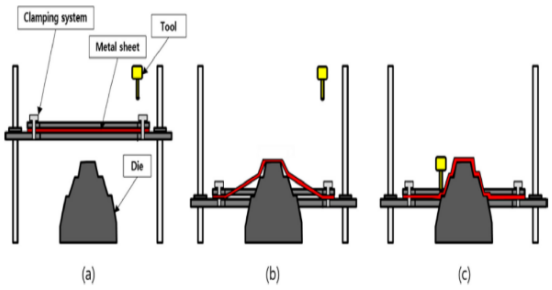
ژانگ[43] و همکاران [۳۴] به بررسی مدل تحلیلی عددی المان محدود و تجربی درشکل‌دهی فرایند چند نقطه‌ای یک ساندویچ پنل منحنی شکل پرداختند. که ساختار این پنل‌های ساندویچی در شکل ۳۵ آورده شده است. جهت بررسی رفتار خرابی ساندویچ پنل در فرایند فرم‌دهی بعنوان نمونه دیگر از تحقیقات صورت گرفته محسوب می‌شود هسته ساندویچ پنل از جعبه تخم مرغی شکل جهت غلبه بر چروکیده شدن رویه ورق و همچنین کم شدن تنش بحرانی استفاده شده است.



شکل ۳۵: ساختار و هندسه ساندویچ پنل [۳۴].

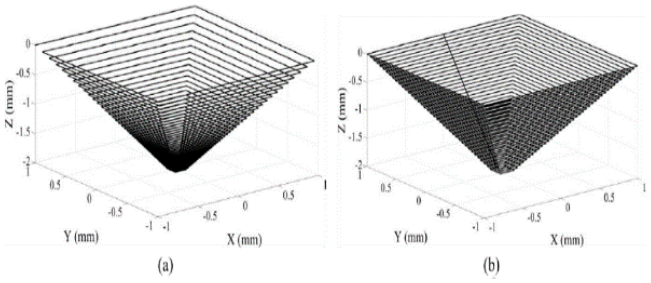
[41] Liu [42] Cheng [43] Zhang

چوی[44] و همکاران [۳۵] به بررسی مدل ریاضی جهت پیش‌بینی ضخامت و میزان فرم‌پذیری ورق شکل‌دهی شده پرداختند. بعنوان نمونه دیگر از تحقیقات نظری در حیطه شکل‌دهی نموی ورق محسوب می‌شود. که در شکل ۳۶ روند شکل‌دهی آن نشان داده شده است. همچنین دو تست تجربی جهت صحه‌گذاری مدل نظری بصورت ترکیبی از روش شکل‌دهی نموی و شکل‌دهی کشش صورت پذیرفت.



شکل ۳۶: طرح تشکیل هیبرید a) حالت اولیه b) کشش c) شکل‌دهی نموی [۳۵].

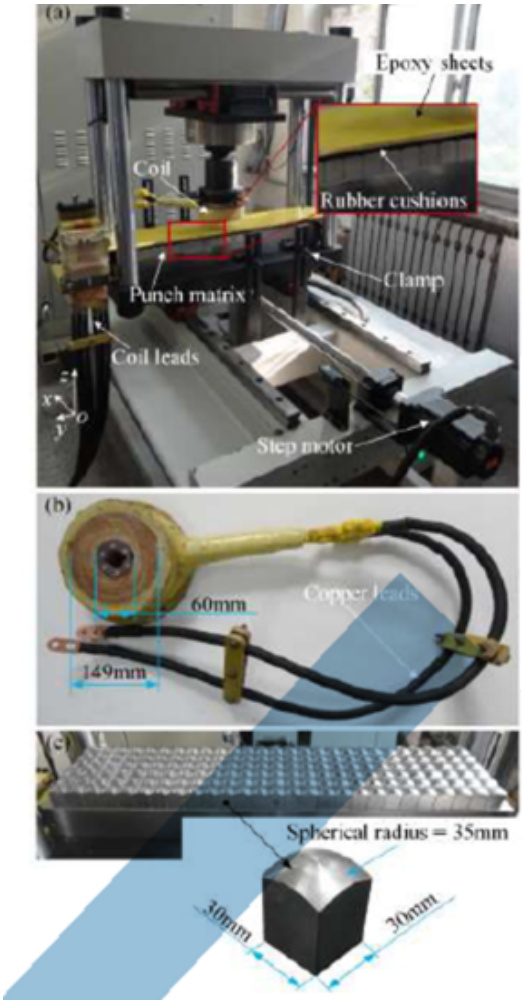
ریچارد[45] و همکاران [۳۶] به بررسی رفتار مواد در تست شکل‌دهی نموی پرداختند. شکل‌دهی نموی برای زمانی که میزان کرنش بسیار بالایی در فرایند شکل‌دهی بر روی ورق قطعه کار رخ می‌دهد از اهمیت بالایی برخوردار است در این تحقیق با استفاده از روش عددی المان و تست تجربی با اعمال نیروی محوری به بررسی مدل پلاستیک خراب‌شده مواد ترد پرداختند بنابراین ابتدا پارامتر اطمینان پذیری از انجام کار تخمین زده شد و سپس به محاسبه خرابی الاستو پلاستیک مواد ترد پرداختند. شکل ۳۷ استراتژی شکل‌دهی فرایند شکل‌دهی نموی را نشان داده است.



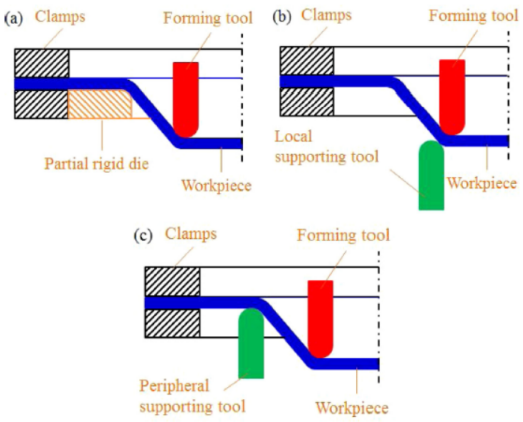
شکل ۳۷: استراتژی شکل‌دهی نموی ورق [۳۶].

لانگ[46] و همکاران [۳۷] به بررسی‌شکل‌دهی الکترومغناطیسی پرداختند شکل‌دهی الکترومغناطیس مناسب شکل‌دهی با سایز بالا و همچنین انحنای کوچک آلیاژ آلومنیوم است نیروی الکترومغناطیسی از طریق بالای پانچ ماتریس اعمال می‌گردد و نشان می‌دهد که تغییر شکل پلاستیک گنبدی شکل و یا کاسه‌ای شکل تولید شده است و محلی در کویل و پانچ ماتریس روس سطح ورق بصورت تغییر شکل نموی و یکنواخت توسط ماتریس روی سطح ورق بصورت تغییر شکل نموی و یکنواخت توسط ماتریس بوجود می‌آید که تجهیزات آزمایشگاهی آن در شکل ۳۸ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد شعاع کمتر تغییر شکل با تغییر شکل پلاستیک بالا و راستای خمش قطعه کار براساس تغییر شکل محلی با شعاع خمش کمتری ایجاد می‌شود.

مین[47] و همکاران [۳۸] به بررسی عددی و تجربی شکل‌دهی نموی به همراه فوم فلزی بعنوان یک بستر منعطف پرداختند این بستر تاثیر بسزایی در دقت هندسی و شکل‌دهی پلاستیک قطعه کار دارد و باعث می‌شود ماشین ابزار به راحتی عملیات ماشین‌کاری را انجام دهد که شکل ۳۹ روند شکل‌پذیری شکل‌دهی نموی دو نقطه‌ای را نشان می‌دهد. در پایان جهت صحت سنجی مدل تجربی با استفاده از تئوری المان محدود شبیه‌سازی عددی مدل مورد بررسی صورت گرفت.



شکل ۳۸: تجهیزات آزمایشگاهی شکل‌دهی نموی مغناطیسی [۳۷].



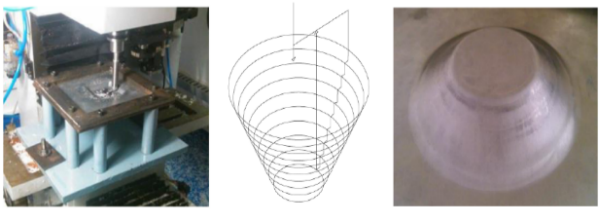
شکل ۳۹: روند شکل‌گیری، شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای [۳۸].

[44] Choi [45] Richard [46] Long [47] Min

قربانی و همکاران [۳۹] به بررسی بهینه سازی چند هدفه شکل‌دهی نموی ۲ نقطه‌ای پرداختند هدف از بهینه سازی یافتن پارامترهای بهینه‌ای همچون نیروی اعمالی زاویه دیواره، قطر ابزار، ضخامت ورق و گام پیشروی ابزار در نظر گرفته شد و سپس تحقیقی نظری بصورت عملی هم مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۴۰ روند شکل‌پذیری ورق مورد تست را نشان می‌دهد.

شکل ۴۰: تست تجربی شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای [۳۹].

ماجندیران[۴۸] و همکاران [۴۰] به بررسی به بررسی تحلیل سوراخکاری با استفاده از روش شکل‌دهی بر روی ورق آلیاژی AA.5052 پرداختند. در این تحقیق با متمرکز شدن بر روی پارامترهای مربوط به کیفیت سطح و ضخامت دیواره بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت پارامترهای کیفیت سطح و ضخامت به متغیرهایی نظیر سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی ابزار و گام پیشروی مربوط است. شکل ۴۱ تجهیزات آزمایشگاهی و همچنین نمونه تست شده را نشان می‌دهد.

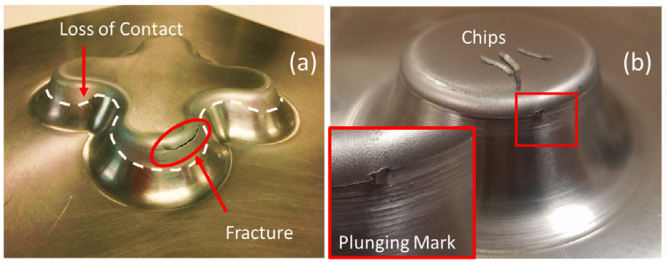


شکل ۴۱: تجهیزات مورد آزمایش در تست تجربی [۴۰].

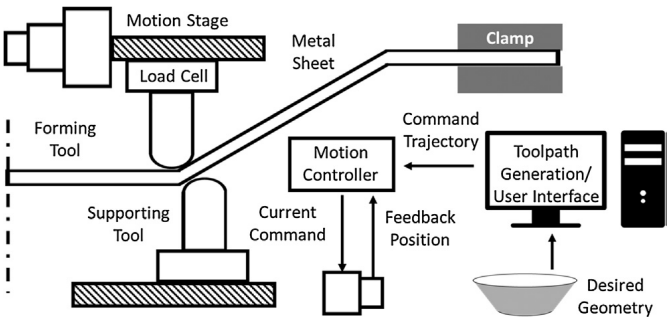
بن[۴۹] و همکاران [۴۱] به بررسی عملکرد شکل‌دهی نموی با سرعت بالا برای ورق‌های همچون AA5754 H22 و DC04 Steel پرداختند. پارامترهای فرم‌دهی شامل گام پیشروی، زاویه دیواره و نرخ پیشروی از طریق بررسی و سنجش سختی، ضخامت توزیع یافته و زبری سطح مورد ارزیابی قرار گرفت روشه ارائه شده ۸۴٪ و۷۴٪ اوقات برای مواردی چون AA5764 H22 و DC04 Steel قابل اجرا می‌باشد. شکل ۴۲ قسمت‌هایی از فرایند شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

موسر[۵۰] و همکاران [۴۲] به بررسی کنتری نیروی تماسی در روش شکل‌دهی نموی دو طرفه بعنوان یک ایده جدید پرداختند ایده ارائه‌شده باعث پایدارسازی تنش فشاری در راستای ضخامت ورق می‌باشد بنابراین فرم پذیری ورق و عمر خستگی ورق شکل‌دهی شده افزایش می‌یابد و باعث یکنواخت شدن تماس ابزار–ورق می‌شود. شکل ۴۳ نمونه تجربی بدست آمده از شکل‌دهی نموی دو نقطه‌ای می‌باشد که نواحی پارگی در آن به وضوح مشخص شده است و شکل ۴۴ روند شکل‌دهی نموی دو نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

شکل ۴۲: قسمت‌هایی از فرایند شکل‌دهی تک‌نقطه‌ای [۴۱].



شکل ۴۳: نواحی پارگی مشخص‌شده بعد از فرم‌دهی [۴۲].



شکل ۴۴: دیاگرام فرایند DSIF [۴۲].

۴ نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق به طور کلی، پرداختن به موضوعاتی همچون، ماهیّت فرآیند شکل‌دهی نموی ورق و چکیده‌ای از تحقیقات محققان پیشین بوده است. باتوجه به بررسی و مطالعه تحقیقاتی که در این حوزه در دهه‌های اخیر صورت پذیرفته، می‌توان به جرأت گفت یکی از مناسب‌ترین، پویاترین و کم

[48] Mugendiran [49] Ben [50] Moser

هزینه‌ترین روش‌های کاربردی در ساخت نمونه‌های اولیه، روش شکل‌دهی نموی نقطه‌ای است. با مطالعه مقالات مختلف مشاهده گردید که حوزه کاربردی این فرآیند بسیار وسیع و متنوع است، به طوری که نمونه کارهای انجام شده در زمینه خودرویی، پزشکی و لوازم خانگی مهر تأییدی بر این گفته می‌باشد. اما این فرآیند شکل‌دهی نیز، مانند هر فرآیند شکل‌دهی دیگر مشمول محدودیت‌ها، قابلیت‌ها و همچنین پارامترهای تأثیرگذار روی کیفیت و ارتقای دامنه کاربردی فرآیند و بهبود بازدهی دارد، که با آشنایی و بررسی هر یک از این پارامترها می‌توان در راه رسیدن به نمونه‌های مطلوب پیشرفت بیشتری حاصل نمود همان طور که از تحقیقات و آزمایش‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت، محققان مختلف در سراسر دنیا توسط خلاقیت و ترکیب تکنولوژی‌های دیگر با شکل‌دهی نموی نقطه‌ای، قادر بوده‌اند دامنه کارایی فرم‌دهی نموی نقطه‌ای را ارتقا بخشند و به‌نوعی از محدودیت‌های این فرآیند بکاهند، به‌عنوان مثال، با کمک تکنولوژی لیزر یا جریان‌الکتریکی، شکل‌دهی ورق را تسهیل بخشیده‌اند و حتی این شیوه باعث شده فشار و نیروی عمودی کمتری ابزار متحمل گردد در شکل‌دهی نموی نقطه‌ای، پدیده جالب توجه و بسیار مهم که می‌توان به آن اشاره داشت، تغییرات چشم‌گیر در زمینه حد شکل‌پذیری مواد فلزی می‌باشد، به همین دلیل در مقالات منتشر شده زیادی به این موضوع پرداخته شده است، به طوری که شکل و حالت منحنی حدشکل‌دهی به طور کل نسبت به منحنی مذکور در شکل‌دهی‌های متداول تغییر و ارتقا یافته است.برای درک بهتر این تغییرات، محققین در مقالات بیشماری به تحلیل‌های تئوری و روابط تنش-کرنش حاکم بر فرآیند شکل‌دهی نموی نقطه‌ای پرداخته‌اند.

مراجع

[1] Kitazawa, K and Nakane, M. Hemi-ellipsoidal stretch-expanding of aluminum sheet by cnc incremental forming process with two path method. *JOURNAL-JAPAN INSTITUTE OF LIGHT METALS*, 47:440–445, 1997.

[2] Jeswiet, J and Hagan, E. Rapid prototyping of a headlight with sheet metal. *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum(Canada),*, pp. 109–114, 2001.

[3] Skjødt, Martin, Bay, Niels, Endelt, Benny, and Ingarao, G. Multi stage strategies for single point incremental forming of a cup. *International Journal of Material Forming*, 1(1):1199–1202, 2008.

[4] Jackson, Kathryn and Allwood, Julian. The mechanics of incremental sheet forming. *Journal of materials processing technology*, 209(3):1158–1174, 2009.

[5] Matsubara, Shigeo. Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool-a study of a numerical control forming system ii. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 35(406):1311–1316, 1994.

[6] Jeswiet, J, Micari, F, Hirt, G, Bramley, A, Duflou, Joost, and Allwood, J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP annals*, 54(2):88–114, 2005.

[7] Katajarinne, Tuomas et al. On the behaviour of the process and material in incremental sheet forming. 2014.

[8] Tisza, M. General overview of sheet incremental forming. *Journal of achievements in materials and Manufacturing Engineering*, 55(1):113–120, 2012.

[9] Honda, M. Develops advanced technology to revolutionize prototyping. *Personalization, Low-Volume Production*, 35:874–892, 2015.

[10] Skjødt, Martin. *Rapid Prototyping by Single Point Incremental Forming of Sheet Metal*. Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, 2008.

[11] Duflou, J. Productionprocesses-cranialplate, 2006. http://www.mech.kuleuven.be/pp/research/SPIF_cranial.en.html.

[12] Tanaka, S. Incremental sheet metal forming process for pure titanium denture plate. *Advanced Technology of Plasticity*, 2005.

[13] Lino, J, Araújo, R, and Teixeira, P. Single point incremental forming of a medical implant. *North- Holland*, 31:25–36, 2011.

[14] Jeswiet, J, Micari, F, Hirt, G, Bramley, A, Duflou, Joost, and Allwood, J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP annals*, 54(2):88–114, 2005.

[15] Shankar, R. Incremental sheet metal forming of preformed sheets. *Proc. 8th ICTP, 2005*, 2005.

[16] Henrard, Christophe. *Numerical simulations of the single point incremental forming process*. Ph.D. thesis, 2009.

[17] Jadhav, Sanjay. *Basic investigations of the incremental sheet metal forming process on a CNC milling machine*. Shaker, 2004.

[18] Fan, Guoqiang, Sun, Fengtao, Meng, Xiangguo, Gao, Lin, and Tong, Guoquan. Electric hot incremental forming of ti-6al-4v titanium sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12):941–947, 2010.

[19] Mahmoudi, M. Study of improvement in isf process by ultrasonic vibration. Master's thesis, Arak University, 2013.

[20] Iseki, Hideo. Flexible and incremental bulging of sheet metal using high-speed water jet. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 44(2):486–493, 2001.

[21] Shi, Yi, Zhang, Weizhao, Cao, Jian, and Ehmann, Kornel F. Experimental study of water jet incremental microforming with supporting dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 268:117–131, 2019.

[22] Shrivastava, Parnika and Tandon, Puneet. Microstructure and texture based analysis of forming behavior and deformation mechanism of aa1050 sheet during single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 266:292–310, 2019.

[23] Su, Hongliang, Huang, Liang, Li, Jianjun, Ma, Fei, Huang, Pan, and Feng, Fei. Two-step electromagnetic forming: A new forming approach to local features of large-size sheet metal parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 124:99–116, 2018.

[24] Suresh, Kurra, Regalla, Srinivasa Prakash, and Kotkundae, Nitin. Finite element simulations of multi stage incremental forming process. *Materials Today: Proceedings*, 5(2):3802–3810, 2018.

[25] Yoganjaneyulu, G, Narayanan, C Sathiya, and Narayanasamy, R. Investigation on the fracture behavior of titanium grade 2 sheets by using the single point incremental forming process. *Journal of Manufacturing Processes*, 35:197–204, 2018.

[26] Zahedi, Ali, Dariani, Bijan Mollaei, and Mirnia, Mohammad Javad. Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated al/cu sheets using a damage plasticity model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 153:341–358, 2019.

[27] Bologaa, O, Breaz, R, and Racz, S. Evaluate the possibility of introducing single point incremental evaluate the possibility of introducing single point incremental forming on industrial scale. *The International Academy of Information Technology and Quantitative Management*, 139(8):408–416, 2018.

[28] Patel, Ketul, Kalaichelvi, V, Karthikeyan, R, and Bhattathiri, Sriparvathi. Modelling, simulation and control of incremental sheet metal forming process using cnc machine tool. *Procedia Manufacturing*, 26:95–106, 2018.

[29] Davarpanah, Mohammad Ali and Malhotra, Rajiv. Formability and failure modes in single point incremental forming of metal-polymer laminates. *Procedia Manufacturing*, 26:343–348, 2018.

[30] Ichihara, Hiroki and Sekiguchi, Akio. Development of elastomer-based incremental sheet forming method for curved products. *Procedia Manufacturing*, 15:1184–1191, 2018.

[31] Tanaka, Shigekazu. Incremental sheet metal formed square-cup obtained through multi-stepped process. *Procedia Manufacturing*, 15:1170–1176, 2018.

[32] Liu, Zhaobing and Li, Guohao. Single point incremental forming of cu-al composite sheets: A comprehensive study on deformation behaviors. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(2):484–502, 2019.

[33] Ndip-Agbor, Ebot, Cheng, Puikei, Moser, Newell, Ehmann, Kornel, and Cao, Jian. Prediction of rigid body motion in multi-pass single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 269:117–127, 2019.

[34] Cai, Zhong-Yi, Zhang, Xi, and Liang, Xiao-Bo. Multi-point forming of sandwich panels with egg-box-like cores and failure behaviors in forming process: Analytical models, numerical and experimental investigations. *Materials & Design*, 160:1029–1041, 2018.

[35] Choi, Hyunwoo and Lee, Cheolsoo. A mathematical model to predict thickness distribution and formability of incremental forming combined with stretch forming. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55:164–172, 2019.

[36] Hapsari, G, Richard, F, Hmida, R Ben, Malécot, P, and Thibaud, S. Instrumented incremental sheet testing for material behavior extraction under very large strain: Information richness of continuous force measurement. *Materials & Design*, 140:317–331, 2018.

[37] Long, Anlin, Wan, Min, Wang, Wenping, Wu, Xiangdong, Cui, Xuexi, and Ma, Bolin. Forming methodology and mechanism of a novel sheet metal forming technology-electromagnetic superposed forming (emsf). *International Journal of Solids and Structures*, 151:165–180, 2018.

[38] Min, Junying, Kuhlenkötter, Bernd, Shu, Changle, Störkle, Denis, and Thyssen, Lars. Experimental and numerical investigation on incremental sheet forming with flexible die-support from metallic foam. *Journal of Manufacturing Processes*, 31:605–612, 2018.

[39] Mostafanezhad, Hani, Menghari, Hossein Ghorbani, Esmaeili, Samad, and Shirkharkolaee, Ehsan Marzban. Optimization of two-point incremental forming process of aa1050 through response surface methodology. *Measurement*, 127:21–28, 2018.

[40] Mugendiran, Venu and Gnanavelbabu, A. Analysis of hole flanging on aa5052 alloy by single point incremental forming process. *Materials Today: Proceedings*, 5(2):8596–8603, 2018.

[41] Mulay, Amrut, Ben, B Satish, Ismail, Syed, Kocanda, Andrzej, and Jasiński, Cezary. Performance evaluation of high-speed incremental sheet forming technology for aa5754 h22 aluminum and dc04 steel sheets. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4):1275–1287, 2018.

[42] Ren, Huaqing, Li, Fuhua, Moser, Newell, Leem, Dohyun, Li, Tiemin, Ehmann, Kornel, and Cao, Jian. General contact force control algorithm in double-sided incremental forming. *CIRP Annals*, 67(1):381–384, 2018.