مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات، بهار۱۳۹۸، دوره ۱۰، شماره ۱، ص‌ص ۳۲-۴۵

فصلنامه

مهندسی مکانیک و ارتعاشات

jvibme.semnaniau.ac.ir

مروری بر پارامترهای تاثیرگذار در شکل دهی نموی از ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۹

مجتبی حسنلو[۱*]، 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، قزوین، ایران

* رشت ، ایران، hasanlumojtaba@gmail.com

اطلاعات مقاله

مقاله مروری

دریافت: ۴ دی ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۸ بهمن ۱۳۹۷

ارائه در سایت: ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۸

کلیدواژگان

پارامترهای تاثیرگذار در شکل دهی

فرم دهی ورق فلزی

شکل دهی نموی تک نقطه ای و چند نقطه ای

چکیده

شکل دهی ورق‌های فلزی به عنوان یکی از مهم ترین شاخه‌های شکل دهی فلزات، از جایگاه ویژه‌ای در زمینه‌های مختلف صنعتی برخوردار می‌باشد. در این فرآیندها با استفاده از مجموعه‌ای از قالب های یکپارچه صلب، تغییر شکل پلاستیک مطلوب در یک ماده خام اولیه ایجاد می‌شود. این قبیل قالب ها عموما ً برای یک قطعه با مشخصات هندسی خاص طراحی و ساخته می‌شوند، به‌طوریکه برای تولید قطعات با شکل‌های هندسی مختلف نیاز به استفاده از قالب های متفاوتی وجود خواهد داشت. طراحی و ساخت قالب های جدید مستلزم صرف زمان و هزینه بالایی می‌باشد. در نتیجه، استفاده از روش‌های فوق برای تولید قطعات تکی و قطعات دسته‌ای با تیراژ پایین غیراقتصادی خواهد بود. به منظورکاهش زمان انتظار و هزینه‌های طراحی و ساخت، توسعه روش‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب در جهت رفع محدودیت‌های فوق مطرح شود. در بین روش‌های نوین فرم‌دهی قطعات پوسته‌ای شکل، فرآیند شکل‌دهی نموی ورق در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته استلز دلایل این اهمی ّت، می‌توان به انعطاف پذیری و قابلیت کنترل عددی فرآیند و همچنین بی نیاز بودن این روش به تجهیزات گران قیمت مانند تجهیزات پرس و ساخت قالب اشاره نمود. در این روش شکل‌دهی، یک ابزار سرکروی ساده با ورقی که توسط فیکسچری مهار شده، در تماس نقطه‌ای است و ابزار توسط کله‌گی ماشین CNC، حرکتی مشخص در مسیر و جهت از قبل تعیین شده انجام می‌دهد و باعث بوجود آمدن تغییر شکل پلاستیک تدریجی و نموی با نیروی نسبتا کم در ناحیه زیر ابزار، روی ورق می‌گردد.

Review of the Parameters Influence of Incremental Forming Between 1960 and 2019

Mojtaba hasanlu[1*], Sina mokary[2]

1- 1-Master of Mechanical Engineering, Applied Design, University of Guilan, Rasht, Iran
2- Master of Mechanical Engineering, Applied Design, Islamic Azad University ,Takestan Branch, Takestan, Qazvin, Iran
*Rasht, Iran_hasanlumojtaba@gmail.com

Article Information
Review Paper
Received 25 December 2019
Accepted 17 February 2019
Available Online 15 May 2019
Keywords
Parameters Influence of Forming
Sheet Metal Forming

ABSTRACT
Sheet metal forming (SMF) is the most important metal forming areas which is used in various industries. SMF is formed by integrated rigid molds, due to happen desired plastic deformation in raw material. Those molds which are drawn and fabricated for one component has specific geometry characteristics. But for production of various shapes, we need to use different molds.so, It is not suitable and economical method for manufacturing decreasing costs such as waiting time, design, developing and production, there is flexible method which is named incremental

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mojtaba hasanlu, Sina mokary, Review of the Parameters Influence of Incremental Forming Between 1960 and 2019, Journal of Mechanical Engineering and Vibration, Vol. 10, No. 1, pp. 32-45, 2019 (In Persian)

Single Point and Multi-Points Incremental Forming

forming (IF). IF can cover many restrictions and problems. In last decades, IF is noticed by many engineers and researchers because IF is modern method in SMF. IF has some features as flexibility, numerical controllability and who does not need press equipment and mold during forming process. IF needs simple prop which is fixed by fixture which is lined by collet in CNC machine and also prop is contact on sheet metal. Prop moves in deterministic desired path and finally there is incrementally formed formable shape by low amplitude force under prop. In this paper, we report on parameters influences of incremental forming between 1960 and 2019.

۱- مقدمه

شکل‌دهی نموی چند مرحله‌ی ایده جدیدی به حساب نمی‌آید زیرا در سال ۱۹۹۷ در ژاپن توسط کیتازاوا[1] و همکاران،مقاله‌ای به چاپ رسید[1] 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[2] و همکاران در سال ۲۰۰۲ طی مقاله‌ای[2] 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 تک مرحله‌ای است، بعنوان مثال، همان طور که پیش ازاین 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 است، این محدودیت تا حد چشم-گیری برطرف گردیده، در ادامه با بیان مقاله‌ای که در این زمینه منتشر شده درکی بهتر از این موضوع می‌توان پیدا نمود.اسکجوئیت و بای[3] در سال ۲۰۰۸ در مقاله‌ای[3]، شکل‌دهی نموی را با توجه به مسیر حرکت ابزار در پنج مرحله انجام دادند، طی این تحقیق، قطعه استوانه‌ای شکل با نسبت ارتفاع به شعاع یک(height/radius=1) از ورقی تخت، فرم داده شد که نکته حایزاهمیت در این بررسی، رسانیدن زاویه دیواره نزدیک به ۹۰درجه 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.

شکل۱: شکل‌دهی چند مرحله ی،تأثیر تفاوت در مسیر حرکت ابزار[3]

فرآیند فرم‌دهی نموی ورق‌های فلزی، در سال‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۶۷ میلادی به ترتیب توسط آقایان راکس و لیزاک[4] 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 از نظر سخت‌افزاری و نرم‌افزاری و همچنین پایین‌تر آمدن قیمت اینگونه تجهیزات، این فرآیند بیشتر از قبل مورد توجه قرار گرفت، چون دیگر این امکان فرآهم آمده بود که با ترکیب نرم‌افزارهای توانمند CAD/CAM، قطعات نامتقارن ورقی شکل را در مدت زمانی به نسبت کوتاه، بدون سرمایه گذاری هنگفت تولید نمود[۶]. شکل‌دهی نموی ورق، از نظر تکنولوژی اساسا، تکیه دارد به دو اصل، یکی اتوماسیون و دیگری سیستم کنترل عددی، به‌گونه‌ای که قطعه مورد نظر توسط نرم‌افزارهای CAD

[1] Kitazawa
[2] Jeswiet
[3] Skjoedt, Bay
[4] Raux, Leszak

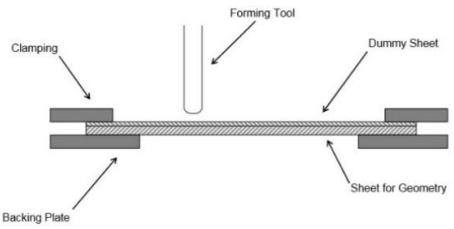
مدل و طراحی می‌شود، که این مدل به‌عنوان مبنایی برای ایجاد مسیر شکل‌دهی توسط نرم‌افزار CAM به‌کارگرفته می‌شود، سپس می‌بایست این مسیرهای شکل‌دهی از طریق پردازنده، تبدیل به کدهایی قابل شناسایی برای دستگاهCNC شوند، تا بتوان قطعه با فرمی مطلوب را از یک ورق فلزی تخت که توسط فیکسچر مهار شده، تولید نمود.

۲- بررسی مسیر حرکت ابزار در فرآیند شکل‌دهی نموی

اسکوجئت و هانکوک[1] در سال ۲۰۰۷ در مقاله‌ای[۷] به بررسی و ایجاد راهکاری برای مشکل اثر ابزار روی قطعه کار در حرکت تغییر گام عمودی پرداختند، زیرا این اثر هم بر کیفیت ظاهری قطعه کار تاثیر نامطلوب می‌گذاشت و هم نیروی محوری بر قطعه کار و ابزار وارد می‌نمود؛ نتیجه تحقیقات باعث گردید، برنامه عددی نوشته و ایجاد گردد که حرکت مسیر بسته ابزار را به مسیری مارپیچ(حلزونی) شکل تبدیل کند و ابزار در کل مسیر حرکت فرآیند در سه جهت (x,y,z) دارای تغییرات مختصاتی باشد. این برنامه حرکتی را (He To Pac) نام گذاری کردند و دیگر باعث شد اثرات نامطلوب ابزار روی سطح کار مشاهده نشود، این برنامه چنان مورد توجه قرار گرفت که به چندین حوزه‌ی تحقیقاتی صادر گردید.

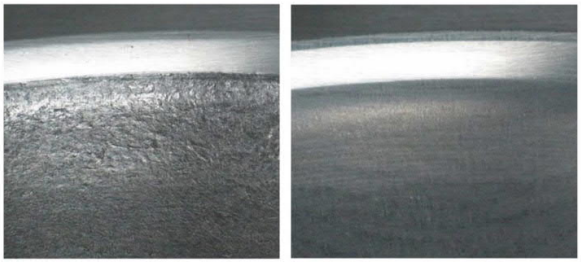
۲-۱ استفاده از Dummy Sheet در فرآیند شکل‌دهی نموی

سیلوا و مارتینز[2] و همکارانش در سال ۲۰۰۷ در مقاله‌ای[۸] به بررسی، استفاده از ورقی محافظ و واسط بین ابزار و ورق اصلی که می‌خواهد تغییر شکل پیدا کند پرداختند، فرآیند به این صورت بود که، ورق محافظ که کلیه تماس حرکت دورانی و خطی ابزار با آن صورت پذیرفته است پس از انجام فرآیند کنار گذاشته می‌شود و قطعه مورد نظر که ورق زیرین است فاقد هرگونه خط و خش و همچنین ساییدگی ابزار می‌باشد. شکل ۲ فرایند شکل‌دهی نموی همراه با ورق محافظ را به نمایش گذاشته است.



شکل۲: استفاده از Dummy sheet در شکل دهی نموی[۸]

دیگر تحقیقاتی که دراین حوزه انجام شده به بررسی اثر ورق محافظ برروی قابلیت فرم‌پذیری،سایش، کیفیت سطح و برآمدگی سطحی بوده است، که آزمایشات بر روی ساخت ورق‌های به شکل مخروط یا هرم صورت پذیرفته است. از نتایج تحقیقات مشخص گردید که استفاده از Dummy Sheet سایش قطعه کار را تا حد صفر کاهش می‌دهد، اما باعث افت قابلیت فرم‌پذیری نیز می‌گردد، در مجموع بیشترین تاثیر را روی کیفیت سطح قطعه دارد و با استفاده از روانکار بین دو ورق(کاهش اصطکاک) میتوان این کیفیت را افزایش داد، که شکل ۳ نمونه‌ای ازاین موضوع می‌باشد.



شکل۳: عکس سمت چپ ایجاد پدیده ساییدگی در ورق، عکس سمت راست ورق همرا با ورق محافظ[۸]

۲-۲ بررسی تئوری و پیش‌بینی قابلیت فرم‌پذیری در فرآیند(ISF)

سیلوا و اسکجوئیت۳ و همکاران در مقالاتی، که در سال ۲۰۰۸ [۹،۱۰،۱۱] چاپ گردید، به بررسی تئوریک در خصوص پیش‌بینی و قابلیت فرم‌پذیری ورق فلزی در شکل‌دهی نموی

[1] Skjoedt, Hancok
[2] Silva, Martins
[3] Silva, M. B., Skjoedt

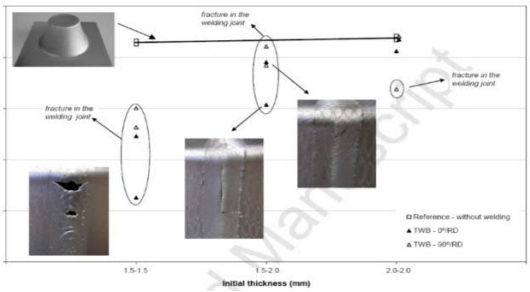
پرداختند، همان طور که پیش ازاین به آن ا شاره شد، اما به طور کل در این حوزه عموما" تحقیقات به بررســی عواملی همچون موارد زیر پرداخته می‌شود:

- مباحث تئوریک و آزمایشگاهی در خصوص نشان دادن تاثیر ضــخامت اولیه ورق و شــعاع ابزار بر روی قابلیت فرم‌پذیری.
- مقالاتی در خصــوص ارایه معادلاتی جهت محاســبه‌ی تنش‌های اصلی در شکل‌دهی نموی ورق.
- در برخی از تحیقیقات به موضــوع، بیشــترین حد فرم‌پذیری در فرآیند شــکل‌دهی نموی پرداخته شــده ا ست، پیدا کردن دلایلی به منظور توجیه حالت از بین رفتن ناحیه گلویی و نرخ پایین رشد شکست،از اهداف این چنین تحقیقات می‌باشد.
- یکسری از بررسی‌ها در خصوص توضیح دادن به نوع حالت منحنی حد کرنش، که خطی مســتقیم با شــیب منفی است می‌پردازد.
- موضــوع برخی آزمایشــات و بررســی‌ها به محاســبه‌ی اندازه شیب خط(FFL) در فضای نموداری کرنش‌های اصلی می‌پردازد.
- مقالاتی در خصــوص توضــیح دلیل تمایل تغییر شــکل الاستیک در دیواره نواحی مجاور ابزار فرم دهنده.
- همچنین آزمایشــات تجربی زیادی درخصــوص نشــان دادن عدم وجود پدیده گلویی شــدن در شــکل‌دهی نموی ارائه شده است.

۳-۲ بررسی شکل‌دهی نموی ورق‌های به هم جوش خورده

یکی از موضوعات تحقیقاتی که بیشتر جنبه آزمایشگاهی و تجربی دارد، شــکل‌دهی نموی ورق‌های که به یکدیگر جوش داده شده‌اند، می‌باشد.

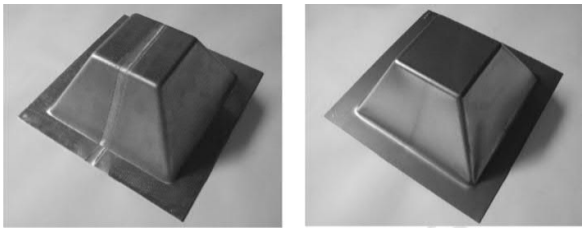
سیلوا ، مارتینز و ویلسا[1] و همکاران در تحقیقات خود[۱۲] در سال ۲۰۰۸، به شکل‌دهی نموی ورق دوتکه از جنس(AA1050-H111) که توسط روش جوشکاری اصطکاکی‌اغتشاش به یکدیگر متصل شده بودند، پرداختند؛ دراین تحقیق از Dummy Sheet نیز استفاده گردید تا به نوعی محافظت شده باشد از ناحیه نرم خط جوشکاری در مقابل ابزار فرم در حال چرخ؛ نمونه‌های مورد بررسی به شکل‌های مخروطی و هرم‌شکل تولید گردید و در نهایت با نمونه‌هایی که توسط روش‌های متداول فرم‌داده شده بودند مقایسه شد،توسط شکل ۴ می‌توان درک بهتری از نتایج آزمایش حاصل نمود.



شکل۴: بررسی زاویه کشش، برای ورق ها جوشکاری شده[۱۲]

نتایج آزمایشات، امید بخش بودن و ترکیب فرآیند شکل‌دهی نموی ورق و جوشکاری اصطکاکی‌اغتشاشی را به ارمغان آورد تا ساخت قطعات پیچیده‌تر ورقی در حالت کشش عمیق تا با زاویه ۶۰ درجه امکان پذیر باشد.که در شکل ۵ نمونه کار انجام شده به تصویر کشیده شده است.

[1] Silva, Martins, Vilsa



شکل ۵: سمت چپ هرمی با زاویه ۶۰ درجه که از ورق جوش خورده تولید شده، سمت راست Dummy شیت آهنی بکار رفته در طول فرآیند شکل دهی[۱۲]

۳-کاربرد فن آوری شکل دهی نموی

با توجه به ویژگی‌هایی که در خصوص فن‌آوری شکل‌دهی نموی ذکر گردید، کاملا" 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.

۳-۱ 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 حجمه 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 مخصوصا" در مراحل تحقیق و توسعه[1][۱۳]. برای درک بهتری از کاربردهای این روش، در زیر چند عکس از کارهای انجام شده در این حوزه‌آورده شده‌است. شکل ۶ نمونه از کاسه چراغ اتومبیل نشان داده شده است.

شکل۶: کاسه چراغ جلوی اتومبیل[۱۳].

شکل۷ و ۸ نمونه‌ای از درب موتور خودروی هوندا S800 است که با کمک روش شکل‌دهی نموی ساخته شده است[۱۴].

شکل۷: نمونه درب موتور خودروی هوندا S800 [۱۴].

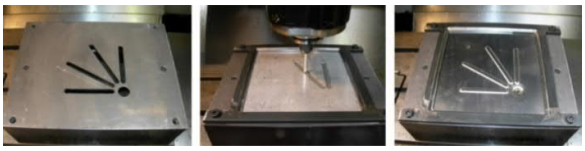
شکل۸: ساخت نمونه دماغه قطار توسط فرآیند(ISF) [۱۴].

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

[1] Research & Development

یا عدم استقبال از طرح آگاهی یابند. در شکل ۹ و ۱۰ نمونه‌ای از این گونه تجهیزات آمده است.



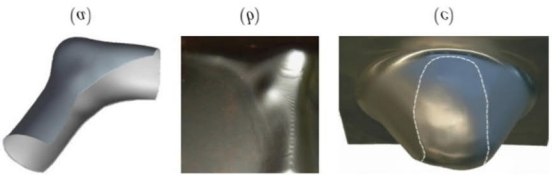
شکل۹: مراحل ساخت نمونه‌ای از سینک اشپزخونه [۱۵].

شکل۱۰: نمونه تکمیل شده[۱۵].

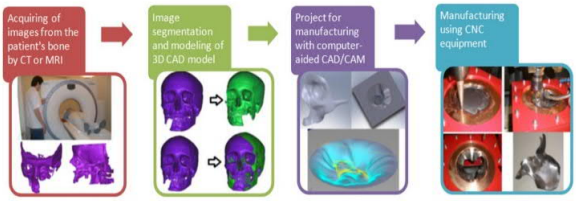
۳-۳ کاربرد در صنایع تجهیزات پزشکی

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 تصاویر۱۱، ۱۲ و ۱۳، مهر تأییدی بر این گفته می‌باشد.

شکل۱۱: ساخت پوسته فلزی جمجمه[۱۶]. بخشی‌از دندان مصنوعی [۱۷].



شکل۱۲: مدل‌کردن و سخت نمونه قوزک پای مصنوعی[۱۸].



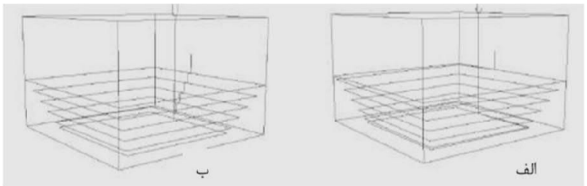
شکل۱۳: سیکل آماده‌سازی عضو مصنوعی قبل از عمل جراحی[۱۸].

۴- پارامترهای تاثیرگذار روی کیفیت فرآیند

با فرض اینکه ورق مورد بحث از نظر خواص مکانیکی و متالوژی، مناسب فرآیند (ISF) باشد، روش شکل‌دهی نموی از نظر کیفیت قطعه تولیدی، متأثر از چندین مشخصه اصلی می‌باشد، که از این بین، می‌توان به پارامترهای زیر با ذکر چند مورد تحقیقاتی و آزمایشگاهی اشاره نمود.

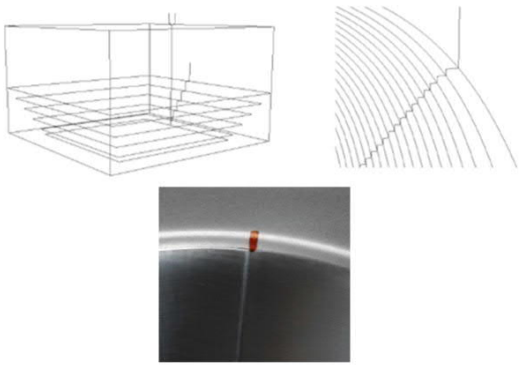
۴-۱ تاثیر استراتژی و مسیر حرکت ابزار

از عوامل مهم و تأثیرگذار روی کیفیت و نیروهای وارده به ابزار و قطعه‌کار، انتخاب مسیر حرکت ابزار می‌باشد؛ حتی این پارامتر، روی میزان برگشت فنری ورق و دقت هندسی قطعه نهایی، اثر بسزایی دارد؛ همچنین در مواردی، باعث کاهش زمان فرآیند شکل‌دهی نیز می‌گردد. در سال ۲۰۰۷، اسکاجوئت و همکاران[۱۹]. به طور تجربی به مقایسه دو حرکت ابزار، مارپیچ و پله‌ای پرداختند. در شکل ۱۴ شمایی از این دو نوع مسیر حرکت آمده است.

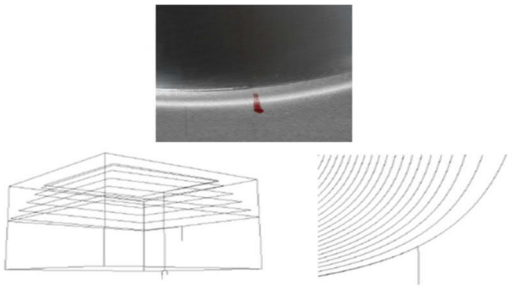


شکل۱۴: (الف)مسیر حرکت مارپیچ. (ب)مسیر حرکت پله‌ای [۱۹].

طی این آزمایش مشخص گردید، مسیر حرکتی مارپیچ، از لحاظ کیفی سطح بهتری نسبت به روش پله‌ای به وجود می‌آورد؛ زیرا به خصوص در قسمتی که ابزار در روش پله‌ای تغییر ارتفاع می‌دهد، اثر نامطلوب خراش سطحی روی ورق به‌جا می‌گذارد.که برای درک بهتر موضوع از تصاویر ۱۵ و ۱۶ استفاده شده است.



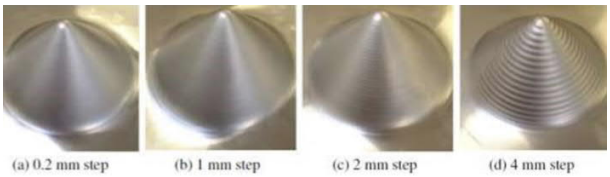
شکل۱۵: ایجاد اثر نامطلوب خراش سطحی در روش پله‌ای [۱۹].



شکل۱۶: ازبین رفتن اثر داغی سطحی، درروش مارپیچی [۱۹].

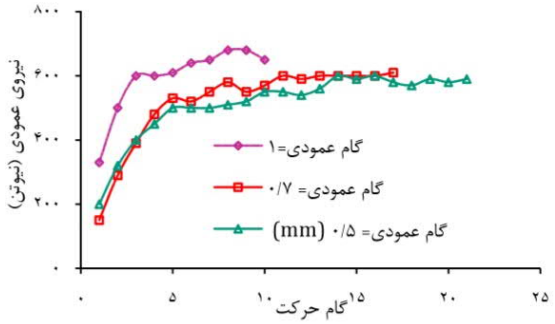
۲-۴ تاثیر گام عمودی

اگر بخواهیم یک تعریف کلی از گام عمودی بیان کنیم، می‌توان گفت، تغییرات ارتفاعی ابزار فرم دهنده به ازای چرخش یک دور کامل(۳۶۰ درجه) اندازه یک گام را مشـــخص می‌کند. در رابطه با تأثیر گام بر روی کیفیت سطح قطعه کار، در تمامی تحقیقات یک نتیجه مشـــهود اســـت، که کاهش اندازه گام همانطور که در شکل ۱۷ نمایش داده شده است رابطه مستقیم با افزایش کیفیت قطعه تولیدی دارد، هرچند زمان فرآیند را افزایش می‌دهد.



شکل۱۷: تفاوت کیفیت سطح قطعه در گام‌های مختلف [۲۰].

در خصوص تأثیر اندازه گام، بر روی قابلیت شکل‌پذیری ماده بین محققان اختلاف نظر وجود داشـت، بعضـی از آنها براین باور بودند که با کاهش گام شـــکل‌پذیری ورق را می‌توان افزایش داد، تااینکه در سال ۲۰۰۶، هام و جسویت[1] [۲۱]. تحقیقاتی انجام دادند که درآن نشان داده شد، که اندازه گام نقش قابل توجه‌ای در قابلیت شـــکل‌پذیری ورق ندارد. در ســـال ۲۰۱۳، قاســـمی و سلطانی در مقاله‌ای[۲۲]. تأثیر پارامتر گام، روی نیروی عمودی وارده به ابزار و ورق را بررسی نمودند؛ همان طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود با افزایش گام نیروی عمودی بیشتر می‌شود که دلیل آن هم به این موضوع برمی‌گردد که با زیاد شدن گام، ابزار کرنش بیشتری را به صورت موضعی بر ورق اعمال می‌کند.



شکل۱۸: تأثیر گام عمودی حرکت ابزار بر نیروی عمودی [۲۲].

۳-۴ تاثیر سرعت دورانی (اسپیندل) و پیشروی ابزار[2]

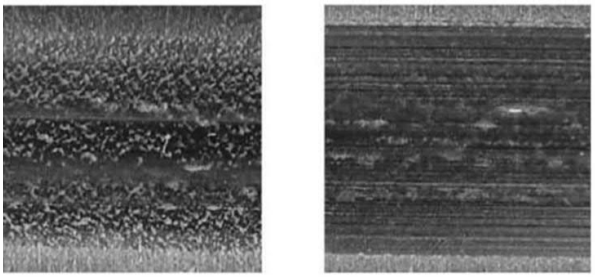
از پارامترهای بسیار مهم در فرآیند(ISF) می‌توان به سرعت دورانی‌اسپیندل و سرعت پیشروی اشاره نمود، زیرا موضوع مهم اصطکاک بین ابزار و ورق و حرارت ناشی از آن، رابطه مستقیم با این دو پارامتر سرعتی دارد. بهلیل اهمیـّت موضوع مقالات زیادی در خصوص اثرات این دو پارامتر منتشر شده است، چون تا یک حدّی حرارت ناشی از اصطکاک باعث افزایش شکل‌پذیری ورق می‌گردد، و از طرفی این حرارت اثرات نامطلوبی نیز به همراه دارد، با توجه به جنس ورق، شدت اثرات مطلوب و نامطلوب متفاوت است؛ از طرفی سرعت پیشروی ابزار اگر از حدی بالاتر برود شکل-پذیری را کاهش می‌دهد، زیرا دیگر حرارت حاصل از اصطکاک زمان کافی برای انتقال حرارت تأثیر روی ورق را نخواهد داشت[۲۳].

[1] M. Ham and J. Jeswiet

[2] Feed Rate

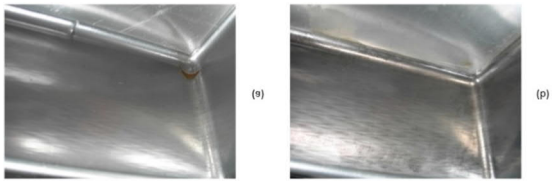
۴-۴ تاثیر استفاده از روانکار

همان طور که در قسمت قبل ذکر گردید مقدار حرارت ناشی از اصطکاک نقش مهمی در فرآیند شکل‌دهی نموی ایفا می‌کند، بنابراین با توجه به رابطه بین ضریب اصطکاک و روانکاری سطوح تماس، می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از روانکار نیز نقش با اهمیتی را دارا می‌باشد؛ در شکل ۱۹ نمونه از سطوح استفاده شده از روانکار و بدون روانکار نشان داده شده است.



شکل۱۹: (الف) نوک ابزار بدون استفاده از روانکار. (ب)نوک ابزار با استفاده روانکار[۲۴].

همان‌طور که از شکل ۲۰ می‌توان نتیجه گرفت در حالت(a) که از روغن Castrol استفاده شده است کیفیت سطوح بهتر و سایش کمتری نسبت به حالت(b)که روغن تراش (آب صابون ماشینکاری) Motorex بکارگرفته شده است[۲۵].



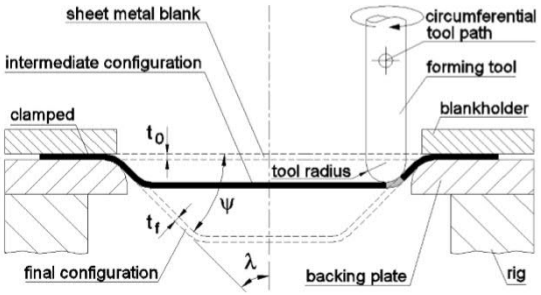
شکل۲۰: (a) استفاده از روانکار Castrol IloformTDN 81.
(b)استفاده از روانکار Motorex cutting fluid 7755 AERO [۲۵].

۵- انواع شکل دهی نموی

در فرایندهای شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی[1] پولک فلزی توسط ابزار یا ابزارهایی به صورت موضعی و با روندی تدریجی مورد تغییر شکل قرار میگیرد تا به شکل محصول نهایی برسد . این فرایندها برای تولید اندک یا نمونه‌سازی سریع می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. اشکال پیچیده می‌توانند بدون نیاز به قالب خاص و تنها توسط یک ابزار عمومی شکل‌دهی شوند. در مجموع این فرآیند را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم‌بندی نمود.

۵-۱ شکل دهی نموی تک نقطه‌ای

دراین روش، تغییرشکل ورق بگونه‌ای است، که ورق به سمت خلاف قرارگیری ابزار سرکروی درحال شکل‌پذیری می‌باشد و هیچ سنبه یا ابزاری(ساپورت)[2] پشت ورق وجود ندارد. درواقع این حرکت تدریجی ابزار است که توسط کنترلر دستگاه CNC شکل مورد نظر را به صورت شکل‌های مقعر و فرورفته ایجاد می‌نماید. شکل ۲۱ ترتیب قرارگیری تجهیزات و موقعیت ورق را نمایش می‌دهد[۲۶].



شکل۲۱: شمای تجهیزات در روش شکل‌دهی نموی تک نقطه-ای[۲۶].

به این نوع شکل‌دهی و حرکت ابزار، شکل‌دهی Negative نیز گفته می‌شود در واقع ابزار با آزادی کامل (شش درجه‌ی آزادی) در داخل ورق حرکت می‌کند و می‌تواند شکل‌های ساده سه‌بعدی (هرم، مخروط و...)را تولید کند. به منظور دیدی بهتر شکل ۲۲ نمایی از این روش را نشان می‌دهد.

[1] Incremental Sheet Metal Forming
[2] Support

شکل۲۲: نمونه‌ای آزمایشگاهی در روش شکل‌دهی نموی تک نقطه-ای[۲۶].

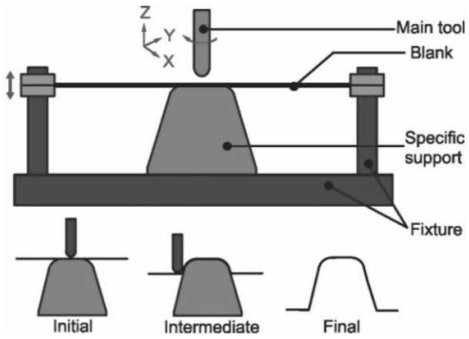
در چنین روشی ورق قفل‌شده و ابزار، در هنگام تغییر فرم فقط در یک نقطه باهم در تماس فیزیکی هستند درنتیجه به طور کل این نوع شکل‌دهی نموی، به شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای SPIF[1] شناخته می‌شود.

۵-۲ شکل‌دهی دو نقطه ای

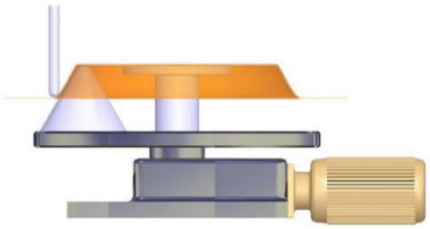
دراین روش، زیر ورق خالی نیست و سنبه فرمی(ساپورت) زیر ورق وجود دارد که می‌بایست ابزار سرکروی با حرکت تدریجی و کنترل شده از طریق کنترلر CNC ، ورق مهار و ثابت شده را روی سنبه فرم‌دار بخواباند و ورق، شکل سنبه فرم را به خود بگیرد. در این روش مجموعه قالب، سنبه فرم و ورق‌گیر ، روی میزدستگاه CNC نصب می‌شوند. حرکت تدریجی نوک ابزار با لحاظ کردن فاصله‌ای تقریبا" 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. البته لازم به ذکر است که شکل‌دهی نموی دو نقطه‌ای (TPIF)، را می‌توان با توجه به نوع ساپورت به دو حالت تقسیم بندی نمود[۲۷].

- شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با ساپورت ثابت
- شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با ساپورت متحرک

تصاویر ۲۳ و ۲۴ می‌توانند درکی بهتر از تفاوت بین دو مورد ذکر شده در قسمت بالا ایجاد نمایند.



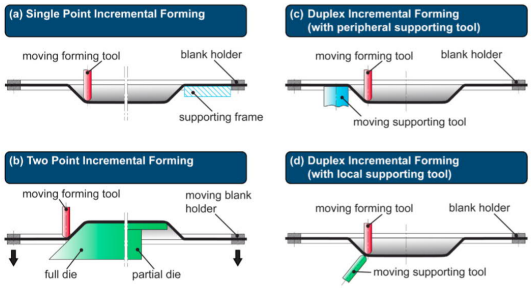
شکل ۲۳: شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با ساپورت ثابت[۲۷]



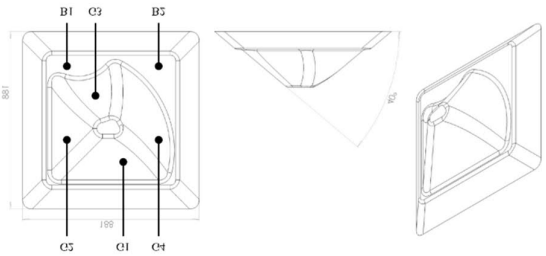
شکل ۲۴: شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای با ساپورت متحرک[۲۷]

دنیس دنیل[2] و همکاران [۲۸] به بررسی پارامترهای وابسته به هندسه شکل‌دهی ورق مبتنی بر روش نموی که از طریق ربات انجام می‌شود پرداختند. در این تحقیق تجربی، با استفاده از ابزارها جهت افزایش دقت شکل‌دهی، پارامترهای نیرو و زاویه مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ هندسه مدل شکل‌دهی شده و روند شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای به نمایش گذاشته شده است.

[1] Single Point Incremental Forming
2 Denis Daniel

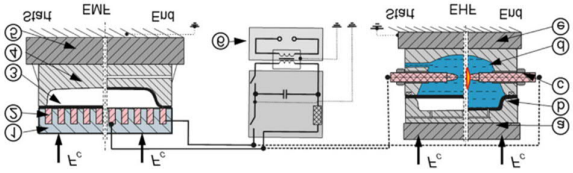


شکل۲۵: شکل دهی نموی تک نقطه‌ای، دونقطه‌ای و چند نقطه-ای[۲۸]



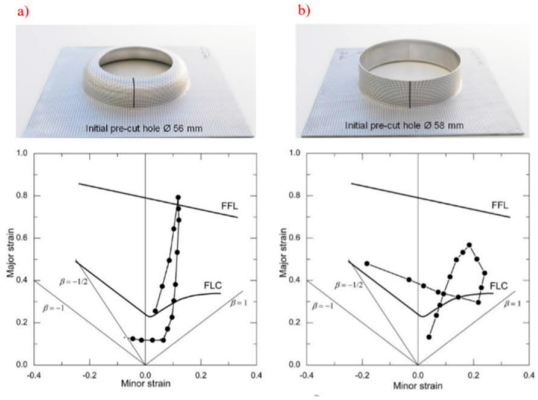
شکل۲۶: هندسه مدل شکل‌دهی شده[۲۸]

لینمان[1] و همکاران [۲۹] به بررسی شکل‌دهی ورق‌های انعطاف پذیر با سرعت بالا پرداختند. تکنولوژی سرعت بالا با استفاده از بخش‌های پیچیده شکل‌دهی و کاهش وزن قطعه کار خواهد شد بنابراین در این پژوهش دو نوع روش ارائه می‌شود که شامل روش-های شکل‌دهی الکتروهیدرولیک و شکل‌دهی الکترومغناطیس می‌باشد این دو روش به منظور دست یابی به دو مفهوم اصلی در شکل‌دهی می‌باشد که این مفاهیم را می‌توان اعم از Pulse-Power-Driven و High-Speel-Forming دانست. در شکل ۲۷ نمونه‌ای از ابزار شکل‌دهی الکتروهیدرولیک و مغناطیس به نمایش گذاشته شده است.



شکل۲۷: نمونه‌ای از ابزار شکل‌دهی الکتروهیدرولیک و الکترومغناطیس[۲۹]

مارتینز[2] و همکاران [۳۰] به بررسی پارامتر تنش در شکل‌دهی فلنج‌های حفره‌دار از طریق روش شکل‌دهینموی تک نقطه‌ای می-تواند حائز اهمیت باشد معیار تست ناکاجیما [3] جهت ارزیابی تنش در سه راستا مورد نظر قرار گرفته است در این پژوهش به توصیف شکل‌دهی محدود شکست یک منحنی با استفاده از معیار ناکاجیما پرداختند همچنین شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای به همراه فرآیند شکل‌دهی نرم و منعطف که در شکل۲۸ آورده شده است تاثیر بسزایی در کاهش پدیده گلویی شدن محلی و توسعه پایدار شکل-دهی پلاستیک خواهد گذاشت.

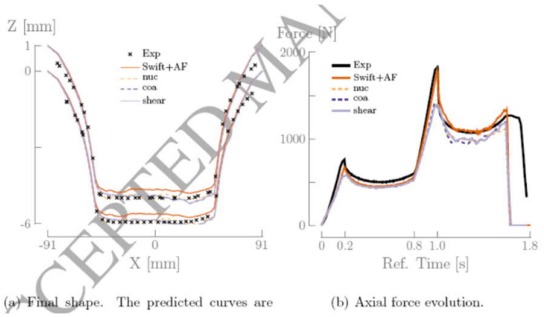


شکل۲۸: تست فلنج حفره دار با سوراخ از قبل ایجاد شده[۳۰]

فیلیپ[4] و همکاران [۳۱] به بررسی پیش‌بینی آسیب در شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای با استفاده از مدل توسعه یافته گارسون[5] قابل انجام می‌باشد مدل گارسون یک نوع شبیه‌سازی براساس تئوری المان محدود است و می‌تواند به راحتی زاویه شکست را تخمین زد. که در شکل ۲۹ پیش بینی نیرو و تغییر شکل و مقایسه آن با نتایج تجربی نشان داده شده است.

1 Linnemanne
2 Martinez
3 Nakajima test

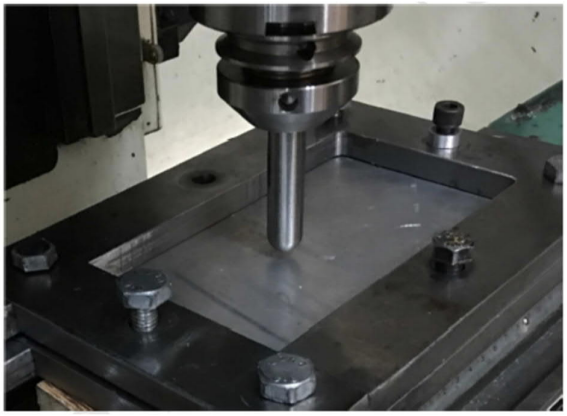
4 Felipe
5 Gurson-Tvergaard-Needleman



(a) Final shape. The predicted curves are (b) Axial force evolution.

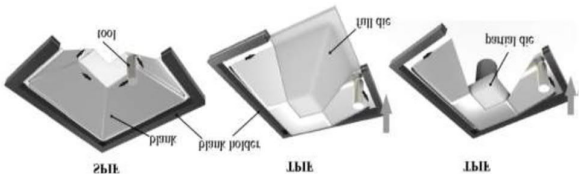
شکل۲۹: پیش بینی نیرو و تغییر شکل و مقایسه آن با نتایج تجربی[۳۱]

الیاس و همکاران [۳۲] به بررسی عوامل موثر در فرایند شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای اعم از کرنش پلاستیک و تنش هیدرواستاتی، نیروی عمودی ابزار شکل‌دهی و خامت شکل‌دهی پرداختند. فرایند شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای یک فرآیند مشهور و پیچیده در شکل‌دهی می‌باشد که روش مدل سازی گارسون می‌تواند تخمین گر مناسبی برای بررسی پارامترهای تاثیر گذار در شکل-دهی نموی در نظر گرفت. همچنین در شکل ۳۰ آغاز فرایند شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای تست تجربی نشان داده شده است.

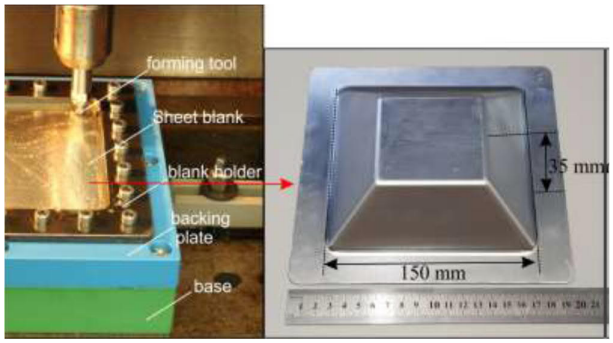


شکل ۳۰: نمایی از برخورد و شروع به کار تست تجربی شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای[۳۲]

مقبول و همکاران [۳۳] به بررسی دقت هندسی در شکل‌دهی نموی پرداختند و نشان دادند که دقت هندسی در شکل‌دهی نموی به مکانیزم تغییر شکل و تنش پسماند در قطعه کار وابسته می‌باشد. پارامترها تاثیر گذار در دقت هندسی شامل قطر، میزان پیشروی ابزار شکل‌دهی، اصطکاک، ضخامت ورق و در نهایت زاویه دیواره ورق شکل‌دهی شده است. در تحقیق بعمل آمده به این نتیجه رسیدند که با افزایش دوران و بیشتر شدن قطر ابزار شکل-دهی دقت هندسی نیز افزایش می‌یابد. شکل ۳۱ و۳۲ روند شکل-دهی نموی را به نمایش گذاشته است.



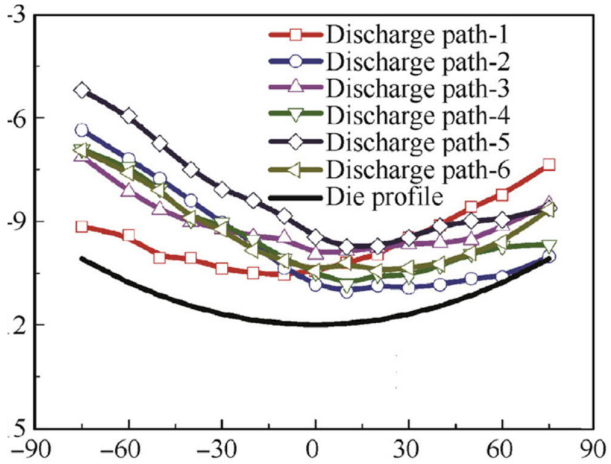
شکل۳۱: روند شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای[۳۳]



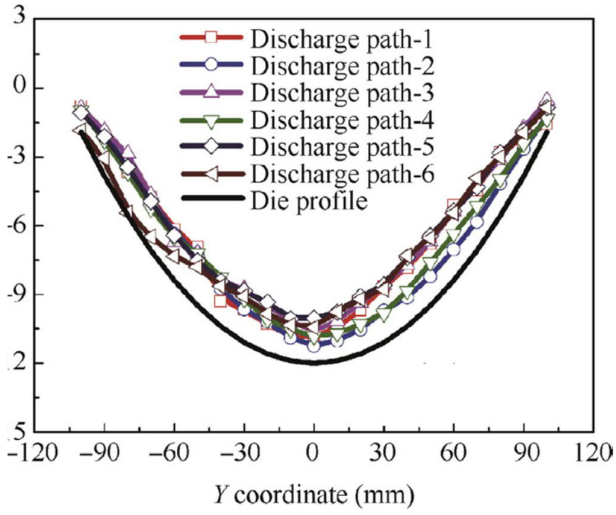
شکل۳۲: شروع و پایان شکل‌دهی ورق[۳۳]

ژان[1] و همکاران [۳۴] روش شکل‌دهی نموی الکترومغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند در روش شکل‌دهی نموی الکترومغناطیس به پارامترهای امروزه برای شکل‌دهی قطعه کارهای سایز بزرگ بسیار مورد توجه قرار گرفته است تخلیه الکتریکی در این فرآیند می‌تواند کمک فراوانی در بهبود شکل‌دهی شود به طور مثال تخلیه الکتریکی در راستای X باعث کاهش انحراف از شکل اصلی می‌شود و شکل یکنواختی را تولید می‌کند در صورتی که تخلیه الکتریکی در راستای Y می‌تواند از کیفیت شکل‌دهی پایین تری برخوردار باشد. که شکل ۳۳ توضیحات تکمیلی در آن آورده شده است.

[1] Zhan



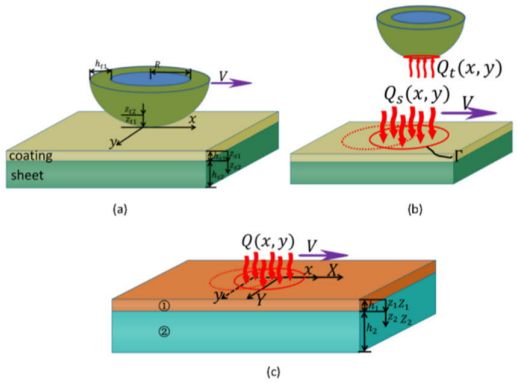
(a) Path X



(b) Path Y

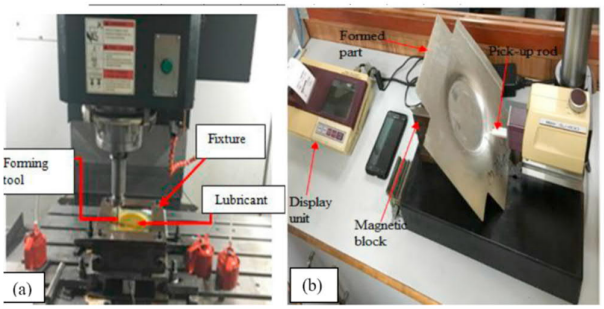
شکل۳۳: نمودارهای تخلیه الکتریکی[۳۴]

ژانگ[1] و همکاران [۳۵] به بررسی تاثیرات دما و حرارت بر ابزار پوشش داده شده به روش شکل‌دهی نموی پرداختند. بررسی دما و حرارت در بخش تماس ابزار شکل‌دهی و قطعه کار در شکل‌دهی نموی از دیگر پارامترهای تاثیرگذار محسوب می‌شود در این پژوهش مدلسازی پارامترهای دما و حرارت با استفاده از توابع پاسخ فرکانسی نظیر تبدیل گالیلن[2]، روش ترکیبی گرادیان[3] و تابع تبدیل فوریه سریع[4] استفاده شده است. شکل ۳۴ گرمای تولید شده از تماس نوک ابزار با ورق شکل‌دهی شده را نشان می‌دهد.



شکل۳۴: انتقال حرارت نوک ابزار a) حرکت نوک ابزار با سرعت ثابت بر روی ورق b) تولید گرما بین سطح تماس ابزار و ورق تولید گرما بین سطح تماس ابزار و ورق c) مشکلات ایجاد شده بر روی سطح ورق[۳۵]

کومار[5] و همکاران [۳۶] به بررسی ناهمواری سطحی در شکل‌دهی نموی پرداختند. سختی سطحی در شکل‌دهی نموی وابسته به پارامترهای نظیر قطر ابزار، گام پیشروی و سرعت اسپیندل است که در این تحقیق نشان دادند که افزایش قطر ابزار شکل‌دهی و کاهش گام پیشروی سهم بسزایی در افزایش کیفیت سطح قطعه کار خواهد داشت. که در شکل ۳۵ ابزارهای مورد آزمایش به همراه نمونه شکل‌دهی شده به نمایش گذاشته شده است.



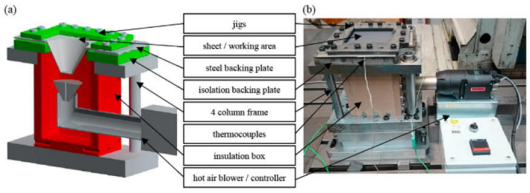
شکل۳۵: a تجهیزات آزمایشگاهی جهت تست b) اندازه گیری ناهمواری سطح ورق شکل‌دهی شده[۳۶]

ویکتوریا[6] و همکاران [۳۷] به بررسی تجربی شکل‌دهی نموی در آلیاژ منگنز AZ31 بعنوان یک آلیاژ سبک وزن پرداختند. شرایط شکل‌دهی نموی در حضور هوای گرم و داغ تا دمای ۳۲۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار گرفت. پس از اتمام فرآیند شکل-دهی، بافت قطعه کار نسبت به حالت قبل از شکل‌دهی تغییری

1 Zhang
2 Galilean Transform
3 Conjugate Gradient Method
4 Fast Fourier Transform

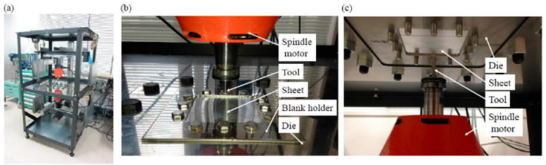
5 Kumar
6 Victoria

نکرده بود و از لحاظ زیر ساختاری کاملا بدون تغییر باقی مانده بود همچنین ضخامت توزیع یافته ورق شکل‌دهی شده و دقت هندسی در زیر ساختار ورق قطعه کار بعد از انجام فرایند شکل-دهی افزایش پیدا کرد. شکل ۳۶ تجهیزات شبیه‌سازی شده و ساخته شده جهت تست تجربی نشان داده شده است.



شکل۳۶: a) مدل شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای همراه با هوای گرم b) تجهیزات تجربی ساخته شده[۳۷]

میورا[1] و همکاران [۳۸] شکل‌دهی نموی دو طرفه در ورق آلومینیوم بعنوان یک تحقیق تجربی جهت دستیابی به دقت شکل‌دهی مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجایی که شکل مورد نظر جهت شکل‌دهی نموی یک دوم فرض شده بود در شکل‌دهی نموی دوطرفه سطح مقاطع ورق شکل‌دهی شده به شکل مورد هدف و طراحی شده نزدیک تر شده بود در صورتی که از شکل-دهی نموی یک طرفه بخواهیم برای تولید یک ورق هرمی شکل-دهی شده استفاده کنیم تنها یک سطح مقطع به شکل مورد هدف نزدیکترشد. که در شکل ۳۷ نماهای کلی از تجهیزات ساخته شده نشان داده شده است.



شکل۳۷: دستگاه تست تجربی a) نمای کلی b) ابزار بالا c) ابزار پایین[۳۸]

۶- نتیجه گیری:

هدف این تحقیق به طور کلی، پرداختن به موضوعاتی همچون، ماهیّت فرآیند شکل‌دهی نموی ورق و عوامل تاثیر گذار در فرایند شکل‌دهی نموی و چکیده‌ای از نوع رفتار مواد، در این گونه فرم-دهی می‌باشد. 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 هزینه‌ترین روش‌های کاربردی در ساخت نمونه‌های اولیه، روش شکل‌دهی نموی نقطه‌ای می‌باشد. با مطالعه مقالات مختلف مشاهده گردید که حوزه کاربردی این فرآیند بسیار وسیع و متنوع می‌باشد، به‌طوری که نمونه کارهای انجام شده در زمینه خودرویی، پزشکی و لوازم خانگی مهر تأییدی بر این گفته می‌باشد. از پارامترهای مهم در شکل‌دهی نموی می-توان به جنس و خواص مکانیکی ورق، مسیر حرکت ابزار، قطر ابزار، سرعت حرکت پیشروی و دورانی ابزار، گام عمودی و مقدار اصطکاک بین ابزار و سطح ورق اشاره نمود.

۷- مراجع:

[1] k. Kitazawa, M. Nakane, Hemi-ellipsoidal stretch-expanding of aluminum sheet by CNC incremental forming process with two path method, Keikinzoku/Journal of Japan Institute of Light Metals, VOL, 47, PP. 440-445, 1997.
[2] J. Jeswiet, E. Hagan, Rapid proto-typing of a headlight with sheet metal, Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers, VOL. 24, PP. 1-6, 2002.
[3] M. Skjoedt, N. Bay, B. Endelt, G. Ingarao, Multi stage strategies for single point incremental forming of a cup, ESAFORM 2008, 11th conference on material forming,VOL. 11, PP. 25-36, 2008.
[4] K. Jackson and J. Allwood, "The mechanics of incremental sheet forming", Journal of Materials Processing Technology, No. 209, pp. 1158–1174, 2009.
[5] S. Matsubara. Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Head Tool. In Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, vol. 35, pp. 119-132, 1994.
[6] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirth, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, CIRP Annals, VOL. 54, PP. 623- 650, 2005.
[7] M. Skjoedt, M. Hancock, M. H. Bay, Creating helical tool paths for single point incremental forming, Key Engineering Materials, vol. 25, pp. 583-590, 2007.
[8] M. Skjoedt, M. Silva, N. Bay, P. Martins, T. Lenau, Single point incremental forming using a dummy sheet, 2nd ICNFT, Bremen Germany, vol. 25, pp. 267-276, 2007.
[9] M. Silva, M. Skjoedt, P. Martins, N. Bay, Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 48, pp. 73-83, 2008.
[10] M. Silva, M. Skjoedt, A. Atkins, N. Bay, P. Martins, Single-point incremental forming and formability-failure

1 Miura

diagrams, Journal of Strain Analysis for Engineering Design, vol. 43, pp. 15-35, 2008.
[11] P. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, M. Silva, Theory of single point incremental forming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 57, pp. 247-252, 2008.
[12] M. Silva, M. Skjoedt, P. Vilaça, N. Bay, P. Martins, Single point incremental forming of tailored blanks produced by friction stir welding, Journal of Materials Processing Tech, vol. 12, pp. 145-160, 2008.
[13] J. Jeswiet, E. Hagan, Rapid proto-typing of a headlight with sheet metal, Proceedings of Shelmet , VOL. 32, PP. 165-170, 2001.
[14] M. Honda, Develops Advanced Technology to Revolutionize Prototyping, Personalization, Low-Volume Production | Honda Media Center, VOL. 35, PP. 874-892, 2015.
[15] M. Skjøedt, Rapid Prototyping by Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, PhD Thesis, Technical University of Denmark, 2008.
[16] J. Duflou, ProductionProcesses-Cranialplate, http://www.mech.kuleuven.be/pp/research/SPIF_cranial.en.html (2006).
[17] S. Tanaka, T. Nakamura, K. Hayakawa, H. Nakamura, K. Motomura, Incremental Sheet Metal Forming Process for Pure Titanium Denture Plate, Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity – ICTP, VOL.7, PP. 135-136, 2005.
[18] J. Lino, R. Araújo, P. Teixeira"single point incremental forming of a medical implant, Elsevier Science Publishers, North- Holland, VOL. 31, PP. 25-36, 2011.
[19] M. Skjoedt, M. H. Hancock, and N. Bay, "Creating Helical Tool Paths for Single Point Incremental Forming," Key Engineering Materials, vol. 344, pp. 583–590, 2007.
[20] J. M. Allwood, N. E. Houghton, and K. P. Jackson, "The Design of an Incremental Sheet Forming Machine," vol. 8, pp. 471–478, 2005.
[21] M. Ham and J. Jeswiet, "Dimensional Accuracy of Single Point Incremental Forming," International Journal of Material Forming, vol. 1, pp. 185–188, 2008.
[22] H. Ghasemi, B. soltani, Experimental investigation on the effective parameters on forming force, 22 september 2013.
[23] F. De Engenharia, Single Point Incremental Forming and Multi-Stage Incremental Forming on Aluminium Alloy 1050 Premika Suriyaprakan, no. February, 2013.
[24] K. Rattanachan, C. Chungchoo, Formability in Single Point Incremental Forming of Dome Geometry, AIJSTPME, No. 2, pp. 57-63, 2009.
[25] Y. H. Kim, J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, Journal of Materials Processing Technology, vol. 130–131, pp. 42–46, 2002.
[26]http://www.castrol.com/castrol/productdetailmin. do? categoryId=9025617
[27] C. Henrard, PhD thesis Numerical Simulations of the Single Point Incremental Forming Process, November, 2008.
[28] D. Daniel, D. Mollensiep, L. Thyssen, B. KuhlenKotter, Geometry-Dependent Parameterization of Local in robot based Incremental Sheet Forming, Procedia Manufacturing, vol. 15, pp. 1164-1169, 2018.
[29] M. Linnemann, V. Psyk, E. Djakow, R. Springer, W. Homberg, D. Landgrebe, High-Speed Incremental Forming New Technologies for Flexible Production of Metal Parts, Procedia Manufacturing, vol. 27, pp.21-26, 2019.
[30] A.J. Martinez , M. Borrego, D. Morales, G. Centeno, C. Vallellano, Analysis of the influence of stress triaxiality on formability of hole-flanging by single-stage SPI, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 12, pp. 254-278, 2018.
[31] C. Felipe, S. Yuan, L. Duchˆene, E. Saavedra Flores, A. Habraken, Damage Prediction in Single Point Incremental Forming using an Extended Gurson Model, International Journal of Solids and Structures, vol. 26, pp. 196-240, 2017.
[32] M. Ilyas, G. Hussain, C. Espinosa, Failure and Strain Gradient Analyses in Incremental Forming using GTN model, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, vol. 36, pp. 869-889, 2018.
[33] F. Maqbool , M. Bambach, Dominant Deformation Mechanisms in Single Point Incremental Forming (SPIF) and their Effect on Geometrical Accuracy, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 8, pp. 1020-1044, 2017.
[34] J. TAN, M. ZHAN, H. LI, Dependence on forming parameters of an integral panel during the electromagnetic incremental forming process, Chinese Journal of Aeronautics, vol. 21, pp. 105-115, 2018.
[35] X. Zhang, T. He, H. Miwa, T. Nanbu, R. Murakami, S. Liu, J. Cao, Q. Jane Wang, A new approach for analyzing the temperature rise and heat partition at the interface of coated tool tip-sheet incremental forming systems, nternational Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 129, pp. 1172-1183, 2019.
[36] A. Kumar, V. Gulati, P. Kumar, Investigation of Surface Roughness in Incremental Sheet Forming, International Conference on Robotics and Smart Manufacturing, vol. 133, pp. 1014-1020, 2018.
[37] A. leonhadt, G. Kurz, J. Hernandez, d.Letzig, Experimental Study on Incremental Sheet Forming of Magnesium alloy AZ31 with hot air heating, 17th International Conference on Metal Forming, vol. 15, pp. 1192-1199, 2018.
[38] M. Ostu, S. Nagai, T. Miura, M. Okada, T. Muranaka, Forming Accuracy Improvement by double-side Incremental Forming, 17th International Conference on Metal Forming, vol. 15, pp. 1177-1183, 2018.