

مروری بر فرآیند شکل دهی تدریجی

پیام طیبی^{۱*}، علی فضلی^۲، پرویز اسدی^۳، مهدی سلطانیپور^۴

^۱ دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام خمینی قزوین، قزوین، ایران

^۲ استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام خمینی قزوین، قزوین، ایران

^۳ استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام خمینی قزوین، قزوین، ایران

^۴ استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام خمینی قزوین، قزوین، ایران

*مسئول مکاتبات: payamtayebi@gmail.com

چکیده

واژگان کلیدی

شکل دهی تدریجی
ضخامت ورق
ابزار شکل دهی
کیفیت سطح
برگشت فنی

شکل دهی تدریجی، فرآیندی نوین، کم هزینه و انعطاف پذیر برای شکل دهی ورق محسوب می شود. با توجه به زمان زیاد این فرایند، استفاده از این روش برای فرم دهی قطعات در حجم تولید کم و ساخت نمونه های قطعات مناسب است. فرایند شکل دهی تدریجی از لحاظ تجهیزات اولیه فرآیندی کم هزینه است. اجزاء مورد نیاز برای شکل دهی یک ابزار نیم کروی، یک فیکسچر و یک دستگاه کنترل عددی است. برای تولید یک محصول با خواص مطلوب و عملکرد مناسب با کمترین هزینه، تعیین میزان بهینه ای برای پارامترهای فرآیند بسیار ضروری است. هدف از ارائه این مقاله بررسی وضعیت کنونی فرایند شکل دهی تدریجی با توجه به قابلیت های فنی و محدودیت های خاص این فرایند است. در این مقاله بیشترین تمرکز بر روی تأثیر پارامترهای فرایند شکل دهی تدریجی بر مقدار شکل پذیری، تغییر شکل و مکانیزم های شکست، برگشت فنی، کیفیت سطح و نیرو شکل دهی برای به دست آوردن بهینه ترین مقدار برای هر پارامترها در فرایند شکل دهی تدریجی است.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۱۱
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۳/۲۱

۱ مقدمه

قطعات به صورت کم و نمونه سازی کاربرد دارد در صنعت اتومبیل سازی از این فرآیند بیشتر برای ساخت نمونه یا اتومبیل های سفارشی استفاده می شود. در صنایع پزشکی از این فرآیند برای ساخت پروتزهای پزشکی استفاده می شود. این فرآیند در صنایع هوافضا و صنایع غذایی نیز کاربردهایی دارد. فرآیند شکل دهی تدریجی هم مانند سایر روش های شکل دهی دچار ضعف هایی است که محققین در سال های اخیر آزمایش های متعددی جهت رفع این ضعف ها انجام دادند و روش های شکل دهی تدریجی متعددی ارائه نموده اند. در این مقاله انواع روش های شکل دهی تدریجی مرور گردیده است و همچنین نظریات محققین در مورد اثر پارامترهای فرآیند در شکل دهی تدریجی مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج حاصل از آن ها بیان شده است. در انتها نیز روش های شکل دهی ترکیبی که برای بهبود فرآیند و کم کردن اثرات منفی پارامترهای شکل دهی ارائه شده است مرور گردیده اند.

۲ انواع شکل دهی تدریجی

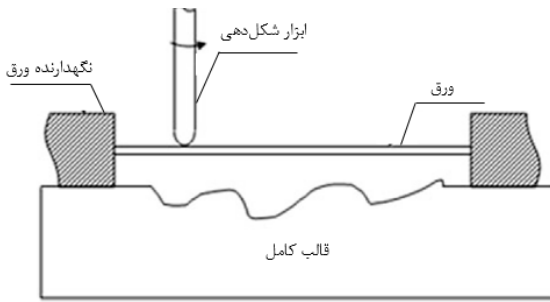
در این بخش به معرفی انواع روش های شکل دهی تدریجی و مکانیزم های تولید هر یک از روش ها به اختصار پرداخته شده است.

۱.۲ شکل دهی تدریجی تک نقطه

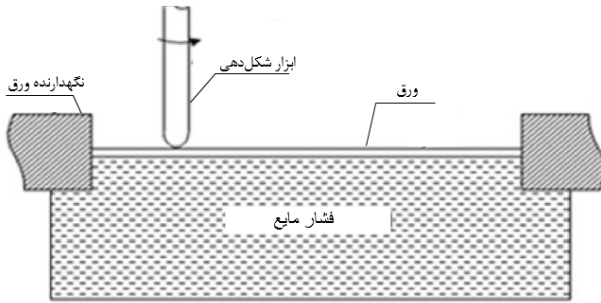
شکل دهی تدریجی بدون قالب است که به عنوان SPIF^۱ یا فرم دهی تک نقطه ای تدریجی نیز شناخته شده است. فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۱، t_0 ضخامت اولیه ورق، t_f

امروزه فرآیندهای شکل دهی فلزات به عنوان یکی از روش های مهم ساخت و تولید قطعات محسوب می شوند. شناخت هر چه دقیق تر روش های شکل دهی، صنعتگران را به سمت تولید قطعات با کیفیت بالاتر سوق می دهد. گستره وسیعی از فرآیندهای شکل دهی ورق فلزی از چکش کاری دستی تا فن آوری های بالا در دستگاه های پیچیده وجود دارد. در روش های شکل دهی معمولی به دلیل بالا بودن هزینه تهیه قالب و امکانات فراوان مورد نیاز برای شکل دهی قطعات پیچیده و گاهی اوقات عدم توانایی در ساخت قطعات پیچیده صنعتگران را به فکر واداشت تا از روشی مقرون به صرفه و انعطاف پذیر برای تولید این گونه قطعات استفاده کنند که با حداقل هزینه امکان تولید قطعات در تعداد کم و متوسط را بدون نیاز به ساخت قالب فراهم سازد. شکل دهی افزایشی (ISF)^۱ یک فرآیند جدید برای تولید قطعات ورق فلزی در تولید نمونه و حجم کم است؛ که مهم ترین مزیت های آن را می توان انعطاف پذیری، قابلیت کنترل عددی فرآیند و پایین بودن هزینه تجهیزات دانست. در این فناوری یک ابزار ساده شکل دهی با کمک یک دستگاه CNC^۲، بر روی یک ورق که توسط ورق گیره مهار شده است، در یک میسر از پیش تعیین شده حرکت می کند و ورق را شکل می دهد. ایده اولیه شکل دهی تدریجی در کشور آمریکا توسط روثاس در سال ۱۹۶۰ ارائه شد [۱]. لسزاک نیز در سال ۱۹۶۷ شکل دهی تدریجی را به صورت کاربردی بیان کرد [۲]. فرآیند شکل دهی تدریجی بیشترین پیشرفت های خود را در صنعت در قرن ۲۰ داشته است. با توجه به اینکه فرآیند شکل دهی تدریجی بیشتر برای تولید

^۱Incremental Sheet Forming ^۲control number computer ^۳Single Point Incremental Forming



شکل ۳: شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای با قالب کامل [۵]



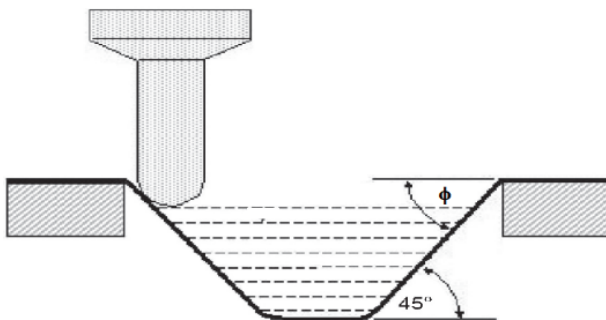
شکل ۴: شکل‌دهی تدریجی تک نقطه با کمک فشار مایع [۴]

۳ پارامترهای مؤثر در شکل‌دهی تدریجی

فرآیند شکل‌دهی تدریجی پارامترهای زیادی دارد که این فرآیند و کیفیت قطعه نهایی حاصله را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با تغییر این پارامترها می‌توان به شرایط بهینه برای یک فرآیند شکل‌دهی مقرون‌به‌صرفه رسید.

۱.۳ اثر زاویه حد شکل‌دهی

زاویه دیواره قطعه تغییر شکل یافته نسبت به ورق اولیه را زاویه شکل‌دهی (φ) می‌گویند که در شکل ۵ نشان داده شده است. زاویه شکل‌دهی می‌تواند برای اندازه‌گیری شکل‌پذیری ورق استفاده شود. بزرگ‌ترین زاویه شکل‌دهی (φ_{max}) که ورق بدون پارگی شکل می‌گیرد را زاویه حد شکل‌دهی می‌نامند.



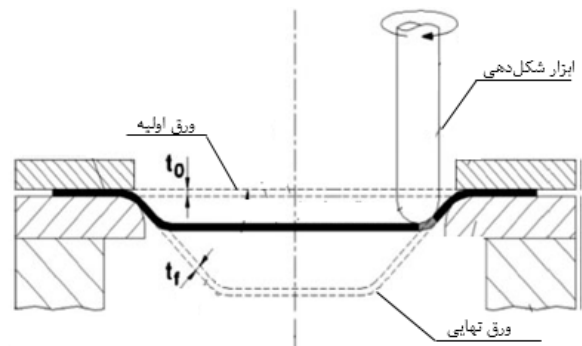
شکل ۵: نمایش زاویه حد شکل‌دهی [۶]

اندازه گام بر روی حداکثر زاویه تغییر شکل اثر زیادی ندارد، درحالی‌که ضخامت ماده، قطر ابزار و اصطکاک (اثر متقابل) بین ضخامت مواد و اندازه ابزار اثر قابل‌توجهی در حداکثر زاویه دیواره دارد. زاویه حد شکل‌دهی وقتی که از ابزار کوچک با مسیر ابزار ماریچ استفاده می‌شود افزایش می‌یابد. اندازه گام و نرخ پیشروی تأثیر کمی بر روی زاویه حد شکل‌دهی دیواره دارد؛

ضخامت نهایی ورق است. در این فرآیند یک ابزار که معمولاً به صورت سرکروی است با قطری مشخص بر روی مسیر ابزار که بر اساس شکل نهایی محصول تعریف شده است حرکت می‌کند تا ورق اولیه به تدریج به شکل نهایی تبدیل شود.

۲.۲ شکل‌دهی تدریجی دونقطه با قالب موضعی

در روش شکل‌دهی تدریجی ۲ نقطه یا TPIF^۱ علاوه بر استفاده از ابزار و ورق‌گیر، یک ابزار پشتیبان موضعی نیز در زیر ورق قرار دارد تا ورق موردنظر در ۲ نقطه تماس پیدا کند، این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است. یک نقطه تماس بین ابزار و سطح ورق در بالای ورق و یک نقطه تماس بین سطح ورق و ابزار پشتیبان در پایین ورق قرار دارد. در این روش ابزار پشتیبان همراه با ابزار شکل‌دهی حرکت کرده تا فرآیند شکل‌دهی کامل شود [۴].



شکل ۱: شکل‌دهی تدریجی تک نقطه [۳]



شکل ۲: شکل‌دهی تدریجی دونقطه [۵]

۳.۲ شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای با قالب کامل

در این روش از ابزار تک لبه که بر روی یک طرف سطح ورق فلزی حرکت می‌کند استفاده می‌شود. طرف دیگر از سطح ورق توسط یک قالب کامل که در شکل ۳ نشان داده شده است پشتیبانی می‌شود [۵].

۴.۲ شکل‌دهی تدریجی هیدرولیکی تک نقطه ورق

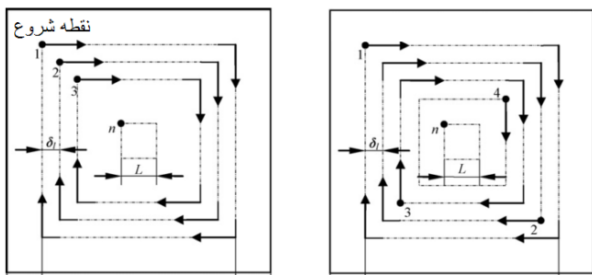
در روش SPIHF^۳ ابزار تک لبه در یک سمت ورق، کار شکل‌دهی را انجام داده و در طرف دیگر ورق فشار مایع هیدرولیک کار پشتیبانی ورق فلزی را بر عهده دارد (شکل ۴) [۵].

^۱Two point incremental forming

^۲Two point incremental forming with Full Die

^۳Single-point incremental hydro forming

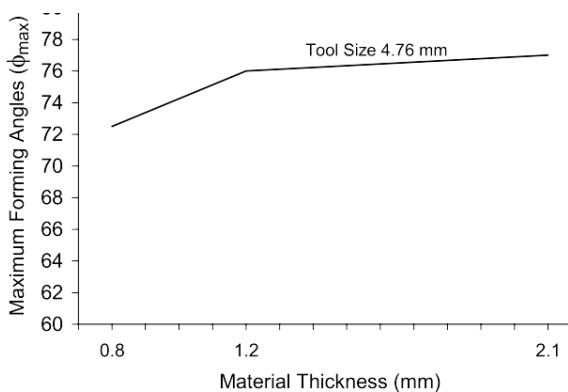
کمک می‌کند [۱۴]. از آوازی و لبال از مدل‌سازی المان محدود (RMS)^۱ برای بهینه‌سازی مسیر ابزار و بهبود توزیع ضخامت در قطعات نامتقارن استفاده نمودند؛ و توزیع ضخامت را به مقدار ۷ درصد بهبود دادند [۱۵]. لیو و همکارانش شکل‌پذیری و مکانیزم شکل‌دهی ورق آلومینیوم-AA7075-O را در مسیر شکل‌دهی مارپیچ و پله‌ای بررسی نمودند آن‌ها بیان کردند که تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند؛ اما با وجودی که نیرو به‌دست‌آمده برای هر دو مسیر یکسان است، منحنی نیروی حاصل از مسیر مارپیچ صاف‌تر از مسیر پله‌ای است. برای رسیدن به ضخامت یکنواخت در محصول بهتر است ابزار حرکت افقی و عمودی هم‌زمان مانند حرکت مارپیچ در ابزار داشته باشد [۱۶]. یاماشیتا و همکارانش [۱۷] تأثیر مسیر ابزار بر مقدار تغییر شکل ورق را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وابسته به قطعه تغییر شکل داده‌شده برای تولید یک قطعه با کیفیت بهتر و توزیع ضخامت بهتر ابزار باید از یکی از گوشه‌ها شروع به حرکت کند (شکل ۷).



شکل ۷: تأثیر نقطه شروع ابزار بر شکل‌دهی [۱۷]

۴.۳ اثر ضخامت ورق

شکل‌دهی تدریجی تا حد زیادی به ضخامت ورق وابسته است. در ورق‌های با ضخامت کم، به دلیل کم بودن گرادیان حرارتی شکل و خواص دو سطح داخلی و خارجی قطعه شکل داده‌شده تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. در مورد تأثیر ضخامت ورق در شکل‌دهی محققین، نتایج متفاوت و گاهی متضادی را ارائه نموده‌اند. هام و جسوایت در سال ۲۰۰۶ [۱۸] آزمایش‌های خود را بر روی ورق آلومینیوم AA3003 انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت ورق شکل‌پذیری ورق نیز افزایش پیدا می‌کند. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۸ آمده است.



شکل ۸: تأثیر ضخامت ورق بر شکل‌پذیری ورق [۱۸]

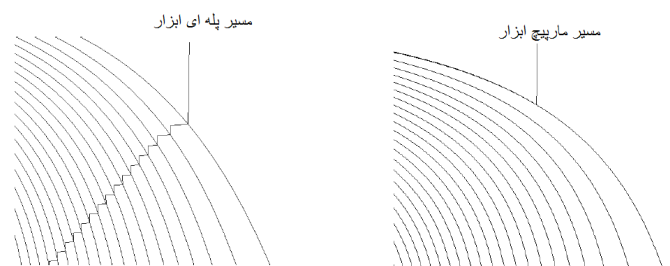
مینوتلو و همکارانش بیشترین زاویه دیواره ورق آلومینیوم 7075T0 برای هرم و مخروط ناقص را اندازه گرفتند که برای هرم ناقص ۶۳ درجه به دست آمد و برای مخروط ناقص ۶۶ درجه به دست آمد [۷]. به‌تازاریا و همکارانش با تجزیه و تحلیل تجربی خود نشان دادند که افزایش قطر ابزار و گام تدریجی باعث کاهش زاویه شکل‌دهی و افزایش ضخامت ورق اولیه می‌شود، در صورتی که نرخ پیشروی تأثیر زیادی بر مقدار زاویه حد شکل‌دهی ندارد [۸]. رادو توانست ورق فولاد DC01 با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر را تا شیب دیواره ۸۰ درجه و عمق ۷۰ میلی‌متر را با ابزار ساده را شکل‌دهی کند [۹].

۲.۳ اثر جنس ورق

یکی از اجزاء اصلی در شکل‌دهی تدریجی ورق جنس ورق است که بسیاری از پارامترهای فرآیند به آن بستگی دارد. اکثر مطالعات روی بخشی کوچکی از مواد مانند پی‌وی‌سی، آلومینیم، منیزیم AZ31 و تیتانیوم صورت گرفته است. اچریف و همکارانش نشان دادند که آلیاژهای آلومینیوم نیروی کمتری برای شکل‌دهی می‌خواهد. مس آئیل شده C101 به خاطر قابلیت لحیم‌کاری و نرم بودن و شکل‌پذیر بودن می‌تواند به وسیله ISF فرم‌دهی شوند [۱۰]. فرانزن و همکارانش [۱۱] بهبود فرآیند پلیمر برای تولید در مقیاس کوچک و نمونه‌سازی سریع روی ورق‌های پی‌وی‌سی تجاری با استفاده از SPIF را بررسی نمودند. لی و همکارانش [۱۲] شکل‌دهی تدریجی تک نقطه مواد ترموپلاستیک را بررسی نمود و ابعاد قطعه در هر مرحله، ابعاد ابزار و تأثیر نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بر روی فرم‌پذیری ورق پلی‌پروپیلن با ضخامت اولیه ۳ میلی‌متر را مطالعه نمود.

۳.۳ اثر مسیر ابزار

مسیر حرکت ابزار بر روی ورق یکی از پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی تدریجی است و از پارامترهای موردعلاقه محققین برای بهبود این فرآیند است. مسیر ابزار تأثیر مستقیم بر دقت ابعادی، پرداخت سطح، شکل‌پذیری، تغییرات ضخامت ورق و زمان فرآیند دارد. در سال ۲۰۰۷ اسکاچوئث و همکارانش دو مسیر حرکت مارپیچ و پله‌ای را به‌صورت تجربی مقایسه کردند. در این آزمایش‌ها مشخص گردید که کیفیت سطح به‌دست‌آمده با مسیر حرکت مارپیچ نسبت به مسیر حرکت پله‌ای بهتر است. در روش پله‌ای در قسمتی که ابزار تغییر ارتفاع می‌دهد اثر نامطلوب خراش سطحی روی ورق دیده می‌شود (شکل ۶) [۱۳].



شکل ۶: ایجاد اثر نامطلوب خراش سطحی در روش پله‌ای [۱۳]

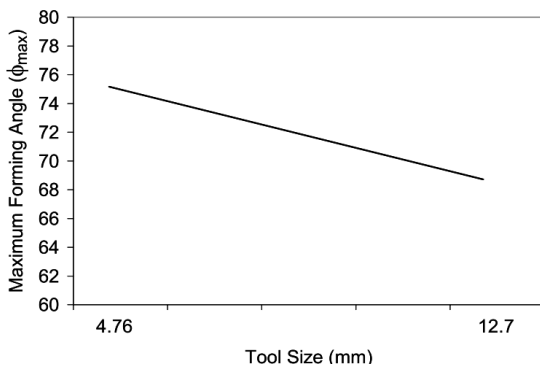
قاسمی و سلطانی با بررسی تجربی SPIF یک هرم ناقص آلومینیومی دریافتند که به کارگیری مسیر ابزار مارپیچ به یکنواخت‌تر شدن توزیع ضخامت

¹response method surface

باعث توزیع یکنواخت تر ضخامت می شود. میرنیا و ملائی با روش حد بالا به تحلیل نیروهای مماسی در این فرآیند پرداختند و نشان دادند که با افزایش گام عمودی و ضخامت ورق نیروها افزایش می یابد [۱۴]. با گودانچ و همکارانش [۲۴] شکل دهی تدریجی را بر روی ورق پی وی سی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت ورق شکل پذیری هم افزایش پیدا می کند.

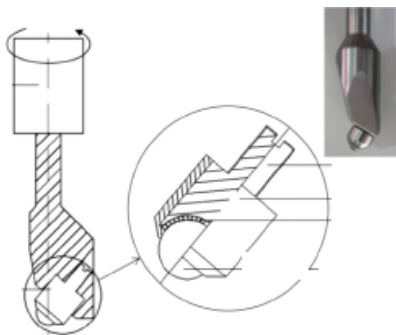
۵.۳ اثر شکل و اندازه ابزار

از عوامل تأثیرگذار در شکل پذیری فرآیند شکل دهی تدریجی ورق شکل ابزار تغییر شکل است. ابزار تغییر شکل تک نقطه از اجزاء مهم در ماشین شکل دهی تدریجی است. در سال ۲۰۰۵ جسویت و همکارانش [۱۷] در مقاله ای به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر ابزار شکل پذیری ماده کاهش پیدا می کند. هام و جسویت در سال ۲۰۰۶ [۱۸] تأثیر قطر ابزار بر بیشترین زاویه حد شکل دهی ورق آلومینیوم AA3003 را بررسی کردند و دریافتند که بیشترین شکل پذیری با ابزار شکل دهی کوچک و با توجه به گرمای ایجاد شده در نوک ابزار در اثر اصطکاک رخ می دهد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: تأثیر قطر ابزار بر مقدار شکل پذیری ورق [۱۸]

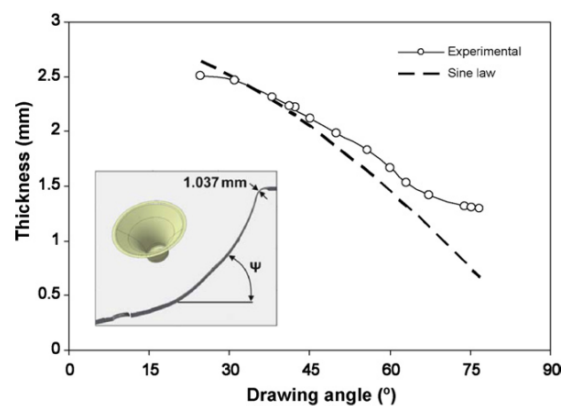
لو و همکارانش [۲۸] ابزار مورب سر کروی (ORB) را پیشنهاد دادند. میزان بهبود شکل پذیری با این ابزار نسبت به ابزار سر کروی در شکل دهی تدریجی را بررسی نمودند. در تمامی آزمایش ها شکل پذیری با ابزار ORB بیشتر از ابزار سرکروی بود (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: ظاهری از فیزیک و شماتیک ابزار ORB [۲۵]

در سال ۲۰۰۶ آمبریگو و همکارانش [۲۶] در مقاله ای نشان دادند که قطر ابزار با گام عمودی ابزار در فرآیند شکل دهی اثر دارد. به طوری که با کاهش نسبت قطر ابزار به گام، برگشت فزنی کمتر و دقت ابعادی و هندسی، بهتری خواهد بود. در سال ۲۰۰۹ کامارا [۲۷] آزمایش ها خود را روی ۲ هندسه

شان موگاناتان و کومار در سال ۲۰۱۳ [۱۹] جهت بررسی تأثیر ضخامت ورق اولیه بر مقدار شکل پذیری آزمایش های خود را بر روی ورق آلومینیوم AL 3003 انجام دادند. آن ها دریافتند که با افزایش ضخامت ورق مقدار زاویه دیواره افزایش می یابد. گلابی و خزعلی در سال ۲۰۱۴ [۲۰] آزمایش های خود را بر روی ورق استیل ۳۰۴ انجام دادند. آن ها دریافتند که با افزایش ضخامت ورق شکل پذیری در فرآیند شکل دهی تدریجی افزایش پیدا می کند. هام در سال ۲۰۰۷ [۲۱] و حسین در سال ۲۰۱۳ [۲۲] یک محدوده بهینه ای برای ضخامت مواد به دست آوردند که در آن محدوده از ضخامت ورق شکل پذیری افزایش پیدا می کند. فرانزن و همکارانش در سال ۲۰۰۹ [۲۳] آزمایش های خود را بر روی ورق PVC انجام دادند. آن ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت ورق PVC شکل پذیری آن کاهش پیدا می کند (شکل ۹).



شکل ۹: تأثیر ضخامت ورق بر مقدار شکل پذیری ورق PVC [۲۳]

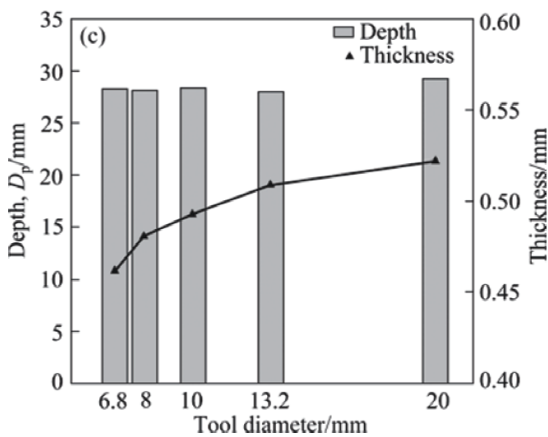
در فرآیند شکل دهی تدریجی توزیع ضخامت قطعه حاصله از قانون کسینوس پیروی می کند. طبق این قانون، اگر t_i ضخامت اولیه ورق و θ شیب قطعه در نقطه مورد نظر باشد، ضخامت نهایی قطعه (t_f) از رابطه زیر به دست می آید.

$$t_f = t_i \times \cos \theta \quad (1)$$

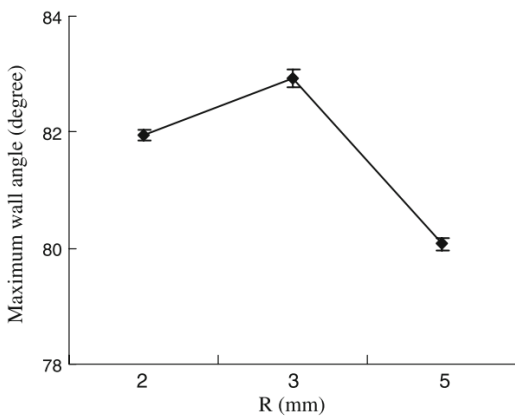
طبق قانون کسینوس، قسمت هایی از قطعه که موازی با ورق اولیه باقی بمانند، هیچ تغییر ضخامتی نخواهند داد و ضخامت در آن قسمت ها برابر با ضخامت ورق اولیه خواهد بود. از طرف دیگر بخش هایی از قطعه که حداکثر شیب را داشته باشند، حداکثر کاهش ضخامت را خواهند داشت. بدین ترتیب، توزیع ضخامت در قطعه نهایی می تواند بسیار غیر یکنواخت باشد. محققین مختلف تلاش هایی را جهت توزیع یکنواخت تر ضخامت انجام داده اند. از اوزری یک روش بهینه ای برای شکل دهی تدریجی به منظور کاهش زمان تولید و توزیع ضخامت همگن ورق را پیشنهاد داد. او با تغییر در مسیر مارپیچ ابزار توانست یک مسیر بهینه ای به دست آورد که با این مسیر ابزار توزیع ضخامت در قطعه بهبود پیدا کرد [۱۵]. قاسمی و سلطانی اثر برخی پارامترهای مؤثر بر روی تغییر ضخامت قطعه تغییر شکل یافته و نیروها در فرآیند شکل دهی تدریجی را مطالعه نمودند و نشان دادند که با افزایش سرعت پیشروی نیروی عمودی کاهش می یابد و با افزایش سرعت چرخشی ابزار نیروی افقی کاهش یافته که

¹poly vinyl chloride ²oblique roller ball

۸، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر برای ابزار شکل‌دهی استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر ابزار شکل‌پذیری تقریباً به صورت معادله درجه دوم کم می‌شود. لی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ از آزمایش شیار مستقیم برای اندازه‌گیری شکل‌پذیری ورق استفاده کردند و دریافتند که با افزایش قطر ابزار شکل‌پذیری افزایش می‌یابد درحالی‌که دوران و همکارانش در سال ۲۰۱۱ سیلو و همکارانش که در سال ۲۰۱۱ در آزمایش‌ها خود نتایج مخالفی با لی داشتند [۳۴]. کیم و پارک در سال ۲۰۰۲ [۳۵] در آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که برای افزایش مقدار شکل‌پذیری ورق نیاز به اندازه قطر بهینه‌ای برای ابزار است. زیران و همکارانش در سال ۲۰۱۰ [۲۹] آزمایش‌های خود را بر روی ورق آلومینیوم AA3003 انجام دادند. آن‌ها برای یک مقدار بهینه‌ای از قطر ابزار برای داشتن حداکثر مقدار شکل‌پذیری ورق به دست آوردند. این نتایج در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: حداقل ضخامت و محل آن در شرایط متفاوت قطر ابزار [۳۱]



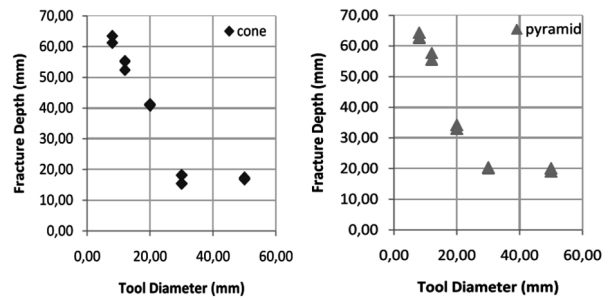
شکل ۱۶: مقدار بهینه‌ی شعاع ابزار برای داشتن بیشتر مقدار شکل‌پذیری [۲۹]

۶.۳ اثر شرایط روان‌کاری

مواد خنک کاری از دیرباز کاربرد فراوانی در صنایع تولیدی داشته است. توجه به مزایا فراوان آن در بهبود شرایط ماشین‌کاری و زیاد بودن مزیت‌هایش، صنعتگران را به استفاده از آن جهت خنک-کاری و روان‌کاری واداشته است. مقدار حرارت ناشی از اصطکاک نقش مهمی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ایفا می‌کند و با توجه به روابط بین ضریب اصطکاک و روان‌کاری سطوح

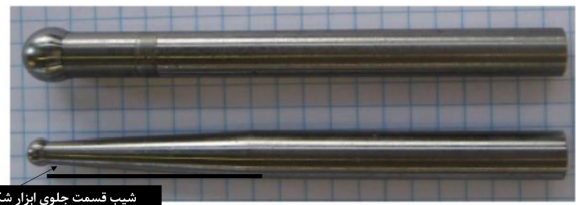
¹commercially pure titanium

هرمی و مخروطی از جنس آلومینیوم انجام داد و به این نتیجه رسید که کاهش قطر ابزار فرم‌پذیری را افزایش می‌دهد. در شکل ۱۲ نتایج این آزمایش‌ها آمده است.



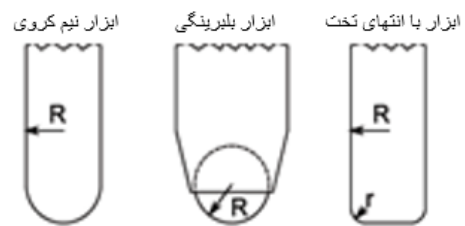
شکل ۱۲: تأثیر قطر ابزار در فرم‌پذیری به دست‌آمده از مخروط و هرم [۲۷]

زاویه که در قسمت جلو ابزار وجود دارد برای جلوگیری از تماس بین بدنه ابزار و ورق فلزی در نظر گرفته شده است. این زاویه در شکل ۱۳ مشخص است [۵].



شکل ۱۳: اعمال شیب قسمت جلو ابزار شکل‌دهی تدریجی [۵]

کیم و یانگ به این نتیجه رسیدند که استفاده از ابزار سر کروی باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود [۲۸]. زیران و همکارانش [۲۹] اثر ابزار سر تخت، سر نیم کروی و بلبرینگی را بررسی و مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین شکل‌پذیری زمانی است که از ابزار سر تخت استفاده شود (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: ابزارهای اصلی مورد استفاده در شکل‌دهی تدریجی [۳۰]

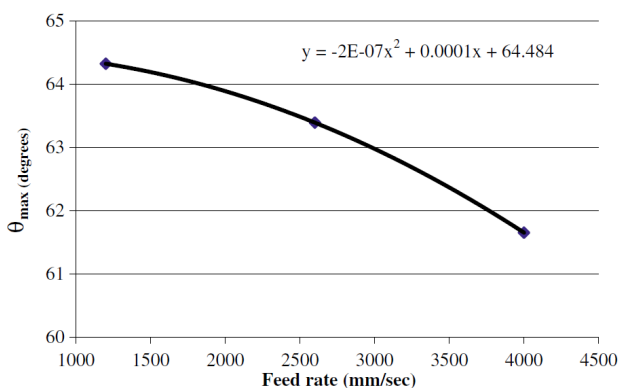
چان جیو و همکارانش [۳۱] در سال ۲۰۱۲ اثر قطر ابزار بر روی ضخامت ورق را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش شعاع ابزار باعث بهبود توزیع ضخامت ورق می‌شود (شکل ۱۵).

میرینا و همکارانش [۳۲] در سال ۲۰۱۳ تأثیر قطر ابزار در توزیع ضخامت یک مخروط ناقص را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش قطر ابزار سبب افزایش نیرو ابزار و کاهش توزیع ضخامت ورق می‌شود. حسین و همکارانش [۳۳] به ارزیابی شکل‌پذیری ورق تیتانیوم خاص تجاری (تیتانیوم خام) CPTI^۱ در فرآیند ISF سرد پرداختند و تأثیر قطر ابزار بر شکل‌پذیری را بررسی کردند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از قطر

و شکل پذیری را افزایش می‌دهد. بر اساس آنچه کیم و پارک ادعا نمودند، علت این مسئله آن است که با ابزار سر کروی و بدون مایع روان‌کار وقوع ترک به تأخیر افتاده و شکل پذیری افزایش می‌یابد.

۷.۳ اثر سرعت دورانی و سرعت پیشروی

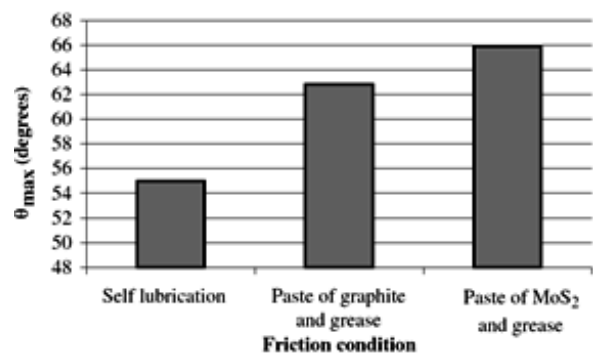
از پارامترهای بسیار مهم در فرآیند ISF می‌توان به سرعت دورانی اسپیندل و سرعت پیشروی اشاره نمود. سرعت دورانی و سرعت پیشروی رابطه مستقیمی با اصطکاک بین ابزار و ورق و حرارت ناشی از اصطکاک دارد. حرارت ناشی از اصطکاک تا یک مقدار بهینه‌ای باعث افزایش شکل پذیری می‌گردد ولی اگر این حرارت از یک مقداری بیشتر شود با توجه به جنس ورق اثرات نامطلوبی بر روی ورق به جا می‌گذارد. سرعت پیشروی ابزار اگر از حدی بالاتر برود شکل پذیری را کاهش می‌دهد، علت این است که حرارت تولیدشده ناشی از اصطکاک زمان کافی برای انتقال حرارت و تأثیر بر روی ورق را نخواهد داشت. کیم و پارک [۳۵] در سال ۲۰۰۲ در آزمایش‌ها خود بر روی ورق آلومینیومی به این نتیجه رسیدند که با افزایش نرخ پیشروی شکل پذیری کاهش پیدا می‌کند. هام و جسوایت [۱۸] آزمایش‌هایی را بر روی ورق آلومینیوم AA3003 انجام دادند. آن‌ها آزمایش‌ها را با دو سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه و ۱۰۰ دور بر دقیقه انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه شکل پذیری بالاتر می‌رود و این افزایش شکل پذیری به دلیل تولید گرمای اصطکاکی بیشتر در منطقه تماس بین ابزار و ورق است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با کاهش نرخ پیشروی شکل پذیری بهبود می‌یابد. حسین و همکارانش در سال ۲۰۰۸ [۳۲] در آزمایش‌های خود تأثیر نرخ پیشروی را بر روی زاویه حد شکل دهی و شکل پذیری ورق بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش نرخ پیشروی شکل پذیری کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۹).



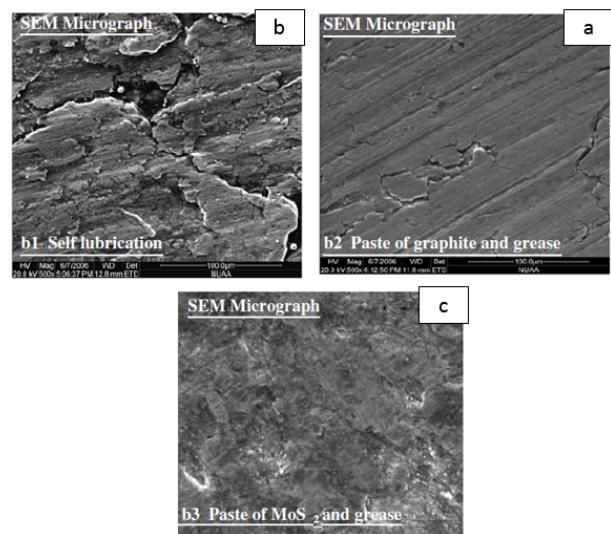
شکل ۱۹: تأثیر سرعت پیشروی بر شکل دهی [۳۶]

راتاناچان و چانگجو [۳۷] تحقیقاتی را روی دو پارامتر سرعت پیشروی و سرعت دورانی انجام دادند و توانستند مقدار بهینه‌ای را برای این ۲ پارامتر به دست بیاوردند. سرعت بهینه دورانی را مقدار ۱۰۰ دور بر دقیقه به دست آوردند و سرعت بهینه پیشروی ابزار را ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه به دست آوردند. نتایج نشان می‌دهد که سرعت دورانی ابزار بیشترین تأثیر را بر شکل پذیری دارد. زمانی که سرعت دورانی ابزار افزایش پیدا می‌کند شکل پذیری کاهش پیدا می‌کند. از طرفی نرخ پیشروی ابزار کمترین تأثیر را بر شکل پذیری دارد.

تماس می‌توان نتیجه گرفت استفاده از روان‌کار نیز نقش مهمی شکل دهی ایفا می‌کند. حسین و همکارانش [۳۳] اثر ترکیبی ابزار و روان کننده بر کیفیت سطح قطعات شکل داده شده را با اندازه‌گیری زبری سطح و بررسی سطح با میکروسکوپ الکترونی مطالعه نمودند. آن‌ها آزمایش‌های خود را بر روی ورق تیتانیوم خالص و در شرایط بدون روان‌کاری و استفاده از ۲ نوع روان‌کار ۱- گرافیت به همراه گریس ۲- مولیبدن دی سولفید به همراه گریس انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از ترکیب مولیبدن دی سولفید همراه با گریس کیفیت سطح و شکل پذیری بالاتری نسبت به ۲ حالت قبلی دارد. در شکل ۱۷ و ۱۸ نتایج تأثیر نوع روان‌کار بر مقدار شکل پذیری ورق و همچنین کیفیت سطح ورق را به ترتیب نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: تأثیر نوع روان‌کار بر مقدار شکل پذیری ورق تیتانیوم [۳۳]



شکل ۱۸: تأثیر نوع روان‌کار بر زبری سطح ورق تیتانیوم. a: بدون روان‌کاری b: استفاده از گرافیک و گریس به عنوان روان‌کار c: استفاده از مولیبدن دی سولفید و گریس به عنوان روان‌کاری [۳۶]

در بررسی‌هایی که کیم و پارک [۴۰] بروی تأثیر روان‌کار توسط دو نوع ابزار سرکروی و سر نیم کروی بر روی کیفیت سطح انجام دادند. طبق آزمایش‌های انجام شده وقتی از ابزار سر کروی و مایع روان‌کار استفاده شود کرنش ۰/۷۲ است و زمانی که از مایع روان‌کار استفاده نمی‌شود کرنش ۰/۷۳ است. در روش دیگر وقتی ابزار سر نیم کروی استفاده شود مقدار کرنش بدون مایع روان‌کار ۰/۶۷ است و با مایع روان‌کار ۰/۶۹ است. با توجه به آزمایش‌ها استفاده از ابزار سر کروی بدون مایع روان‌کار ترکیبی ایده آل است

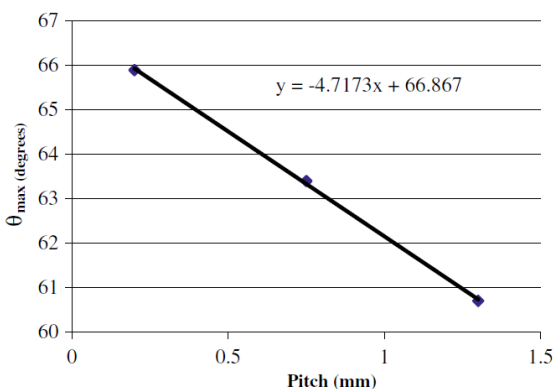
شرایط شکل دهی را به شکل دهی گرم تبدیل می‌کند. این حرارت باعث افزایش زاویه حد شکل دهی می‌شود ولی چنانچه این سرعت از حد بهینه خود عبور کند شرایط اصطکاکی در منطقه تماس باعث افت شکل پذیری ورق می‌شود. داور پناه و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۴۱] آزمایش‌هایی در سرعت‌های مختلف اسپیندل انجام دادند. آن‌ها آزمایش‌ها خود را بر روی مخروطی از جنس PVC و قطر اصلی ۴۰ میلی‌متر و قطر ابزار ۵ میلی‌متر انجام دادند و دریافتند که با افزایش سرعت دورانی زاویه حد شکل دهی افزایش پیدا می‌کند.

۸.۳ اثر جهت چرخش اسپیندل

دوران و همکارانش در سال ۲۰۱۱ [۴۲] شکل دهی تدریجی با ابزار سر نیم کروی در دو جهت عقربه‌های ساعت و خلاف عقربه‌های ساعت انجام دادند و با مقایسه جواب‌ها مشخص شد که جهت چرخش ابزار اثر خاصی بر شکل پذیری ندارد و تنها بر کیفیت سطح نهایی و نیروی شکل دهی تأثیر دارد.

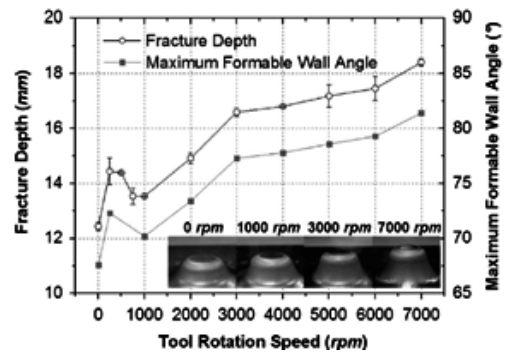
۹.۳ اثر گام عمودی

به حرکت ابزار به سمت پایین در راستای محور Z در هر چرخش ۳۶۰ درجه گام عمودی گویند و با انجام تمامی تعداد گام‌ها فرآیند شکل دهی کامل می‌شود. در ارتباط با تأثیر گام افزایشی بر شکل پذیری فرآیند در مقالات مختلف ۳ نوع نظر متفاوت وجود دارد. در سال ۲۰۱۳ لیو و همکارانش [۱۶] نشان دادند که با افزایش گام از ۰/۲ به ۰/۵ می‌توان یک مخروط با زاویه دیواره بزرگ‌تری به دست آورد که نشان‌دهنده بهبود شکل پذیری است. داور پناه و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۴۱] با انجام آزمایش‌هایی بر روی ورق PVC به این نتیجه رسیدند که با افزایش گام عمودی در فرآیند شکل دهی تدریجی، شکل پذیری ورق افزایش پیدا می‌کند. در گزارش‌های متفاوت دیگری، باگودانچ و همکارانش به این نتیجه رسیدند [۴۳] که کاهش گام نفوذی باعث افزایش شکل پذیری می‌شود اما اثر قابل توجهی بر زمان فرآیند دارد. استرانو در سال ۲۰۰۵ [۴۴] آزمایش‌های خود را بر روی ورق AA1050 انجام داد. او به این نتیجه رسید که کاهش گام عمودی باعث افزایش شکل پذیری ورق می‌شود. حسین و همکارانش در سال ۲۰۰۸ [۳۶] آزمایش‌های خود را بر روی ورق تیتانیوم خالص انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با کاهش گام عمودی شکل پذیری ورق افزایش پیدا می‌کند (شکل ۲۱).



شکل ۲۱: تأثیر گام عمودی بر مقدار شکل پذیری ورق تیتانیوم [۳۶]

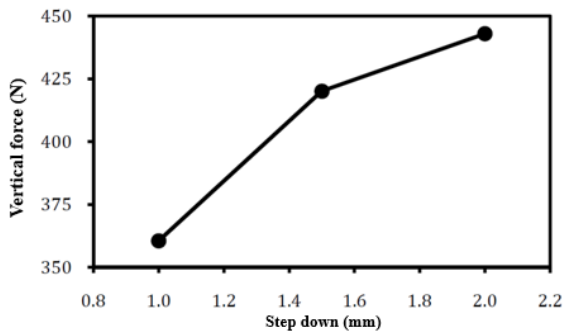
نتایج نشان داد که افزایش نرخ پیشروی باعث کاهش شکل پذیری می‌شود. حسین و همکارانش در سال ۲۰۱۰ [۳۸] نشان دادند که نرخ پیشروی اثر متفاوتی بر ورق‌های AA2024 آیل شده و پیر شده دارد. برای ورق‌های پیر شده استفاده از نرخ پیشروی کم مناسب‌تر است. ولی برای ورق‌های آیل شده نرخ پیشروی هیچ اثری در شکل پذیری ورق ندارد. ژو و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۳۹] در آزمایش‌های خود به بررسی تأثیر سرعت دورانی بر مقدار شکل پذیری ورق پرداختند. آن‌ها از ۹ سرعت مختلف اسپیندل در بازه ۰ تا ۷۰۰۰ دور بر دقیقه و همچنین از ابزاری به قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده کردند. از نمودار به دست آمده مشخص است که به جز بازه سرعتی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در سایر سرعت‌ها با افزایش سرعت دورانی شکل پذیری افزایش پیدا می‌کند (شکل ۲۰).



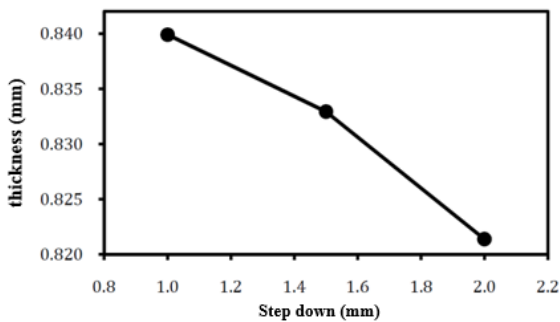
شکل ۲۰: تأثیر سرعت دورانی بر شکل پذیری [۳۹]

آن‌ها بر این باورند که با افزایش سرعت دورانی اصطکاک افزایش پیدا می‌کند و باعث گرمایش اصطکاکی در ورق می‌شود و در نتیجه نرمی و تغییرات مفیدی در ریزساختار رخ می‌دهد. بویا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۴۰] آزمایش‌های خود را بر روی سه نوع مختلف ورق آلومینیوم و در بازه سرعت‌های دورانی بین ۰ تا ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه انجام دادند. مواد انتخاب شده معمولاً در دمای اتاق به سختی شکل می‌گیرد اما افزایش سرعت دورانی باعث گرم شدن ورق و تغییر در ساختار کریستالی و اندازه دانه‌ها می‌شود که این تغییرات باعث بهبود شکل پذیری می‌شود. نتایج آزمایش‌ها تجربی نشان می‌دهد که افزایش سرعت دورانی باعث افزایش ۱۲ درجه‌ای مقدار زاویه شکل دهی می‌شود. گلابی در سال ۲۰۱۴ [۲۰] به این نتیجه رسید که نرخ پیشروی تأثیر زیادی بر شکل پذیری ورق SS304 ندارد. باگودانچ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۲۴] به این نتیجه رسیدند که برای نمونه‌های PVC افزایش نرخ پیشروی تأثیر مثبتی بر عمق شکست دارد. آن‌ها در آزمایش‌های خود قطعات را با ۲ نرخ پیشروی ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه شکل دهی کردند. مشخص شد نمونه‌ای که با نرخ پیشروی ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه شکل دهی شده است از شکل پذیری بالاتری برخوردار است. از میان تمامی مقاله‌های بررسی شده تنها باگودانچ به این نتیجه رسید که افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش شکل پذیری ورق می‌شود. زاهدی و همکارانش [۱۴] در مقاله‌ای به بررسی تجربی فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق‌های دولایه پرداختند و اثر سرعت پیشروی بر روی میزان شکل پذیری ورق بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت تا یک مقدار بهینه‌ای باعث افزایش حرارت در منطقه تماس ابزار با ورق می‌شود و

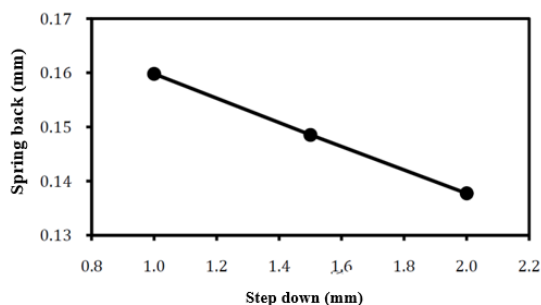
ورقی پلو پرو پلین کارکردند و نشان دادند که شکل پذیری با ترکیب خاصی از نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بهبود یافته و دریافتند که ارتباط زیادی بین این دو پارامتر است. باگودانچ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۲۴] آزمایش‌های خود را بر روی ورق استیل ۳۰۴ انجام دادند و دریافتند که رابطه بین سرعت دورانی و پیشروی ابزار تأثیری روی مقدار شکل پذیری ورق ندارد، اما بر روی زبری سطح کیفیت اثر می‌گذارد.



شکل ۲۲: مؤثر بودن گام عمودی بر نیروی مصرفی [۴۸]



شکل ۲۳: رابطه بین گام عمودی و حداقل ضخامت ورق [۴۸]



شکل ۲۴: رابطه گام عمودی و مقدار برگشت فنری [۴۸]

۲.۴ قطر ابزار و ضخامت مواد

اثر متقابل بین ضخامت ورق و اندازه ابزار تأثیر قابل توجهی در بیشترین حد شکل دهی دارد. هام و جسویت در سال ۲۰۰۶ [۱۸] به این نتیجه رسیدند که به جای استفاده از ابزار با قطر کم و ورق با ضخامت زیاد اگر از ابزار با قطر زیاد و ورق با ضخامت کم استفاده شود زاویه حد شکل دهی در فرایند شکل دهی تدریجی ۱۳ درجه افزایش پیدا می‌کند. سیلوا و همکارانش در سال ۲۰۱۰ [۴۹] آزمایش‌ها متفاوتی بر روی ورق PVC با ضخامت‌های متفاوت انجام دادند و نتایج بیشترین زاویه دیواره را با در نظر گرفتن شعاع ابزار آنالیز

دورانه در سال ۲۰۱۱ [۴۲] و آمبروجیو در سال ۲۰۱۵ [۴۲] نیز به این نتیجه رسیدند که با کاهش گام عمودی شکل پذیری افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده در مورد اثر گام عمودی بر مقدار شکل پذیری ورق در فرایند شکل دهی تدریجی مشخص است که برای داشتن حداکثر مقدار شکل پذیری ورق نیاز به داشتن مقدار بهینه‌ای از گام عمودی است. این مقدار بهینه برای گام عمودی با توجه به جنس ورق و ضخامت ورق متغیر است. دافلو و همکارانش [۴۵] در سال ۲۰۰۷ در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش گام عمودی نیروی مصرفی و میانگین نیروی مصرفی در طی فرایند شکل دهی افزایش می‌یابد (شکل ۲۲).

پتک و همکاران [۴۶] در سال ۲۰۰۹ در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش گام عمودی مقدار شکل پذیری ورق افزایش پیدا می‌کند. حسین و همکارانش [۳۸] در سال ۲۰۱۰ دریافتند که برای بیشترین مقدار شکل پذیری یک مقدار بهینه‌ای از گام عمودی باید در نظر گرفت و توانستند با ترکیب خاصی از قطر ابزار و گام عمودی شکل پذیری را بهبود بدهند. مانگو و آمبروگیو [۴۷] با استفاده از آزمایش‌هایی که بر روی آلومینیومی انجام دادند اثر گام عمودی بر روی ضخامت کمینه را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش گام عمودی ضخامت کمینه افزایش می‌یابد. میرنیا و همکارانش [۳۲] تأثیر گام عمودی بر توزیع ضخامت در فرایند شکل دهی تدریجی یک مخروط ناقص را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش گام عمودی تا یک میزان مشخص باعث بهبود نازک شدگی در ورق می‌شود. در آزمایش‌هایی که زاهدی و همکارانش [۱۴] برای شکل دهی تدریجی چند مرحله یک مخروط ناقص آلومینیومی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که با افزایش اندازه گام عمودی زمان شکل دهی و همچنین مقدار شکل پذیری کاهش پیدا می‌کند. کاهش شکل پذیری ورق به این دلیل است که تمرکز زیاد تنش به هنگام افزایش گام عمودی باعث تجمع سریع خرابی‌ها می‌شود که این خرابی‌ها باعث تسریع در شکست ورق می‌شود.

حسین محمدی و همکارانش [۴۸] به این نتیجه رسیدند که با افزایش گام عمودی، حداقل ضخامت ورق کاهش می‌یابد (شکل ۲۳) و همچنین در مورد تأثیر گام عمودی در برگشت فنری به این نتیجه رسیدند که با افزایش گام عمودی و ضریب اصطکاک برگشت فنری کاهش یافته است (شکل ۲۴).

۴ بررسی ترکیبی پارامترهای مؤثر در شکل دهی تدریجی

اثر پارامترهایی که بر روی فرایند شکل دهی تدریجی مؤثر هستند به صورت تکی بررسی شد. اکنون در این بخش اثر پارامترها شکل دهی تدریجی به صورت ترکیبی بررسی شده‌اند و نتایجی را که بر شکل پذیری فرایند دارند بیان شده است.

۱.۴ نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل

سرعت پیشروی و سرعت اسپیندل نقش اصلی در اصطکاک و تولید گرما در طول فرایند SPIF بازی می‌کند. لی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ [۱۲] روی

می‌گویند. برگشت فنری منجر به انحراف قطعه از شکل نهایی می‌شود. سه نوع برگشت فنری در ISF وجود دارد.

۱. به‌طور هم‌زمان با جابجایی ابزار اتفاق می‌افتد که برگشت فنری به‌صورت مستمر و محلی نامیده می‌شود.
 ۲. برگشت فنری معمولی است و زمانی اتفاق می‌افتد که بار برداشته‌شده و گیره آزاد شده باشد.
 ۳. برگشت فنری زمانی که قطعه تریم می‌شود اتفاق می‌افتد.
- مواردی که در برگشت فنری SPIF تأثیر دارد به‌صورت زیر است:

۱. مسیر ابزار
۲. ضخامت ورق
۳. نرخ پیشروی
۴. سرعت اسپیندل
۵. اندازه ابزار
۶. گام ابزار
۷. تنش پسماند

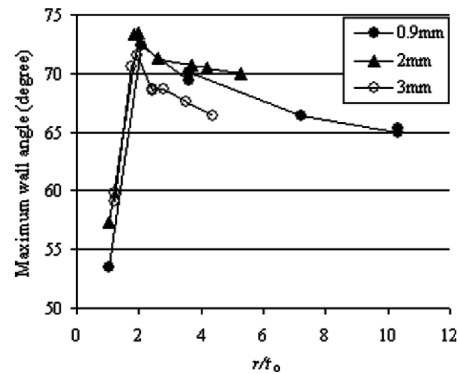
۱.۵ مسیر ابزار

برای پیش‌بینی و جبران مقدار برگشت فنری می‌توان از طراحی و اصلاح مسیر ابزار استفاده کرد. آمبرگیو و همکارانش [۵۱] برگشت فنری الاستیک در ورق آلومینیوم AA1050-O را بررسی کردند و مقداری از برگشت فنری را توسط حرارتی‌دهی جبران کردند و به این نتیجه رسیدند برگشت فنری در طول دیواره و به صورت منحنی اتفاق می‌افتد. دجاردين [۵۲] مدل اجزاء محدود بر اساس المان پوسته‌ای را برای بررسی و تجزیه و تحلیل اثرات برگشت فنری ورق آلومینیوم پیشنهاد کرد. فو و همکارانش [۵۳] مطالعاتی را بر اساس موج و تبدیل فوریه سریع انجام دادند. آن‌ها دریافتند که محاسبه برگشت فنری و مسیر ابزار اصلاح‌شده با تبدیل فوریه و موج قابل بررسی است.

۲.۵ پارامترهای شکل‌دهی

الکسیک و همکارانش [۵۴] یک روش شبیه‌سازی برای تولید ایمپلنت زانوی مصنوعی با استفاده از فرایند ISF بر روی ورق CPTi انجام دادند. نتایج نشان داد که مقدار برگشت فنری با افزایش اندازه قطر ابزار، کاهش گام عمودی و ضخامت ورق افزایش پیدا می‌کند. مهدی و همکارانش [۵۵] برگشت فنری و اثرات آن بر هندسه و دقت ابعادی توسط فرایند ISF را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل تحلیلی با انتخاب یک روش مناسب برای پارامترهای فرآیند و کاهش برگشت فنری به دست آوردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش قطر ابزار، نرخ پیشروی، سرعت اسپیندل و ضخامت ورق و با کاهش در گام عمودی ابزار برگشت فنری کاهش پیدا می‌کند. جانچوی و همکارانش [۵۶] شکل‌دهی تدریجی را به صورت تجربی و المان محدود برای ورق DC56 به صورت چند مرحله‌ای انجام دادند. آن‌ها دریافتند زمانی که تعداد مراحل شکل‌دهی افزایش پیدا می‌کند برگشت فنری نسبت به یک فرآیند تک مرحله‌ای بزرگ‌تر شده است. علت این است که برگشت فنری در هر مرحله از شکل‌دهی تدریجی ذخیره می‌شود. آن‌ها دریافتند که مقدار برگشت فنری به

کردند. رابطه خیلی کمی بین آن‌ها دیده شد و مشخص شد که تنها با افزایش قطر ابزار و تغییر ندادن در ضخامت ورق می‌توان یک اثر مثبتی را بر بیشترین زاویه دیواره ورق ایجاد کرد. حسین و همکارانش [۲۲] با تست چندین ضخامت ورق و قطر ابزار دریافتند که یک مقدار بهینه از ترکیب این ۲ پارامتر به دست می‌آید که بیشترین زاویه دیواره را تا ۲۰ درجه افزایش می‌دهد. آن‌ها یک نمودار از زاویه دیواره و نسبت شعاع ابزار به ضخامت ورق ارائه کردند که نشانگر یک افزایش در شکل‌پذیری است (r/t) (شکل ۲۵).



شکل ۲۵: تأثیر نسبت شعاع ابزار و ضخامت بر شکل‌دهی [۲۲]

باگودانچ و همکارانش [۲۴] آزمایش‌ها خود را بر روی ورقی از جنس PVC انجام دادند و دریافتند که رابطه بین ضخامت ورق و قطر ابزار اثر ناچیزی در شکل‌پذیری دارد اما بر زبری سطح نهایی مؤثر است.

۳.۴ قطر ابزار و گام نفوذی

لی و همکارانش [۱۲] اثر متقابل بین قطر ابزار و گام نفوذی را بسیار کم بیان کردند. به همین علت ابزارهایی با قطر کم و گام‌های نفوذی زیاد باعث کاهش زاویه حد شکل‌دهی می‌شود. از سوی دیگر هام و جسویت [۱۸] و باگودانچ [۲۴] به این نتیجه رسیدند که اثر متقابل قطر ابزار و گام نفوذی اثر کمی بر بیشترین زاویه دیواره دارد.

۴.۴ گام نفوذی و ضخامت ماده

مانکو و آمبرگیو [۴۷] در آزمایش‌های به این نتیجه رسیدند که گام نفوذی ابزار و ضخامت بلانک بر کمترین ضخامت ورق تأثیر دارد. حسین و همکارانش [۵۰] دریافتند که اثر متقابل این دو پارامتر تأثیر زیادی در تجزیه و تحلیل حالت شکست ندارد. با توجه به کم بودن اثر ترکیبی گام نفوذی و ضخامت مواد، با این حال برای به دست آوردن یک مقدار بهینه‌ای از تغییرات گام نفوذی بر اساس ضخامت مواد در فرایند شکل‌دهی تدریجی باید تحقیقات بیشتری انجام شود.

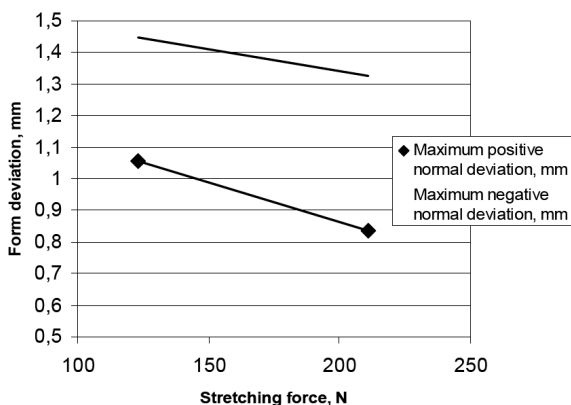
۵ برگشت فنری و تأثیر آن بر فرایند شکل‌دهی

تدریجی

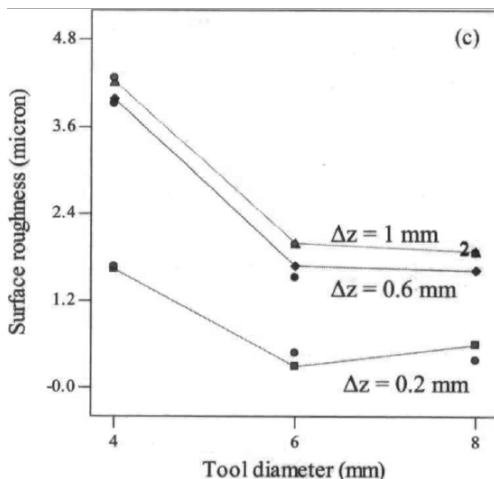
بعد از عملیات شکل‌دهی تدریجی زمانی که نیرو برداشته می‌شود یک تغییر اندازه در زاویه حد شکل‌دهی به‌طور ناخواسته رخ داده که به آن برگشت فنری

۲.۶ اندازه و جنس ابزار

جنس ابزار شکل‌دهی و اندازه قطر ابزار نقش مهمی در کیفیت سطح نهایی بازی می‌کند؛ بنابراین برخی محققان در تلاش‌اند که یک ابزار با جنس و قطر مناسب را جهت دستیابی به بالاترین کیفیت سطح انتخاب کنند. هام و همکارانش [۶۰] از دو ابزار سر نیم کرووی و ابزار سر نیم کرووی کاربایدی برای آزمایش‌های خود استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که زبری سطح و درجه آنیزوتروپی سطح به جنس ابزار شکل‌دهی وابسته است. بهاتاچاریا و همکارانش [۸] اثرات متغیرهای فرآیندهای ISF بر روی سطح نهایی ورق AL 6062 را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که زبری سطح با افزایش اندازه قطر ابزار برای تمامی گام‌های عمودی کاهش می‌یابد (شکل ۲۷).



شکل ۲۶: رابطه بین نیرو کششی و دقت قطعه کار [۵۷]



شکل ۲۷: تغییرات سطح نهایی با قطر ابزار و عمق‌های تدریجی متفاوت [۸]

لو و همکارانش [۶۱] برای بررسی اثرات اصطکاک بر روی سطح نهایی از ابزارهای رایج شکل‌دهی تدریجی و ابزارهای ORB استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که کمترین زبری سطح پایانی توسط ابزار ORB به دست می‌آید. در فرآیند شکل‌دهی تدریجی کیفیت سطح وابسته به استراتژی مسیر ابزار است که لو و همکارانش [۶۲] یک الگوریتم جدید برای مسیر ابزار به صورت زیگ‌زاگی و مارپیچ جهت افزایش کیفیت سطح ارائه کردند.

زاویه دیواره وابسته نیست درحالی‌که زاویه دیواره تعداد مراحل شکل‌دهی را مشخص می‌کند.

۳.۵ نیروی برشی

در حین فرآیند ISF سه مؤلفه نیرویی به وجود می‌آید که دو تا از نیروها در صفحه افقی (Fx and Fy) و دیگر نیرو در صفحه عمودی (Fz) رخ می‌دهد. این نیروها بر اساس پارامترهای شکل‌دهی می‌توانند کاهش و یا افزایش پیدا کنند. برای مثال با افزایش گام عمودی ابزار نیروی شکل‌دهی افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین انتخاب مناسب پارامترهای شکل‌دهی برای به وجود آمدن مقداری مطلوب از نیروی شکل‌دهی برای ایجاد درجه کمتری از برگشت فنی کمک می‌کند.

دافلو و همکارانش [۴۵] از اشعه لیزر برای ایجاد یک نقطه گرمایی بین منطقه حرکتی بین ابزار و ورق استفاده کردند. دافلو کارهای خود را بر روی ورق آلومینیوم انجام داد. آن‌ها دریافتند که سیستم حرکتی گرمایی باعث کاهش سطح تنش و نرخ برگشت فنی و افزایش دقت در فرآیند ISF می‌شود. پوهلاک و همکارانش [۵۷] اثرات تنش پسماند بر هندسه قطعه شکل داده شده را بررسی کردند و دریافتند که افزایش نیروی کششی باعث بهتر شدن دقت قطعه کار می‌شود (شکل ۲۶).

۶ زبری سطح در شکل‌دهی تدریجی

در فرآیند ISF می‌توان از روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری زبری سطح استفاده کرد، اما ۲ روش متوسط زبری (Ra) و بیشترین زبری (Rz) بیشترین کاربرد را دارد. برای تعیین مقدار زبری سطح تعدادی از پارامترهایی که زبری سطح را کاهش می‌دهند به این صورت هستند:

۱. چرخش ابزار
۲. مسیر شکل‌دهی
۳. اندازه ابزار
۴. ابزار شکل‌دهی
۵. اندازه گام و زاویه شکل‌دهی [۳۴].

۱.۶ چرخش ابزار

مقدار زبری سطح به جهت و سرعت چرخش ابزار در فرآیند شکل‌دهی تدریجی وابسته است. چرخش ابزار بیشتر در جهت xy (نرخ پیشروی) بر روی کیفیت سطح اثر دارد. سیلوا و همکارانش [۵۸] چرخش ابزار در صفحه xy و راستای Z (گام عمودی) را بررسی کردند و دریافتند که اگر از سرعت پیشروی ۱۲۰۰ min / min و گام عمودی ۰/۲ mm باعث سطوح خشن‌تری در مقایسه با سرعت پیشروی ۸۴۰۰ min / min می‌شود. کرو و همکارانش [۵۹] نشان دادند که مقدار زبری سطح در جهت پیشروی ابزار کمتر از جهت عمودی آن است که در آزمایش‌های خود مقدار زبری سطح را در جهت پیشروی ابزار ۰/۳ میکرومتر و در جهت عمودی ابزار ۰/۶ میکرومتر اندازه‌گیری کردند. باین حال زبری سطح می‌تواند با کاهش اندازه گام عمودی کاهش یابد.

۳.۶ اندازه گام

اندازه گام عمودی تأثیر قابل توجهی بر روی کیفیت سطح قطعه نهایی دارد. با افزایش گام عمودی کیفیت سطح پایین می‌آید. هاگان و جیسوایت [۶] از اسکن تداخل نور سفید برای بررسی زبری سطح در گام‌های عمودی مختلف در روش ISF استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که یک رابطه نمایی بین گام عمودی و زبری در روش قله و دره وجود دارد که بیشترین ارتفاع قله و دره به صورت نمایی با افزایش اندازه گام عمودی افزایش می‌یابد.

بها تاجاریا و همکارانش [۷] به منظور بررسی اثر متغیرهای فرآیند ISF در سطح پایانی AL5052 آزمایش‌ها تجربی را انجام دادند. نتایج نشان داد با افزایش عمق گام عمودی تا یک حد مشخص کیفیت سطح کاهش پیدا می‌کند و سپس افزایش می‌یابد.

۴.۶ زاویه شکل دهی

هنگامی که زاویه دیواره افزایش پیدا می‌کند باعث افزایش مقدار کشش در دیواره‌ها می‌شود. اگرچه زاویه حد شکل دهی بزرگ ممکن است باعث شکست در قطعه بشود اما با افزایش زاویه حد شکل دهی کیفیت سطح نهایی قطعه بالا می‌رود. در نتیجه در انتخاب زاویه حد شکل دهی باید دقت لازم به عمل آورده شود.

بها تاجاریا و همکارانش [۷] یک مطالعه تجربی به منظور بررسی اثر ISF بر کیفیت سطح ورق AL5052 انجام دادند. آن‌ها دریافته‌اند که با افزایش زاویه دیواره کیفیت سطح بهبود پیدا می‌کند.

آمبرگیو و همکارانش [۶۳] شکل دهی تدریجی گرم را بررسی کردند. آن‌ها آزمایش‌ها خود را بر روی سه آلیاژ سبک انجام دادند که شامل آلومینیوم AA2024_T3 منیزیم A231B و تیتانیوم می‌شود. آن‌ها برای شکل دهی از SPIF و جریان مستقیم استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه شکل دهی کیفیت سطح کم می‌شود.

دالفو و همکارانش [۶۴] زبری سطوح داخلی و خارجی ورق‌های تیتانیوم F6V که برای ساخت ایمپلنت استفاده می‌شود را اندازه‌گیری کردند که زبری سطح در ورق تغییر شکل نیافته ۲ میکرومتر است. با انجام آزمایش‌های تجربی مشخص شد که قسمتی از قطعه که با ابزار شکل دهی در تماس است زبری سطح آن از ۲ میکرومتر به ۵/۱۹۰ میکرومتر افزایش یافته است، اما زبری سطح برای قسمت بیرونی قطعه ۴/۵ میکرومتر است. نتایج نشان می‌دهد که با انجام فرایند شکل دهی تدریجی زبری سطح افزایش پیدا می‌کند.

۷ مکانیزم‌های شکست و تغییر شکل در شکل دهی

تدریجی

راه‌های بسیاری برای پیش‌بینی شروع شکست در ورق‌های فلزی در طول فرآیند شکل دهی وجود دارد از قبیل: دیاگرام حد شکل دهی (FLD)^۱ دیاگرام تنش حد شکل دهی (FLSD)^۲، (MSFLD)^۳ (m-k) با این حال FLD شناخته‌ترین و درست‌ترین راه برای پیش‌بینی شکست در ISF است.

۱.۷ تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی تغییر شکل و مکانیزم‌های شکست

تعدادی از پارامترهای شکل دهی تدریجی بر فرآیند تغییر شکل و نحوه ایجاد شکست در طول انجام شکل دهی مؤثر است که در این بخش این پارامترها بررسی شده‌اند.

۱.۱.۷ تنش و کرنش

در فرآیند شکل دهی تدریجی از تنش سه محوری در مدل شکست به عنوان حالت اندازه‌گیری تنش استفاده می‌شود. کرنش یکی از مهم‌ترین معیارها برای پیش‌بینی شکست در SPIF است. مارتین و همکارانش [۶۵] یک مدل تئوری برای حالت‌های مختلف تغییر شکل و مکانیزم شکست در SPIF را بررسی کردند. مشاهدات تجربی نشان داد که شکست توسط محل گلوبی شدن پیش‌بینی نمی‌شود، بلکه به صورت ترک شروع به پیشرفت می‌کند. مدل‌های آنالیز دیگری در SPIF توسط سیلوا و همکارانش [۶۶] ارائه شد. در این مدل‌ها نشان دادند که ترک در SPIF توسط تنش‌های کششی مرکزی به وجود می‌آید. جکسون و الوود [۶۷] به صورت تجربی به بررسی مکانیزم‌های تغییر شکل در ISF (SPIF, TPIF) و دقت قانون سینوس‌ها برای پیش‌بینی ضخامت دیواره پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که اولاً مکانیزم‌های تغییر شکل برای هر دو فرآیند TPIF و SPIF در ۲ صفحه متفاوت اتفاق می‌افتد. صفحه اولی (z) در جهت عمود بر ابزار و صفحه دومی (xy) موازی جهت ابزار است. در صفحه اول کشش و برش داریم و در صفحه دوم تنها برش داریم؛ و دوماً: درصد بالایی از کشش و برش در جهت ابزار محاسبه می‌شود. دکلتوت و همکارانش [۶۸] کارهای تجربی خود را بر روی سطوح سه بعدی تصاویر دیجیتال انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شکست در حوزه کشش تک محوری اتفاق می‌افتد. فانگ و همکارانش [۶۹] یک مدل تحلیلی برای بررسی مکانیزم‌های شکست در فرایند SPIF پیشنهاد دادند. آن‌ها هر دو اثر خم شدن و کرنش سختی را در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر شکل به طور عمده در جهت شعاعی اتفاق می‌افتد و مقداری کمی از آن در جهت محیطی رخ می‌دهد. این تغییر شکل‌ها علاوه بر منطقه تماس بر روی شیب دیواره هم رخ می‌دهد و شکست همیشه بر روی سطح بیرونی دیواره که نقطه انتقال بین منطقه تماس و غیر تماسی است اتفاق می‌افتد.

۲.۱.۷ تأثیر ابزار شکل دهی بر تغییر شکل و شکست

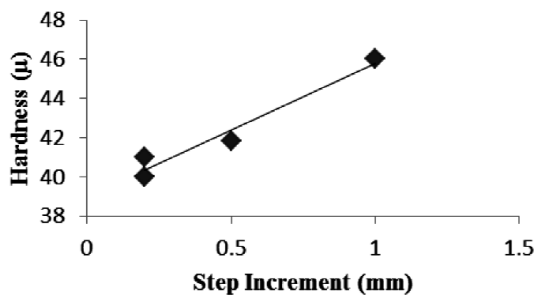
شکست در فرایند شکل دهی تدریجی وابسته به قطر ابزار می‌تواند پیش‌بینی شود. به عنوان مثال در ابزار با قطر بزرگ، مقدار نیروی شکل دهی به علت افزایش مساحت بین ابزار و ورق و بروز درصد بالایی از تنش در این ناحیه افزایش پیدا می‌کند و قطعه دچار شکست می‌شود. مویونگ ساپ و چانگ جین ابزاری را که شامل یک توپ که به صورت آزادانه بر روی ورق می‌چرخد را برای توصیف انعطاف‌پذیری ورق AA1050 انتخاب کردند. نتایج نشان داد که کشش در گوشه‌ها به صورت ۲ محوری است، در حالی که کرنش کششی صفحه‌ای در اطراف ورق خطی است؛ و تغییر شکل در نزدیکی کشش ۲

¹Forming limit diagram ²Forming limit stress diagram ³Müschelborn-Sonne forming limit diagram ⁴marciniak-kuczynski criteria

محوره نسبت به کرنش کششی صفحه‌ای بزرگ‌تر است [۳۴].

۲.۸ رابطه سختی و گام تدریجی

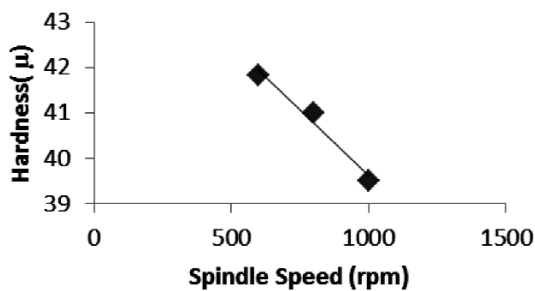
یوتاروار و همکارانش نشان دادند که سختی متناسب با گام عمودی افزایش پیدا می‌کند که این دو پارامتر باهم رابطه مستقیم دارند (شکل ۲۹).



شکل ۲۹: تغییرات سختی با گام افزایشی [۳]

۳.۸ رابطه سختی و سرعت اسپیندل

یوتاروار و همکارانش نشان دادند که سختی رابطه برعکسی با سرعت اسپیندل دارد که با افزایش سرعت اسپیندل سختی کاهش پیدا می‌کند (شکل ۳۰).



شکل ۳۰: تغییرات سختی با سرعت اسپیندل [۳]

۹ فرآیندهای ترکیبی شکل‌دهی تدریجی

بسیاری از تحقیقات انجام شده در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق بر استفاده از ابزار صلب متمرکز شده‌اند. با این وجود، جایگزین‌های دیگری برای ابزار صلب، همچون استفاده از لیزر و جت آب با سرعت بالا و انرژی التراسونیک نیز مطرح شده‌اند.

۱.۹ استفاده از اثر حرارت در شکل‌دهی تدریجی

دوفلو و همکارانش [۵۳] تحقیقاتی به منظور بررسی اثر دما برای شکل‌پذیری مواد در فرآیند شکل‌دهی تدریجی انجام دادند. آن‌ها از سیستم لیزر جهت گرم کردن محل تماس بین ابزار و ورق تیتانیوم Ti AL674 استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که شکل‌پذیری مواد با گرمادهی توسط لیزر افزایش می‌یابد. منیزیم خواص مکانیکی خوبی دارد لذا آزمایش‌های زیادی برای بالا بردن شکل‌پذیری منیزیم انجام شده است. یکی از این آزمایش‌ها توسط روتارو و هینو و همکارانش انجام شده که طی این آزمایش‌ها با گرمادهی موضعی به محل شکل‌دهی شکل‌پذیری ورق را بهبود بخشیدند. در این آزمایش‌ها افزایش در شکل‌پذیری و کاهش تنش پسماند تأیید شده است [۴]. جی و پارک [۷۲] از ورق منیزیم برای شکل‌دهی تدریجی گرم استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که

۳.۱.۷ کاربرد دیاگرام حد شکل‌دهی در پیش‌بینی شکست

منحنی حد شکل‌دهی به صورت گلوبی شدن (FLCN) بیشتر برای پیش‌بینی شکست در فرایندهای سنتی شکل‌دهی استفاده می‌شود. برای پیش‌بینی شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی از منحنی حد شکل‌دهی شکست (FLCF) استفاده می‌شود [۲۷]. معیار شکست نرم اغلب برای فرآیند شکل‌دهی و برای توصیف FLD در شکست استفاده می‌شود. ایده اصلی معیار شکست نرم به این صورت است که شکست زمانی اتفاق می‌افتد که حداکثر خرابی ورق بیش از یک مقدار بحرانی باشد [۷۰].

$$\int_{\epsilon_f} F(\text{process parameters}) dx = CDV \quad (2)$$

در اینجا ϵ_f اثرات کرنش بر شکست است و F عملکرد پارامترهای فرآیند است. بر اساس شکست نرم مارتین و همکارانش [۷۱] تحقیقاتی روی منحنی حد تغییر شکل ورق آلومینیوم AA1050-H111 انجام دادند آن‌ها دریافتند که قطعه شکل‌دهی شده قبل از شکست دچار گلوبی شدن نمی‌شود. ایسکی و همکارانش [۷۶] برای بررسی و تجزیه و تحلیل شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی از مفاهیم پلاستیسیته و مکانیزم شکست نرم و همچنین منحنی FLCF استفاده کردند.

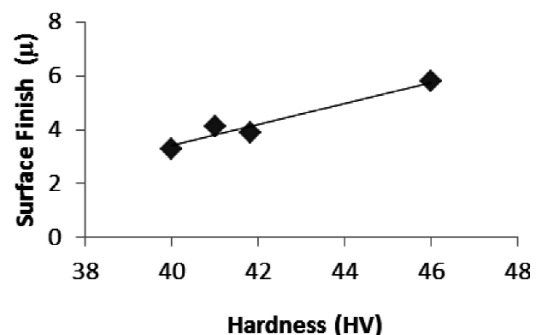
۸ بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر سختی در طول

فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق

یوتاروار و همکارانش [۳] در سال ۲۰۱۶ مطالعات خود را بر روی ورق آلومینیوم AA1100 برای بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی تدریجی بر سختی در طول فرآیند شکل‌دهی ورق انجام دادند.

۱.۸ رابطه سختی با سطح نهایی

یوتاروار و همکارانش نشان دادند که مقدار سختی یک رابطه مستقیمی با سطح نهایی دارد. سختی در نمونه با افزایش کیفیت سطح افزایش پیدا می‌کند (شکل ۲۸).



شکل ۲۸: تغییرات سختی با سطح نهایی [۳]

۲.۹ شکل دهی تدریجی به کمک امواج مافوق صوت

یکی از روش‌های نوین بهبود فرآیندهای شکل دهی استفاده از نوسانات مافوق صوت (آلتراسونیک) است که باعث کاهش اصطکاک و نیروی شکل دهی، بهبود کیفیت سطح و افزایش سرعت فرآیند شده است.

اثر ارتعاشات بر فرآیندهای شکل دهی به دو قسمت اثر سطحی و اثر حجمی تقسیم می‌شود که اثر سطحی مربوط به تأثیر نوسانات بر شرایط اصطکاکی بین سطوح و نیروی اصطکاک و اثر حجمی مربوط به تغییرات خواص مواد و تنش تسلیم در اثر نوسانات مافوق صوت است. به‌طور مثال گزارش شده است که در اثر نوسانات مافوق صوت تنش سیلان در تست کشش کاهش می‌یابد که اثر بلاها نامیده شده است [۷۸].

یافته‌های بلاها و لانگنکر، نشان می‌دهد که تغییر خواص مکانیکی در حین تست کشش با تحریک اولتراسونیک، به علت فعال‌سازی نابجایی‌ها است. به‌گونه‌ای که ارتعاش اولتراسونیک ترجیحاً در مواضع نابجایی‌ها جذب می‌شود و با فعال‌سازی آن‌ها، نیروهای شکل دهی کاهش می‌یابد [۷۹].

گرنیز آزمایش‌هایی بر روی مواد با جنس‌های مختلف برای مطالعه تأثیر به‌کارگیری انرژی اولتراسونیک در حین تغییر شکل، انجام داد که در طی آن تأثیرات نرم شدگی صوتی جنس ماده مشاهده شد و نتیجه گرفت که کاهش استحکام تسلیم، متناسب با شدت انرژی اولتراسونیک مورد استفاده است. جیما و همکارانش آزمایش‌هایی بر روی فرآیندهای کشش عمیق به کمک اولتراسونیک انجام دادند و دریافتند که انرژی اولتراسونیک نه تنها باعث کاهش نیروی کشش می‌شود، بلکه نسبت حد کشش را افزایش می‌دهد تسوجینو و همکاران گزارش دادند که در فرآیند خم‌کاری به کمک اولتراسونیک، به‌کارگیری ابزار و قالب مرتعش موجب کاهش برگشت فتری، افزایش زاویه خم و کاهش زبری سطح نمونه می‌شود. وحدتی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ روند طراحی، ساخت و تست ابزار شکل دهی مرتعش برای اولین بار در حوزه‌ی فرآیند شکل دهی تدریجی ورق فلزی، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در مقاله خود تأثیر مثبت ارتعاش اولتراسونیک بر رفتار نیرو اعمالی به ابزار شکل دهی و پدیده برگشت فتری را بررسی کردند و دریافتند که مقادیر مؤلفه عمودی نیروی شکل دهی تحت تأثیر ارتعاش اولتراسونیک، کاهش می‌یابد. مقایسه ضرایب برگشت فتری نمونه‌های شکل دهی شده در ۲ وضعیت بدون اعمال تنش و با اعمال تنش نشان داد که میزان برگشت فتری نمونه تحت تأثیر ارتعاش اولتراسونیک کاهش می‌یابد [۷۹].

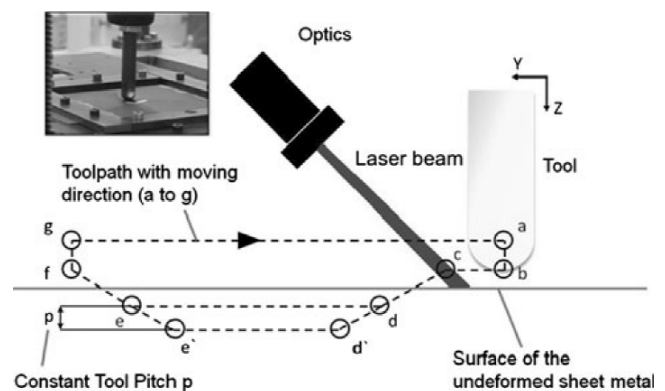
محمودی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به بررسی اثر استفاده از نوسانات مافوق صوت (فرکانس بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز) بر نیروی شکل دهی در فرآیند شکل دهی افزایشی به‌صورت تحلیلی و تجربی پرداختند. برای این منظور ابتدا فرآیند شکل دهی افزایشی مورد مطالعه قرار گرفته و اصول آن بررسی شده و روابط تحلیلی نیرو در حالت بدون اعمال نوسانات آلتراسونیک اصلاح و استخراج شده است. آن‌ها دریافتند که اعمال نوسانات آلتراسونیک به فرآیند شکل دهی افزایشی باعث کاهش زیاد نیروی شکل دهی می‌شود که با توجه به شرایط انجام آزمون‌ها این کاهش به‌طور میانگین ۵۰ درصد و در بهترین حالت ۶۳/۵ درصد است [۷۸].

بنابراین کاهش استحکام تسلیم و نرم شدگی صوتی جنس ماده، کاهش

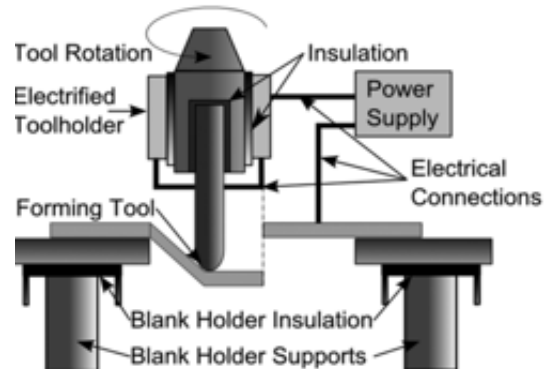
با افزایش دما از ۲۰ به ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد شکل‌پذیری ورق افزایش پیدا می‌کند. فان و همکارانش [۷۳] استفاده از جریان الکتریکی برای شکل دهی تدریجی گرم ورق‌های فلزی را پیشنهاد دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش جریان الکتریکی شکل‌پذیری ورق افزایش پیدا می‌کند اما استحکام تسلیم بین منطقه تماس ابزار و بلانک کاهش می‌یابد. با این وجود باعث افزایش زاویه حد شکل دهی آلیاژ منیزیم AZ31 می‌شود.

لیو و همکارانش [۷۴] از یک ابزار شکل دهی همراه با کانال‌های خنک‌کاری برای شکل دهی تدریجی ورق تیتانیوم TI6AL47 و بهبود شکل‌پذیری برای مواد سخت شکل‌پذیر استفاده کردند. گوتمن [۷۵] از طراحی مکانیزم جدیدی برای استفاده از لیزر در فرآیند شکل دهی تدریجی استفاده کرد (شکل ۳۱).

موسکر [۷۶] تحقیقات خود را در مورد اثر دما بر تغییرات میکرو ساختار قطعه کار در زمان تغییر شکل انجام داد. او دریافت که تغییر شکل مواد سخت شکل‌پذیر در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد بدون استفاده از خنک‌کاری باعث افزایش شکل‌پذیری ورق می‌شود. آدامز و جسیویت [۷۷] از یک مکانیزم در ابزار شکل دهی تدریجی برای بهبود شکل‌پذیری ورق آلومینیوم 6061-T6 استفاده کردند. در این مکانیزم تنظیم بیشترین زاویه دیواره توسط تنظیم جریان و قطر ابزار امکان‌پذیر است. آن‌ها دریافتند که شکل‌پذیری با چگالی جریان مشابه و قطرهای متفاوت افزایش می‌یابد، در این مکانیزم چگالی جریان نسبت به مقدار جریان یک عامل مهم بشمار می‌آید (شکل ۳۲).

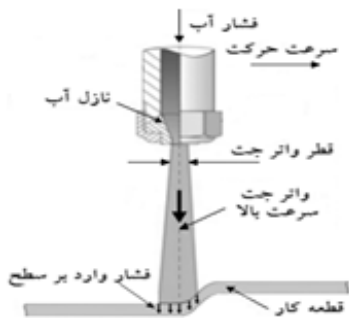


شکل ۳۱: تنظیم تجربی لیزر نقطه‌ای، ابزار شکل دهی برای فرآیند تغییر شکل [۷۵]

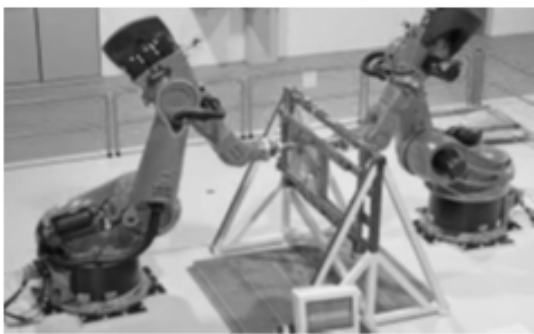


شکل ۳۲: مکانیزم استفاده از جریان الکتریکی در شکل دهی تدریجی [۷۷]

کردند. با انجام فرآیند شکل دهی تدریجی به صورت دومرحله‌ای شکل پذیری افزایش پیدا کرد، اما سبب کمتر شدن نازک شدگی نشد و تنها محل نازک شدگی را در یک مخروط با زاویه دیواره ۷۰ درجه را تغییر داد. دوفلو و همکارانش SPIF پنج مرحله‌ای را بررسی کردند آن‌ها شکل‌های میانی را به صورت افزایش زاویه دیواره به میزان ۱۰ درجه در هر مرحله در نظر گرفتند. آن‌ها استفاده از چند مرحله شکل دادن در مقایسه با شکل دهی تدریجی یک مرحله‌ای را به عنوان راه‌کاری برای به تأخیر انداختن نازک شدگی زودهنگام معرفی کردند. یکی از عیوب این استراتژی برآمدگی کف ظرف است (شکل ۳۵). کیتازاوا چهار نوع استراتژی چندمرحله‌ای برای فرم دهی مرحله‌ای، جهت شکل دهی یک برآمدگی گنبدی شکل و مقایسه توزیع ضخامت ورق را معرفی کرده است. اسکجودت و همکاران به صورت تجربی و عددی تأثیر جهت حرکت ابزار بین مراحل متوالی در شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای را بر توزیع کرنش و توزیع ضخامت محصول نهایی بررسی کردند. آن‌ها ساخت یک ظرف استوانه‌ای در پنج مرحله را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که جهت حرکت ابزار پارامتر تأثیرگذاری است [۳۲].



شکل ۳۳: جت آب به عنوان ابزار اصلی WJISMF [۳۲]



شکل ۳۴: فرآیند شکل دهی تدریجی به کمک ربات [۸۱]



شکل ۳۵: تغییر در کیفیت قطعه در شکل دهی تدریجی چندمرحله‌ای نسبت به یک مرحله‌ای. اما مشکل وجود برآمدگی در کف ظرف [۳۲]

نیروی اصطکاک، کاهش نیروی شکل دهی و بهبود مشخصه‌های کیفی نمونه شکل دهی شده را می‌توان به عنوان بخشی از تأثیرات مثبت اعمال ارتعاش اولتراسونیک در فرآیندهای گوناگون شکل دهی نام برد [۷۹].

۳.۹ شکل دهی تدریجی به کمک جت آب

شکل دهی تدریجی به کمک جت آب (WJSPIF)^۱ توسط ایسکی معرفی شد. در این روش به جای استفاده از یک ابزار صلب از جریان جت آب برای انجام فرآیند شکل دهی تدریجی استفاده می‌شود. در این روش از طریق نیروی فشار آب شکل دهی تدریجی ورق صورت می‌پذیرد. در سال ۲۰۰۵ جورسویک و همکارانش [۸۰] بررسی‌های خود را روی امکان تبدیل ماشین جت آب با ذرات ساییده به ماشین WJISMF انجام دادند.

جورسویک مقالات خود شکل دهی تدریجی ورق و WJISMF را باهم مقایسه کرده و مزیت‌ها و مشکلات استفاده از جت آب به عنوان ابزار اصلی شکل دهی بجای ابزار صلب را نشان داده است. او دریافت که انعطاف پذیری فرآیند، بی‌عیبی سطح قطعه کار، احتیاجات ابزاری، هزینه‌های تجهیزات و اثرات محیطی در مورد WJISMF بسیار مطلوب‌تر است. از طرف دیگر، دقت شکل دهی، زمان و انرژی مصرفی در مورد شکل دهی تدریجی ورق بهتر است. پتک [۴۶] در مقاله‌ای در سال ۲۰۰۹ به مقایسه‌ی شکل دهی تدریجی با ابزار صلب و شکل دهی تدریجی با جت آب پرداخت و پارامترهای مختلف در آن‌ها را بررسی کرد. از جمله نتایج به دست آمده در این تحقیق تجربی این بود که زاویه حد شکل دهی در فرآیند شکل دهی تدریجی به کمک جت آب به گام افقی و میزان فشار در ورودی نازل جت آب وابسته است. مکانیزم عمل شکل دهی به کمک جت آب در شکل ۳۳ آورده شده است.

۴.۹ شکل دهی تدریجی به کمک ربات

یکی از فناوری‌های نوین و بسیار کاربردی، ترکیب شکل دهی تدریجی دونقطه با ربات به صورت دوطرفه است. این فرآیند از سرعت و دقت بسیار بالاتری نسبت به سایر روش‌های شکل دهی تدریجی برخوردار است به طوری که می‌توان گفت این نوع شکل دهی تدریجی ترکیبی از شکل دهی تدریجی نقطه‌ای، مثبت و منفی است (شکل ۳۴).

۱۰ بررسی شکل دهی تدریجی چندمرحله‌ای

از محدودیت‌های موجود در SPIF می‌توان به مدت زمان به نسبت بالای انجام فرآیند، نازک شدگی زیاد و دقت ابعادی پایین اشاره نمود. یکی از استراتژی‌های تغییر شکل مؤثر به کارگیری شکل دهی تدریجی چندمرحله‌ای است که خود تابعی از تعداد مراحل و شکل قطعه در هر مرحله است. یانگ و کیم [۲۸] در سال ۲۰۰۰، توزیع ضخامت را برای اشکال غیرمقارن به دست آوردند. سپس یک فرآیند دومرحله‌ای را معرفی نمودند که در آن مناطقی که در مرحله اول کمتر تغییر شکل پیدا می‌کنند در مرحله دوم دچار تغییر شکل زیادی می‌شوند. آن‌ها نشان دادند که با فرآیند دومرحله‌ای به جای یک مرحله توزیع ضخامت بهتر شده و باعث افزایش شکل پذیری ورق می‌شود. یانگ و جسویت [۸۲] به صورت تجربی SPIF 2 مرحله‌ای یک مخروط را بررسی

¹water jet incremental sheet metal forming

۱۱ نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری به بررسی تأثیر پارامترهای شکل‌دهی بر مقدار شکل‌پذیری فرایند شکل‌دهی تدریجی پرداخته شده است. در ادامه اثر ترکیب شکل‌دهی تدریجی با سایر فرایندهای تولیدی از جمله لیزر، جت آب، ربایتیک و التراسونیک بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده از این مقاله در زیر آمده است:

- نتایج بررسی اثر ضخامت ورق نشان داد که ضخامت ورق بر اساس نوع جنس ماده انتخاب می‌شود؛ اما نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ورق شکل‌پذیری افزایش پیدا می‌کند.
- اثر نوع و قطر ابزار در این مقاله بررسی شد. از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که با کاهش قطر ابزار تا یک حد بهینه‌ای شکل‌پذیری افزایش پیدا کرده است؛ اما برای تأثیر نوع شکل ابزار بر مقدار شکل‌پذیری هنوز به تحقیقات بیشتری در این زمینه نیاز است.
- با بررسی اثر گام عمودی در مقاله‌های مختلف مشخص شد که با کاهش گام عمودی شکل‌پذیری افزایش پیدا می‌کند، اما از مشکلاتی که با کاهش گام عمودی به وجود می‌آید افزایش زمان فرایند تولید است.
- سرعت دورانی و پیشروی برای ابزار شکل‌دهی هر ۲ باید یک مقدار بهینه‌ای داشته باشد که این مقدار به جنس ماده، قطر ابزار و اصطکاک بین ابزار و ورق بستگی دارد. در مورد اثر سرعت پیشروی محققین همگی به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت پیشروی باعث کاهش در مقدار شکل‌پذیری ورق می‌شود؛ اما برای سرعت دورانی ابزار مقدار بهینه‌ای در نظر گرفته شده است.
- استفاده از مایع روان کننده در فرایند شکل‌دهی تدریجی باعث بالا رفتن کیفیت سطح قطعه می‌شود، اما با حذف اصطکاک بین ابزار و ورق و کاهش حرارت در منطقه شکل‌دهی باعث کاهش شکل‌پذیری در فرایند می‌شود.
- با بررسی تأثیر مسیر ابزار بر فرایند شکل‌دهی تدریجی مشخص شد که حرکت ابزار با مسیر مارپیچ باعث یکنواخت شدن توزیع ضخامت، بالا رفتن کیفیت سطح و کمتر شدن نیروهای وارده به ابزار می‌شود.
- نتایج به‌دست‌آمده از ترکیب فرایند شکل‌دهی تدریجی با سایر فرایندهای تولیدی مشخص شد که استفاده هم‌زمان از انرژی لیزر یا جریان الکتریکی با فرایند شکل‌دهی تدریجی باعث افزایش حرارت در منطقه شکل‌دهی شده و افزایش شکل‌پذیری را منجر می‌شود.

مراجع

- Springer India 2015 R.G. Narayanan and U.S. Dixit (eds.), *Advances in Material Forming and Joining*, pp. 29–47, 2015.
- [5] D. H. Nimbalkar and V. M. Nandedkar, Review of Incremental Forming of Sheet Metal Components, *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, no. 5, pp. 39–51, 2013.
- [6] E. Hagan and J. Jeswiet, Analysis of surface roughness for parts formed by computer numerical controlled incremental forming, *Journal of Engineering Manufacture*, 2004.
- [7] F. C. Minutolo, M. Durante, A. Formisano, and A. Langella, Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process, vol. 194, pp. 145–150, 2007.
- [8] V. R. N. C. J. Bhattacharya A, Maneesh K, Formability and surface finish studies in single point incremental forming, *J Manuf Sci Eng* 133(6)061020, 2011, pp. 583–590, 2011.
- [9] R. Crina, DETERMINATION OF THE MAXIMUM FORMING ANGLE OF SOME CARBON STEEL METAL SHEETS, vol. 17, no. 3, pp. 71–74, 2011.
- [10] S. B. M. Echraf and M. Hrairi, Research and Progress in Incremental Sheet Forming Processes, no. June 2013, pp. 37–41, 2011.
- [11] P. A. F. Martins, L. Kwiatkowski, V. Franzen, A. E. Tekkaya, and M. Kleiner, Single point incremental forming of polymers, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 229–232, 2009.
- [12] V. S. Le, A. Ghiotti, and G. Lucchetta, Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials, *Int J Mater*, vol. 1, pp. 1179–1182, 2008.
- [13] M. Skjoedt, M. H. Hancock, and N. Bay, Creating Helical Tool Paths for Single Point Incremental Forming, *Key Engineering Materials*, vol. 344, no. August 2016, pp. 583–590, 2007.
- [14] A. Zahedi, B. Mollaei-dariani, and M. R. Morovvati, Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals, vol. 14, no. 14, pp. 1–8, 2014.
- [15] M. Azaouzi and N. Lebaal, Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 24, pp. 49–58, 2012.
- [16] Z. Liu, Y. Li, and P. A. Meehan, Experimental Investigation of Mechanical Properties, Formability and Force Measurement for AA7075-O Aluminum Alloy Sheets Formed by Incremental Forming, vol. 14, no. 11, pp. 1891–1899, 2013.
- [17] M. Yamashita, M. Gotoh, and S. Atsumi, Numerical simulation of incremental forming of sheet metal, vol. 9, pp. 163–172, 2007.
- [18] M. Ham and J. Jeswiet, Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003, vol. 55, no. 1, 2006.
- [19] S. P. Shanmuganatan and V. S. S. Kumar, Metallurgical analysis and finite element modelling for thinning characteristics of profile forming on circular cup, *Materials and Design*, vol. 44, pp. 208–215, 2013.
- [1] P. Roux, *MACHINES FOR SHAPING SHEET METAL*, 1960.
- [2] E. Leszak, *APPARATUS AND PROCESS FOR INCREMENTAL DIELESS FORMING*, pp. 6–8, 1967.
- [3] P. B. Uttarwar and S. K. Raini, Study of Effect of Process Parameters on Hardness during Incremental Sheet Metal Forming, vol. 6, no. 4, pp. 3799–3802, 2016.
- [4] Y. Kumar and S. Kumar, *Incremental Sheet Forming (ISF)*,

- [35] Y. . H. Kim and J. . J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 130-131, no. 3, pp. 42-46, 2002.
- [36] G. Hussain, L. Gao, and Z. Y. Zhang, Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 37, pp. 920-926, 2008.
- [37] K. R. and C. Chungchoo, Formability in Single Point Incremental Forming of Dome Geometry, *AIJSTPME*, No. 2, pp. 57-63, 2009, 2009.
- [38] G. Hussain, L. Gao, N. Hayat, and N. U. Dar, The formability of annealed and pre-aged AA-2024 sheets in single-point incremental forming, pp. 543-549, 2010.
- [39] D. Xu, W. Wu, R. Malhotra, J. Chen, B. Lu, and J. Cao, Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 73, pp. 37-46, 2013.
- [40] G. Buffa, D. Campanella, and L. Fratini, On the improvement of material formability in SPIF operation through tool stirring action, pp. 1343-1351, 2013.
- [41] M. A. Davarpanah, A. Mirkouei, X. Yu, R. Malhotra, and S. Pilla, Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 222, pp. 287-300, 2015.
- [42] M. Durante, A. Formisano, and A. Langella, Observations on the Influence of Tool-Sheet Contact Conditions on an Incremental Forming Process, vol. 20, no. August, pp. 941-946, 2011.
- [43] G. Centeno, I. Bagudanch, A. J. Martínez-donaire, M. L. García-romeu, and C. Vallellano, Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming, *JOURNAL OF MATERIALS & DESIGN*, vol. 63, pp. 20-29, 2014.
- [44] M. Strano, Technological Representation of Forming Limits, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 7, no. 2, pp. 122-129, 2005.
- [45] J. R. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert, and H. De Baeremaeker, Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement, vol. 56, no. 2, pp. 273-276, 2007.
- [46] J. Petek, A., Kuzman, K., Kopac, Deformations and Forces Analysis of Single Point Incremental Sheet Metal Forming, *Archives of Materials science and Engineering*, 35/2: 35-42. URL, 2009.
- [47] G. L. MancoG. Ambrogio, Influence of thickness on formability in 6082-T6, *International Journal of Material Forming*, pp. 1-24, 2010.
- [48] Hosein mohamadi najafabadi.ali asghar atai, numerical and experimental investigation of incremental sheet metal forming parameters and multi-objective optimization using neural-genetic algorithm, vol. 14, no. 2, 2014.
- [49] M. B. Silva, L. M. Alves, and P. A. F. Martins, Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation, *European Journal of Mechanics / A Solids*, vol. 29, no. 4, pp. 557-566, 2010.
- [20] S. Golabi and H. Khazaali, Determining frustum depth of 304 stainless steel plates with various diameters and thicknesses by incremental forming †, vol. 28, no. 8, pp. 3273-3278, 2014.
- [21] M. Ham and J. Jeswiet, Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming, no. 1, pp. 5-8, 2007.
- [22] N. Hussain, G., Khan, H.R., Gao, L., Hayat, Guidelines for Tool-Size Selection for Single-Point Incremental Forming of an Aerospace Alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 28, no. 3, 2013.
- [23] V. Franzen, L. Kwiatkowski, P. A. F. Martins, and A. E. Tekkaya, Single point incremental forming of PVC, vol. 9, pp. 462-469, 2008.
- [24] .J.Bagudanch Ciurana, Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 219, pp. 221-229, 2015.
- [25] B. Lu et al., Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 85, pp. 14-29, 2014.
- [26] G. Ambrogio, L. Filice, and F. Micari, A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, pp. 413-416, 2006.
- [27] J. Câmara, Single Point Incremental Forming, pp. 1-10, 2009.
- [28] T. Kim and D. . Yang, Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 42, no. 7, pp. 1271-1286, 2000.
- [29] X. Ziran, L. Gao, G. Hussain, and Z. Cui, The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming, pp. 1113-1118, 2010.
- [30] T. McAnulty, J. Jeswiet, and M. Doolan, Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016.
- [31] L. I. Jun-chao, L. I. Chong, and Z. Tong-gui, Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 22, pp. s54-s60, 2012.
- [32] M. J. Mirnia and B. M. Dariani, An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet, *mme.modares.ac.ir*, vol. 14, no. 14, pp. 262-270, 2015.
- [33] Z. Z. Hussain G, Gao L, Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process, *Int J Adv Manuf Technol* 37:920-926, 2008.
- [34] S. G. H. O. GrahamMcCartney, Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming, *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-016-8426-6, 2016.

- [66] M. B. Silva, M. Skjoedt, P. A. F. Martins, and N. Bay, Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis, vol. 48, pp. 73–83, 2008.
- [67] K. Jackson and J. Allwood, The mechanics of incremental sheet forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 3, pp. 1158–1174, 2009.
- [68] N. Decultot, L. Robert, V. Velay, and G. Bernhart, Single point incremental sheet forming investigated by in-process 3D digital image correlation, vol. 11001, pp. 1–8, 2010.
- [69] Y. Fang, B. Lu, J. Chen, D. K. Xu, and H. Ou, Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, pp. 1503–1515, 2014.
- [70] H. Nam and K. Kim, A ductile fracture criterion in sheet metal forming process, vol. 142, pp. 231–238, 2003.
- [71] M. B. Silva, M. Skjoedt, A. G. Atkins, N. Bay, and P. A. F. Martins, Single-point incremental forming and formability–failure diagrams, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2008.
- [72] Y. H. Ji and J. J. Park, Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature, *Journal of Materials Processing Technology* 2011 (2008) 354–358, vol. 1, pp. 354–358, 2008.
- [73] G. Fan, L. Gao, G. Hussain, and Z. Wu, Electric hot incremental forming: A novel technique, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 48, pp. 1688–1692, 2008.
- [74] R. Liu, B. Lu, D. Xu, J. Chen, F. Chen, and H. Ou, Development of novel tools for electricity-assisted incremental sheet forming of titanium alloy, *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-015-8011-4, 2015.
- [75] A. Göttmann et al., Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts, *Production Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 263–271, 2011.
- [76] L. Mosecker, A. Göttmann, A. Saeed-akbari, W. Bleck, M. Bambach, and G. Hirt, Deformation mechanisms of Ti6Al4V sheet material during the incremental sheet forming with laser heating, *Key Engineering Materials* Vol. 549 (2013) pp 372-380, vol. 549, pp. 372–380, 2013.
- [77] D. Adams, J. Jeswiet, D. Adams, and J. Jeswiet, Single-point incremental forming of 6061-T6 using electrically assisted forming methods, of *Engineering Manufacture forming methods*, 2014.
- [78] M. M. Abbas Pak, Hamed Deilami Azodi, Investigation of Ultrasonic assisted incremental sheet metal forming process, *mme.modares.ac.ir*, vol. 14, no. 11, pp. 106–114, 2014.
- [79] R. M. Mehdi Vahdati, Design and manufacture of vibratory forming tool to develop ‘ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming’ process, vol. 14, no. 11, pp. 68–76, 2014.
- [80] B. Jurisevic, Water jetting technology: an alternative in incremental sheet metal forming, *Int J Adv Manuf Technol* (2006) 31: 18–23 DOI 10.1007/s00170-005-0176-9, pp. 18–23, 2006.
- [50] N. Hussain, G., Gao, L., Hayat, Forming Parameters and Forming Defects in Incremental Forming of an Aluminum Sheet, *Materials and Manufacturing Processes*, 2011.
- [51] G. Ambrogio and F. Gagliardi, Temperature variation during high speed incremental forming on different lightweight alloys, pp. 1819–1825, 2015.
- [52] S. Dejardin, S. Thibaud, J. C. Gelin, and G. Michel, Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 2, pp. 363–369, 2010.
- [53] Z. Fu, J. Mo, F. Han, and P. Gong, Tool path correction algorithm for single-point incremental forming of sheet metal, pp. 1239–1248, 2013.
- [54] B. O. Oleksik V, Pascu A, Deac C, Fleaca R, RomanM, The Influence of Geometrical Parameters on the Incremental Forming Process for Knee Implants Analyzed by Numerical Simulation, *NUMIFORM 2010:1208–1215*, 2010.
- [55] H. Mehdi V, Mohammad S, An analytical model to reduce spring-back in incremental sheet metal forming (ISMF) process, *Adv Mater Res* 83–86:1113–1120, 2010.
- [56] J. Li, P. Geng, and J. Shen, Numerical simulation and experimental investigation of multistage incremental sheet forming, pp. 2637–2644, 2013.
- [57] M. Pohlak, R. Küttner, J. Majak, K. Karjust, and A. Sutt, Experimental study of incremental forming of sheet metal products, in *Proc of the fourth International DAAAM Conference*, Tallinn, Estonia, 2004, vol. 2, no. April, pp. 139–142.
- [58] P. J. Silva, L. M. Leodido, and C. R. M. Silva, Analysis of incremental sheet forming parameters and tools aimed at rapid prototyping, in *Key Engineering Materials*, 2013, vol. 554, pp. 2285–2292.
- [59] I. Cerro, E. Maidagan, J. Arana, A. Rivero, and P. P. Rodr, Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process, vol. 177, pp. 404–408, 2006.
- [60] M. Ham, B. M. Powers, and J. Loisel, Surface Topography from Single Point Incremental Forming using an Acetal Tool, vol. 549, pp. 84–91, 2013.
- [61] B. Lu et al., Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool, vol. 85, pp. 14–29, 2014.
- [62] B. Lu, J. Chen, H. Ou, and J. Cao, Feature-based tool path generation approach for incremental sheet forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 1221–1233, 2013.
- [63] G. Ambrogio, L. Filice, and F. Gagliardi, Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming, *Materials and Design*, vol. 34, pp. 501–508, 2012.
- [64] A. Daleffe, L. Schaeffer, D. Fritzen, and J. Castelan, Analysis of the Incremental Forming of Titanium F67 Grade 2 Sheet, *Eng Mater* 554–557:195–203, vol. 557, pp. 195–203, 2013.
- [65] P. A. F. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, and M. B. Silva, Theory of single point incremental forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 247–252, 2008.

- [81] D. Kreimeier, B. Buff, C. Magnus, V. Smukala, and J. Zhu, Robot-Based Incremental Sheet Metal Forming – Increasing the Geometrical Accuracy of Complex Parts, vol. 473, pp. 853–860, 2011.
- [82] D. Young and J. Jeswiet, Wall thickness variations in single-point incremental forming, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 218, No. 11, vol. 218, pp. 1453–1459, 2004.