بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه ساخت و تولید

پایان‌نامه

به منظور اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک–ساخت و تولید

عنوان:

فرآیند شکل دهی نموی به کمک ارتعاش اولتراسونیک بر روی ورق آلومینیوم

استاد راهنما:

دکتر سعید امینی

توسط:

احمد حسین پور گللو

شهریور ماه *1393*

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم:

ای پدر، اکنون حاصل دستان خسته ات رمز موفقیتم شد.

و تو ای مادر، ای شوق زیبایی نفس کشیدن، ای روح مهربان، هستی ام

تو رنگ شادی هایم شدی و مشکلات را با تمام وجود از من دور کردی و

عمری خستگی ها را به جان خریدی تا اکنون توانستی طعم خوش

پیروزی را به من بچشانی.

تقدیم به برادرم:

که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بود و تکیه گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودش مایه دلگرمی من می باشد.

و تقدیم به خواهرم:

که وجودش شادی بخش و صفایش مایه آرامش من است.

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خداوند سبحان را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود.

انجام این پژوهش، بی‌شک دشواری‌ها و سختی‌های بسیاری به همراه داشته است که بدون همکاری و همیاری استادان و دوستان که اینجانب را قرین محبت و الطاف بی‌شائبه خود قرار داده‌اند، به ثمر نمی‌رسید. لذا بر خود می‌دانم از این عزیزان تشکر و قدردانی نمایم.

- از استاد ارجمند، جناب آقای دکتر **سعید امینی**، استاد راهنمای بنده تشکر و قدردانی می کنم.
- از اساتید محترم آقایان دکتر **سعیدگلابی** و دکتر **محمد هنرپیشه** کمال تشکر را دارم که این پایان نامه را داوری کردند.
- از آقای مهندس علیرضا صالحی به خاطر کمک ها و راهنمایی های فکری مفید و کارامد در ساخت تجهیزات آزمایش ها سپاسگزاری می کنم.
- از جناب آقای مهندس کریم نژاد، کارشناس کارگاه ماشین‌افزار، به خاطر حمایت‌ها و زحماتشان، کمال تشکر را دارم.

چکیده:

هدف اصلی این تحقیق، مطالعهٔ تأثیر ارتعاش اولتراسونیک با مود طولی بر روی فرآیند شکل دهی نموی است. فرآیند شکل دهی نموی ورق فلزی در مجموعه روش های نمونه سازی سریع از جذابیت، انعطاف پذیری، صرفه اقتصادی و تنوع هندسی بالایی در مراحل طراحی، ساخت و تولید برخوردار می باشد. در این فرآیند، ابزار سر کروی یا سر نیمکروی مطابق با مسیر تعریف شده در کنترلر ماشین فرز CNC، تغییر شکل پیوسته و موضعی بر روی ورق کلمپ شده اعمال می نماید و آن را به تدریج شکل می دهد. از سوی دیگر به کارگیری ارتعاش اولتراسونیک در سایر فرآیند های شکل دهی ورق همچون: کشش عمیق و شکل دهی چرخشی، نتایج و تأثیرات مثبت اعمال ارتعاش اولتراسونیک در جهت افزایش قابلیت شکل پذیری ورق، کاهش نیروی مصرفی، افزایش دقت ابعادی و هندسی نمونه شکل دهی شده را تأیید می نماید. در این تحقیق، ایده و روش به کار گیری و اعمال ارتعاش اولتراسونیک در فرآیند شکل دهی نموی تک نقطه ورق فلزی برای اولین بار در حوزه ISMF[1] ارائه می شود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که: اعمال ارتعاش اولتراسونیک با مود طولی در فرآیند شکل دهی نموی تک نقطه ای، باعث کاهش قابل توجه نیروی شکل دهی و اصطکاک بین ابزار و ورق گردیده و همچنین قابلیت شکل پذیری ورق فلزی نیز افزایش می یابد. زبری سطح ورق در شرایط حضور ارتعاش اولتراسونیک نیز کاهش یافته و بهبود صافی سطح حاصل شده است. به طور متوسط اعمال ارتعاش اولتراسونیک مود طولی در فرآیند شکل دهی نموی تک نقطه ای، مقدار عمق شکل دهی شده پس از برداشت فشار ابزار از روی ورق را به میزان قابل توجهی نسبت به شرایط بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک افزایش داده و این موضوی برای کنترل برگشت فنری به ویژه در قطعاتی که تغییر شکل اندکی یافته اند، غالباً با اهمیت می باشد.

کلمات کلیدی: شکل دهی نموی، ارتعاش اولتراسونیک، ماشین فرزCNC، ورق آلومینیوم

[1] Incremental Sheet Metal Forming

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۱

۱-۱- تاریخچه و پیشینه پژوهش..... ۲

۱-۲- پیشینه کاربرد ارتعاشات اولتراسونیک در فرآیند های شکل دهی..... ۱۵

۱-۳- بیان مسئله پژوهشی ۱۸

۱-٤- ساختار پایان نامه..... ۱۹

۲- مبانی و تئوری فرآیند شکل دهی نموی..... ۲۱

۲-۱- نمونه سازی سریع..... ۲۲

۲-۲- شکل دهی نموی ۲۵

۲-۲-۱- شکل دهی نموی متقارن ورق فلزی ۲۶

۲-۲-۱-۱- اسپینینگ در مقابل شکل دهی برشی..... ۲۷

۲-۲-۲- شکل دهی نموی نامتقارن ورق فلزی ۲۸

۲-۲-۲-۱- شکل دهی نموی منفی..... ۳۰

۲-۲-۲-۲- شکل دهی نموی مثبت ۳۳

۲-۳- پدیده برگشت فنری ۳۵

۲-٤- حدود شکل دادن ۳۷

۳-آماده سازی فرآیند ۳۹

۳-۱-طراحی مفهومی سیستم آزمایشگاهی و روش اعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار شکل دهی..... ۴۰

۳-۱-۱- اجزای اصلی مکانیزم ۴۲

۳-۱-۱-۱- گیربکس متعامد ۴۲

۳-۱-۱-۲- صفحه اصلی..... ۴۴

۳-۱-۱-۳- مجموعه ترانسدیوسر دورانی ۴۴

۳-۱-۱-٤- اجزای سیستم اتصال جریان الکتریکی ترانسدیوسر از نوع دورانی با ژنرااتور ۴۷

۳-۲-طراحی و ساخت نگهدارنده ورق ۵۰

۳-۳-آنالیز ارتعاشی، طراحی و ساخت ابزار شکل دهی نموی تک نقطه ای..... ۵۲

۳-۳-۱- انتخاب فرکانس ۵۳

۳-۳-۲- انتخاب جنس ماده ابزار ۵۳

۳-۳-۳- محاسبه طول موج ۵۵
۳-۳-۴- محاسبه تئوریک ابعاد ابزار ۵۶
۳-۳-۵- تحلیل مودال ۵۸
۳-۳-۶- ساخت، تست و تنظیم فرکانس ابزار ۶۰
۳-٤-آماده سازی ورق خام آزمایش ۶۴
۳-۴-۱- ایجاد طرح شبکه بندی شده ورق ۶۶
۳-٥- تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش ها ۶۷
۳-۵-۱- دستگاه فرز cnc ۶۷
۳-۵-۲- دستگاه دینامومتر ۶۸
۳-۵-۳- مجموعه پیزودرایور ۷۰
۳-۵-۴- منبع تغذیه یا ژنراتور ۷۱
۳-۵-۵- ساعت اندازه گیری دیجیتالی ۷۲
۳-۵-۶- دستگاه اندازه گیری تصویری vmm ۷۲
۳-۵-۷- دستگاه زبری سنج ۷۴
۳-۵-۸- دستگاه کانتورگراف ۷۴
۳-۵-۹- روانکار ۷۵
۳-٦- تنظیم تجهیزات آزمایش ۷۶
۳-۶-۱- مکانیزم کله گی مجهز به هد اولتراسونیک دورانی ۷۶
۳-۶-۲- دستگاه دینامومتر به همراه نگهدارنده ورق فلزی ۷۸
۳-۶-۳- اندازه گیری دامنه ارتعاش ابزار شکل دهی ۷۹
٤- انجام آزمایش ها و نتایج ۸۳
٤-۱- پیشگفتار ۸۴
٤-۲- آزمایش شیار مستقیم ۸۴
۴-۲-۱- آزمایش شیار مستقیم(ورق معمولی) ۸۶
٤-۲-۱-۱- بررسی زبری سطح ۸۹
۴-۲-۲- آزمایش شیار مستقیم(ورق شبکه بندی شده) ۹۱
٤-۲-۲-۱- بررسی نیروی عمودی ابزار شکل دهی نموی(FZ) آزمایش شیار مستقیم ۹۲
٤-۲-۲-۲- بررسی مقادیر کرنش و قابلیت شکل پذیری آزمایش شیار مستقیم ۹۳
٤-۲-۲-۳- بررسی میزان برگشت فنری در آزمایش شیار مستقیم ۹۸

۴-۲-۳- آزمایش شیار مستقیم(آزمایش مقایسه ای) ۱۰۰
٤-۲-۳-۱- بررسی نیروی حاصل از نفوذ ابزار ارتعاشی(Fz) ۱۰۱
٤-۲-۳-۲- بررسی نیروی حاصل از پیشروی ابزار ارتعاشی(Fy) ۱۰۲
٤-۲-۳-۳- بررسی میزان برگشت فنری در آزمایش شیار مستقیم (آزمایش مقایسه ای) ۱۰۳
٤-۲-۳-٤- توپوگرافی سطح محل تماس اصطکاک ابزار ارتعاشی و ورق ۱۰۵
٤-۳- آزمایش هرم ناقص ۱۰۶
۴-۳-۱- بررسی نیروی عمودی ابزار شکل دهی نموی ۱۰۹
۴-۳-۲- بررسی نیروهای پیشروی ابزار شکل دهی نموی ۱۱۰
۴-۳-۳- بررسی مقادیر کرنش و قابلیت شکل پذیری آزمایش هرم ناقص ۱۱۲
۴-۳-۴- بررسی زبری سطح آزمایش هرم ناقص ۱۱۶

۵- دستیابی به مدل تحلیلی عمق شکل دهی در آزمون هرم ناقص با حضور ارتعاش اولتراسونیک ۱۱۹

٥-۱- پیشگفتار ۱۲۰
٥-۲- اصول و روش تحلیل آماری ۱۲۰
۵-۲-۱- انتخاب عوامل و سطوح ۱۲۳
۵-۲-۲- انتخاب متغیر پاسخ ۱۲۴
۵-۲-۳- انتخاب طرح آزمایش ۱۲۴
۵-۲-۴- انجام آزمایش ۱۲۶
۵-۲-۵- تجزیه و تحلیل داده ها ۱۳۰
۵-۲-۶- نتیجه گیری ۱۳۳

٦- جمع بندی و پیشنهاد ها ١٤٠

٦-۱- نتایج پژوهش ۱۴۱
٦-۲- پیشنهادها ۱۴۲

مراجع ١٤٣

فهرست شکل ها

شکل ۲-۱: اسپینینگ معمولی مخروط ناقص با انجام شکل دهی در چند مرحله[۱] ۲۶

شکل ۲-۲: فرآیند شکل دهی برشی [۱]..... ۲۷

شکل۲-۳: فرآیند شکل دهی نموی منفی[۲] ۳۰

شکل۲-۴: اجزای اصلی مورد نیاز برای شکل دهی نموی منفی ورق (SPIF)[۲] ۳۲

شکل ۲-۵: فرآیند شکل دهی نموی مثبت[۲]..... ۳۳

شکل ۲-۶: نمای شماتیک برای تحلیل اثر نیروها در شکل دهی ورق فلزی در آزمون شیار مستقیم[۴۹] ۳۶

شکل ۲-۷: نمودار حد شکل دهی در شکل دهی معمولی و شکل دهی نموی[۱۷]..... ۳۸

شکل ۳-۱- تصویر شماتیک فرآیند شکل دهی نموی به کمک ارتعاش اولتراسونیک ۴۱

شکل ۳-۲: تصویر شماتیک مکانیزم کله گی ماشین فرز CNC مجهز به ترانسدیوسر دورانی ۴۲

شکل ۳-۳: گیربکس متعامد با چرخدنده های مخروطی مارپیچ ۴۳

شکل ۳-۴: الف)تصویر بوش خاردار به همراه شافت رابط. ب) تصویر مونتاژ بوش خاردار بر روی گیربکس متعامد ۴۳

شکل ۳-۵: صفحه اصلی ۴۴

شکل ۳-۶: تصویر کامل ترانسدیوسر دورانی ۴۵

شکل ۳-۷: الف) سیستم مونتاژ ترانسدیوسر دورانی. ب) تصویر کامل ترانسدیوسر دورانی ۴۵

شکل ۳-۸: تصویرشماتیک اجزای مونتاژی ترانسدیوسر ثابت با مود طولی ۴۶

شکل ۳-۹: سیستم تنظیم، موقعیت دهی و گیره بندی ترانسدیوسر ثابت بر روی پوستهٔ آن ۴۷

شکل ۳-۱۰: کلکتور ۴۸

شکل ۳-۱۱: رینگ لغزشی و چگونگی نصب آن بر روی ترانسدیوسر دورانی ۴۹

شکل ۳-۱۲: (الف)تصویردمونتاژحوزینگ ها بر روی ترانسدیوسر (ب) تصویر مونتاژ حوزینگ ها بر روی ترانسدیوسر ۴۹

شکل ۳-۱۳: مونتاژ کامل سیستم ابزار ارتعاشی دورانی در فرآیند شکل دهی نموی ۵۰

شکل ۳-۱۴: (الف) فیکسچر ورق برای آزمایش شیار مستفیم در فرآیند شکل دهی نموی.(ب) فیکسچر ورق برای آزمایش هرم نافص در فرآیند شکل دهی نموی ۵۱

شکل ۳-۱۵: سه نوع متداول از متمرکز کننده ها ۵۷

شکل ۳-۱۶: طراحی ابزار سرنیمکروی مرتعش (D=10 MM) ۵۷

شکل ۳-۱۷: ابزار مش زنی شده (D=10 MM) ۵۸

شکل ۳-۱۸: نتایج تحلیل مودال ابزار (D=10 MM) ۵۹

شکل ۳-۱۹: ساخت ابزار شکل دهی (D=10 MM) ۶۰

شکل ۳-۲۰: نصب و مونتاژ ابزار بر روی سیستم انتقال ارتعاش ۶۰

شکل ۳-۲۱: طراحی ابزار سرنیمکروی مرتعش ۶۲

شکل ۳-۲۲: ابزار مش زنی شده ۶۳

شکل ۳-۲۳: نتایج تحلیل مودال ابزار (تک فرکانس) ۶۳

شکل ۳-۲۴: ساخت ابزار شکل دهی ۶۴

شکل ۳-۲۵: آماده سازی نمونه های تست کشش و نحوه انجام آزمایش کشش ۶۵

شکل ۳-۲۶: نمودار تنش-کرنش ورق آلومینیوم آنیل شده AL1050-O برای نمونه با زاویه صفر درجه نسبت به جهت نورد آن ۶۵

شکل ۳-۲۷: نمودار تنش-کرنش ورق آلومینیوم آنیل شده AL1050-O برای نمونه با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد آن ۶۶

شکل ۳-۲۸: نمودار تنش-کرنش ورق آلومینیوم آنیل شده AL1050-O برای نمونه با زاویه ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد آن ۶۶

شکل ۳-۲۹: الف) ورق آلومینیوم شبکه بندی شده ب) ابعاد شبکه های آن ۶۷

شکل ۳-۳۰: دستگاه فرز CNC به همراه مکانیزم هد اولتراسونیک دورانی نصب شده بر روی کله گی آن ۶۸

شکل ۳-۳۱: موقعیت قرارگیری دینامومتر در سیستم آزمایشگاهی شکل دهی نموی به همراه ارتعاش اولتراسونیک ۶۹

شکل ۳-۳۲: تجهیزات اصلی دستگاه دینامومتر مدل KISTLER 9257B ۶۹

شکل ۳-۳۳: مجموعه پیزودرایور مدلPZD700A DUAL CHANNEL ۷۰

شکل ۳-۳۴: ژنراتور KING ULTRASONIC با فرکانس ثابت 20KHZ ۷۱

شکل ۳-۳۵: ساعت دیجیتالی میکرونی ماهر آلمان مدل MARCATOR 1087 ..... ۷۲

شکل ۳-۳۶: دستگاه اندازه گیری تصویری VMM مدل EASSON C-3020..... ۷۳

شکل ۳-۳۷: دستگاه زیری سنج مدل MARSURF PS1..... ۷۴

شکل ۳-۳۸: دستگاه کانتورگراف مدل PERTHOMETER PCV ساخت شرکتMAHR آلمان ۷۵

شکل ۳-۳۹: تغییرات نیرو با استفاده از انواع مختلف روانکار ها برای قطعه مخروطی با زاویه دیواره°60 با استفاده از ورقAL3103-O با ضخامت 0.85MM [۶]..... ۷۶

شکل ۴-۱: آماده سازی فرآیند ۸۱

شکل ۴-۲: اندازه گیری دامنه ارتعاش ابزار شکل دهی ۸۳

شکل ۴-۳: انجام آزمایش شیار مستقیم بر روی ورق AL1050-O فرآیند شکل دهی نموی ۸۶

شکل ۴-۴: کانتور مسیر ابزار انجام شده در آزمایش شیار مستقیم..... ۸۷

شکل ۴-۵: نمونه های شکل دهی شده آزمون شیار مستقیم ۸۹

شکل ۴-۶: اندازه گیری زبری سطح نمونه شکل دهی شده ۹۰

شکل ۴-۷: نمودار مقایسه ای پارامترهای زبری سطح..... ۹۱

شکل ۴-۸: نمودار نیروی آزمایش شیار مستقیم ورق معمولی(1-0) در راستای ابزار ارتعاشی ۹۲

شکل ۴-۹: مقایسه نمودار نیروی محوریFZ برای تست شیار مستقیم ورق آلومینیوم آنیل شده O-1050 شبکه بندی شده در دوشرایط با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک..... ۹۳

شکل ۴-۱۰: شبکه های تغییر شکل یافته در نمونه های آزمایش شیار مستقیم ورق آلومینیوم آنیل شدهO-1050..... ۹۵

شکل ۴-۱۱: دستگاه اندازه‌گیری تصویری VMM تنظیم شده جهت اندازه گیری تغییر شکل نسبی نمونه های آزمایش شیار مستقیم ۹۶

شکل ۴-۱۲: تغییر شکل نسبی اندازه گیری شده نمونه آزمایش شیار مستقیم ۹۶

شکل ۴-۱۳: مقایسه نمودار حد شکل دهی نمونه های آزمایش شیار مستقیم در شرایط با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک ۹۷

شکل ۴-۱۴: نحوه داده برداری و استخراج نمونه های آزمون شیار مستقیم ۹۹

شکل ۴-۱۵: مقایسه نموداری عمق شکل دهی شده با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک ۱۰۱

شکل ۴-۱۶: مقایسه نموداری نیروی نفوذ ابزار ارتعاشی(FZ) در طرح آزمایش شیار مستقیم ۱۰۳

شکل ۴-۱۷: مقایسه نیروی پیشروی ابزار ارتعاشی(FY) در طرح آزمایش شیار مستقیم ۱۰۴

شکل ۴-۱۸: مقایسه نموداری عمق شکل دهی شده طرح آزمایش مقایسه فاکتورهای روانکار و ارتعاش اولتراسونیک ۱۰۵

شکل ۴-۱۹: تصاویر توپوگرافی سطح طرح آزمایش مقایسه ای شیار مستقیم ۱۰۶

شکل ۴-۲۰: آزمایش شکل دهی نموی هرم ناقص ۱۰۸

شکل ۴-۲۱: کانتور مسیر ابزار پله‌ای هرم ناقص ۱۰۹

شکل ۴-۲۲: مقایسه نیروی محوری FZ برای آزمایش هرم ناقص ورق آلومینیوم آنیل شده O-1050 شبکه بندی شده در دوشرایط با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک ۱۱۰

شکل ۴-۲۳: مقایسه نیروی پیشروی FX برای آزمایش هرم ناقص ورق آلومینیوم آنیل شده O-1050 شبکه بندی شده در دوشرایط با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک ۱۱۱

شکل ۴-۲۴: مقایسه نیروی پیشروی FY برای آزمایش هرم ناقص ورق آلومینیوم آنیل شده O-1050 شبکه بندی شده در دوشرایط با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک ۱۱۱

شکل ۴-۲۵: شماتیک رفتار نیروی پیشروی F(Y) در آزمایش هرم ناقص برای فرآیند شکل دهی نموی ۱۱۲

شکل ۴-۲۶: نمای شماتیک از پشت نمونه هرم ناقص ۱۱۳

شکل ۴-۲۷: نمونه های شکل دهی نموی آزمایش هرم ناقص (الف): بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک (ب): با اعمال ارتعاش اولتراسونیک

..... ۱۱۴

شکل ۴-۲۸: دستگاه اندازه‌گیری تصویری VMM تنظیم شده جهت اندازه گیری تغییر شکل نسبی نمونه های آزمایش هرم ناقص ۱۱۵

شکل ۴-۲۹: مقایسه نمودار حد شکل دهی ضلع شماره(۱) در شرایط با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک، آزمایش هرم ناقص ۱۱۶

شکل ۴-۳۰: مقایسه نمودار حد شکل دهی ضلع شماره(۲) در شرایط با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک، آزمایش هرم ناقص ۱۱۶

شکل ۴-۳۱: مقایسه نمودار حد شکل دهی ضلع شماره(۳) در شرایط با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک، آزمایش هرم ناقص ۱۱۷

شکل ۴-۳۲: دستگاه زبری سنج و نحوه استخراج داده ها ۱۱۸

شکل ۴-۳۳: مقایسه نموداری زبری سطح آزمایش هرم ناقص ۱۱۹

شکل ۵-۱: مدل کلی فرآیند یا سیستم[۵۰] ۱۲۲

شکل ۵-۲: دیاگرام فرآیند تجزیه و تحلیل آماری ۱۲۴

شکل ۵-۳: ورق شکل دهی شده با طرح آزمایش شماره۳۴ و زاویه دیواره ۴۰ درجه ۱۲۸

شکل ۵-۴: ورق شکل دهی شده با طرح آزمایش شماره ۴۳ و زاویه دیواره ۵۰ درجه ۱۲۸

شکل ۵-۵: ورق شکل دهی شده با طرح آزمایش شماره ۳۰ و زاویه دیواره ۶۰ درجه ۱۲۸

شکل ۵-۶: نحوه داده برداری و استخراج داده های نمونه های طرح آزمایش هرم ناقص ۱۲۹

شکل ۵-۷: ضرایب تعیین شده برای مدل به صورت واحد های کد گذاری شده ۱۳۲

شکل ۵-۸: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای اندازه گام عمودیV و قطر ابزار ارتعاشیD ۱۳۵

شکل ۵-۹: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای اندازه گام عمودیV و ضخامت ورقT ۱۳۵

شکل ۵-۱۰: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای ضخامت ورقT و قطر ابزار ارتعاشیD ۱۳۶

شکل ۵-۱۱: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای قطر ابزار ارتعاشیD و سرعت پیشرویF ۱۳۶

شکل ۵-۱۲: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای زاویه دیواره ورقØ و سرعت پیشرویF ۱۳۷

شکل ۵-۱۳: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای ضخامت ورقT و سرعت پیشرویF ۱۳۷

شکل ۵-۱۴: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای اندازه گام عمودیV و سرعت پیشرویF ۱۳۸

شکل ۵-۱۵: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای قطر ابزار ارتعاشیD و زاویه دیواره ورقØ ۱۳۸

شکل ۵-۱۶: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای ضخامت ورقT و زاویه دیواره ورقØ ۱۳۹

شکل ۵-۱۷: نمودار سطحی و دو بعدی عمق شکل دهیH AVE برای پارامترهای اندازه گام عمودیV و زاویه دیواره ورقØ ۱۴۰

فهرست جدول ها

جدول ۲-۱: مقایسه بین روش های نمونه سازی سریع قطعات در صنعت[۴۵].....۲۴

جدول ۳-۱: ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن گرید 316 .....۵۴

جدول ۳-۲: خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن گرید 316.....۵۴

جدول ۳-۳: خواص فیزیکی فولاد زنگ نزن گرید 316 .....۵۴

جدول ۳-۴: پارامترهای ابزار ارتعاشی ۵۵

جدول ۳-۵: خواص فیزیکی و مکانیکی جنس ابزار ۵۸

جدول ۳-۶: نتایج تست فرکانس طبیعی ابزار توسط پیزودرایور مدل PZD700A ۶۱

جدول ۴-۱: نتایج تست فرکانس طبیعی ابزارها توسط پیزودرایور مدل PZD700A.....۷۹

جدول ۴-۲: مقایسه فرکانس های طبیعی تحلیلی و تجربی ۸۰

جدول ۴-۳: مقایسه فرکانس اِعمالی و فرکانس های طبیعی تجربی ۸۰

جدول ۴-۴: ترکیب پارامتر های ورودی آزمایش شیار مستقیم (ورق معمولی).....۸۷

جدول ۴-۵: عمق نهایی شکست در آزمون شیار مستقیم ۸۸

جدول ۴-۶: مقایسه بَصَری سطوح پشت نمونه های شکل دهی شده در آزمون شیار مستقیم.....۸۹

جدول ۴-۷: نتایج اندازه گیری پارامترهای زبری سطح نمونه های شکل دهی شده ۹۰

جدول ۴-۸: تأثیر ارتعاش اولتراسونیک در کاهش نیروی محوری(FZ) ۹۴

جدول ۴-۹: درصد تأثیر ارتعاش اولتراسونیک در افزایش قابلیت شکل پذیری شکل دهی نموی برای آزمایش شیار مستقیم ورق آلومینیوم آنیل شده1050-O.....۹۸

جدول ۴-۱۰: مقادیر عمق شکل دهی شده با اعمال ارتعاش اولتراسونیک و بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک..... ۱۰۰

جدول ۴-۱۱: پارامترهای آزمون مقایسه ای شیار مستقیم ۱۰۱

جدول ۴-۱۲: طرح آزمایش بررسی تأثیر همزمان عوامل ارتعاش اولتراسونیک و روانکار در آزمایش شیار مستقیم ۱۰۲

جدول ۴-۱۳: مقادیر عمق شکل دهی شده آزمایش مقایسه فاکتورهای روانکار و ارتعاش اولتراسونیک ۱۰۵

جدول ۴-۱۴: پارامتر های ورودی آزمایش هرم ناقص ۱۰۹

جدول ۴-۱۵: معدل زبری سطح آزمایش هرم ناقص ۱۱۸

جدول ۵-۱: عوامل مؤثر بر میزان برگشت فنری و دامنه تغییرات آن ها ۱۲۵

جدول ۵-۲: طرح آزمایش BOX-BEHNKEN در آزمایش هرم ناقص فرآیند شکل دهی نموی با حضور ارتعاش اولتراسونیک..... ۱۲۶

جدول ۵-۳: مقادیر عددی عمق اندازه گیری شده طرح آزمایش BOX-BEHNKEN در آزمایش هرم ناقص فرآیند شکل دهی نموی با حضور ارتعاش اولتراسونیک ۱۳۰

فصل اول

مقدمه

فرآیند شکل دهی نموی ورق به عنوان یک فناوری نوین در مجموعه روش های نمونه سازی سریع در سطح دنیا شناخته شده و در سال های اخیر توسعه داده شده است. در این فرآیند، ابزاری سرکروی یا نیمکروی بر اساس مسیر تعریف شده توسط کدهای موجود در کنترلر ماشینCNC، تغییر شکل پیوسته و موضعی بر روی ورق فلزی اعمال می کند. از مزایای عمده این روش می توان به قابلیت شکل پذیری بالای ورق اشاره نمود که دستیابی به عمق های بیشتر شکل دهی را امکان پذیر می سازد. در مقابل از مهمترین مشکلات این فرآیند زمان بالای شکل دهی آن می باشد که آن را در تولید سری های کوچک از قطعات محدود نموده و از جمله دلایل آن، محدودیت در قابلیت شکل پذیری ورق های فلزی و وجود اصطکاک و نیروی موضعی زیاد بین ابزار و ورق شکل دهی را می توان عنوان نمود[۱]. فواید مختلف ارتعاش اولتراسونیک بر روی فرآیند های فرم دهی فلزات نظیر: کشش سیم، اکستروژن، نوردکاری، میکرواکستروژن، هیدروفرمینگ و اسپینینگ که توسط محققان گزارش داده شده است[۲]. با توجه به تأثیرات مثبت ارتعاش اولتراسونیک در تحقیقات انجام شده، از این رو اهداف تحقیق بر اساس مطالعه و بررسی تأثیر ارتعاش اولتراسونیک بر روی فرآیند شکل دهی نموی بنا نهاده شده است. مطالعات انجام شده شامل طراحی، ساخت تجهیزات آزمایش، طراحی آزمایش، اجرای آزمایش های تجربی، تجزیه و تحلیل آماری نتایج تجربی می باشد که در فصل های آتی ارائه خواهند شد.

۱-۱- تاریخچه و پیشینه پژوهش

روش های جدید فرم دهی ورق های فلزی وجود دارد که در یک مرحله، امکان تولید قطعات مرسوم یا تولید انبوه در ابعاد کوچک با زمان برگشت خیلی کوتاه تا ساخت را حاصل

می کنند. اسکموکل[1] [۳]در سال ۱۹۹۱ پیش بینی کرده است که با افزایش در اتوماسیون تجهیزات فرم دهی ورق، فرآیند انعطاف پذیر می شود که در این تحقیق اتفاق افتاده است.

ایدهٔ شکل دهی تدریجی ورق فلزی با یک ابزار تک نقطه ای را فرم دهی بدون قالب نامیده‌اند که توسط لیزاک[2] [٤] ابداء گردید. آزمایش های مختلفی وجود دارد که به مطالعات کنونی کمک می کند[۵-۱۰]. امروزه فرآیندهای جدیدی وجود دارند که به موجب آنها تغییر شکل پلاستیک ورق فلزی در یک نقطه امکان پذیر شده است که به درستی تولید انعطاف پذیر قطعات ورق فلزی پیچیده حاصل شده است. این فرآیند می تواند در تولید سری های کوچک یا در تولید سریع نمونه های اولیه در یک روز بکار برود.

فرآیندهای جدید، جذاب هستند، زیرا ساخت ورق فلزی می تواند توسط هر میزان مهارت با داشتن یک ماشین فرز cnc [3] سه محور قابل انجام است[۱].

الهام گرفتن برای پدیدار شدن فرآیندها، معمولاً بر اساس روش های فرم دهی سنتی صورت می گیرد. فرآیندهای متداول نوعاً اجباری هستند. تا آنجا که هندسهٔ قطعات قابل دست یافتن باشد و ابزار و قالب های اختصاصی شده لازم باشند. سخت افزار و نرم افزارcnc به یک شرایط ارتقاء رسیده اند که این توسعه، توسعهٔ فرآیندهای نوین شکل دهی ورق فلزی را امکان پذیر کرده است[۱].

روش های شکل دهی نوین این امکان را می دهند تا وسایل فرم دهی انعطاف پذیر بدون قالب، توانایی تولید سطوح اشکال پیچیده ایجاد بشود، در حالی که یک ابزار عمومی بکار برده می شود. هدف نهایی، فرم دهی بدون قالب است[۱].

اسپینینگ طلایه دار شکل دهی نموی نامتقارن ورق فلزی می باشد به عبارتی دیگر فرم دهی تدریجی نامتقارن ورق فلزی توسعه یافته فرآیند اسپینینگ می باشد. جس ویت[4] و

[1] Schmoeckel
[2] Leszak
[3] Computer Numerical Control
[4] Jeswiet

هاگان[1] [۱۱] یک تکنولوژی جدید برای پیدایش تعدادی از فرآیندهای فرم دهی ورق فلزی نوظهور که پیدایش همه آنها از درون فرآیند اسپینینگ بوده و همه آنها دارای پتانسیل کاربردهایی نظیر ساخت سریع نمونه اولیه با ورق فلزی می باشند را مطرح کردند.

دای[2] و همکارانش [۱۲]، با در نظر گرفتن هندسه قوس[3] به عنوان نمونه مورد مطالعه، شکل دهی قطعه متقارن محوری را آنالیز کردند و تکنیک کنترل جریان فلز به منظور دستیابی به بیشترین تغییر شکل را مورد بررسی قرار دادند. اجرای آنالیز، ساختار تئوریکی مورد نیاز جهت انتخاب مکان هندسی مناسب برای شکل دهی را فراهم نمود. نتایج به دست آمده از تحقیقات این گروه به صورت زیر می باشد:

- فرآیند شکل دهی نموی، توانایی کنترل رفتار نقطه به نقطه فلز در یک ورق را داشته و دامنه تنظیم پذیری وسیعی دارد. انتخاب یک موقعیت دلخواه برای شروع فرآیند شکل دهی بر روی ورق، باعث پدید آمدن کرنش های متفاوتی در سطح ورق خواهد شد.
- رابطه ترسیمی میان فلز در نمونه ای با توزیع یکنواخت کرنش و نمونه تغییر شکل نیافته توسط معادلات ریاضی ارائه شد.
- در این فرآیند، اصول بهینه سازی مکان هندسی به منظور شکل دهی، بدین صورت است که ابتدا ناحیه ای که دارای سفتی[4] کمتر است و تغییر شکل به آسانی اعمال نمی شود، تحت بارگذاری قرار می گیرد. همچنین مراحل بارگذاری مستقیم بر روی ناحیه‌ی مرزی کاهش داده می شود، چرا که دارای سفتی بالاتری بوده و به آسانی پدیده شکست رخ می دهد.

جس ویت[5] [۱۳]، به تشریح فرآیند شکل دهی نموی منفی پرداخته است. در این تحقیق ثابت شد که تغییر شکل در این فرآیند می تواند به دو روش اعمال شود:

---

[1] Hagan
[2] Dai
[3] Arc
[4] Stiffness
[5] Jeswiet