ISME

تاثیر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی افزایشی بر نیرو و زمان در ورق سه لایه Al-Cu-Al

محمد هنرپیشه[۱]
استادیار

علی عرشی[۲]
دانشجوی کارشناسی ارشد

احمد قیصریان[۳]
دانشجوی دکترا

هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر پارامترهای شکل‌دهی افزایشی بر نیرو و زمان شکل‌دهی ورق‌های فلزی چند لایه می‌باشد. به منظور دستیابی به این هدف، یک نمونه ورق فلزی متشکل از سه لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم به روش جوش انفجاری تولید شد. سپس با استفاده از از روش آماری رویه پاسخ (RSM)، آزمایشات شکل‌دهی (ناشی از اثر متغیرهای تحقیق) انجام شد. با استفاده از ضرایب تخمینی مدل آماری، ارتباط میان متغیر پاسخ و هر یک از متغیرهای ورودی آزمایش بدست آمد. سرانجام این مدل با انتخاب مناسب فاکتورهای تحقیق، محدوده بهینه‌ای از عوامل تاثیرگذار را پیش بینی نمود.

واژه های راهنما: شکل‌دهی افزایشی، ورق جوش انفجاری شده آلومینیوم-مس-آلومینیوم، پارامترهای شکل-دهی، روش آماری رویه پاسخ

۱- مقدمه

شکل‌دهی افزایشی ورق های چندلایه، از فرآیندهای نوین شکل‌دهی محسوب می‌شود که به کمک یک ابزار ساده و ماشین کنترل عددی، ورق چندلایه شکل داده می شود. حسن فناوری های نوین شکل دهی، قابلیت تولید اشکال متقارن به هزینه اندک و بدون نیاز به قالب‌های گران قیمت می‌باشد [۱].

یکی از روش های اتصال مواد هم جنس و غیر هم جنس فرایند جوشکاری انفجاری می‌باشد [۲]. در این فرایند دو یا چند صفحه با فاصله توقف و زاویه استقرار مناسب نسبت به یکدیگر قرار گرفته و با سرعت بالایی که محصول انرژی آزاد شده یک ماده منفجره است، به یکدیگر برخورد می‌کنند و اتصال برقرار می‌شود. در این روش فلزات در ناحیه واسط بین خودشان با تشکیل یک موج و یا موج و گردابه، در هم فرو می‌روند. در حین اتصال تغییر شکل پلاستیک شدید و فشار زیاد باعث تشکیل جتی از بین صفحات به سمت بیرون می شود که با خود ناخالصی‌ها و اکسیدها را به سمت بیرون پرتاب می‌کند و یک فصل مشترک تمیز و اتصالی با کیفیت مناسب ایجاد می‌کند [۳].

---

[۱] نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان honarpishe@kashanu.ac.ir
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جاسب، جاسب ali_arshi58@yahoo.com
[۳] دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان ahmad.gheysarian@gmail.com
تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۰۷

پیرامون تاثیر پارامترهای شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی افزایشی ورق مطالعاتی انجام گرفته است. حاسین و همکارانش، به بررسی شکل پذیری ورق خالص تیتانیوم در فرآیند شکل دهی افزایشی پرداختند. در این مطالعه با تغیر در گام، پیشروی و قطر ابزار، میزان شکل پذیری و سایش ابزار مقایسه گردید.
نتایج نشان داد که شکل پذیری با افزایش گام به صورت خطی کاهش می‌یابد [۴].
نتایج میرنیا و ملائی در بررسی فرآیند شکل دهی افزایشی نشان داد که با افزایش گام عمودی و ضخامت ورق، نیروهای شکل دهی افزایش می‌یابند [۵]. لیو و همکارانش، به بهینه سازی فرآیند شکل دهی افزایشی جهت بهبود در زمان، با استفاده از روش تاگوچی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مهمترین پارامتر تاثیر گذار در زمان فرایند، گام عمودی می‌باشد که به دنبال نرخ تغذیه است و ضخامت ورق و قطر ابزار تاثیر کمی در زمان عملیات دارند [۶]. نتایج تحقیقات همیلتون و همکارانش در بررسی فرایند شکل دهی نموی با سرعت های پیشروی بالا روی ورق Al3003 مشخص نمود که پیشروی تاثیر چندانی بر توزیع ضخامت ورق ندارد [۷]. همچنین آزمایشات قاسمی و همکارانش، در مطالعه برخی پارامترهای موثر بر روی تغییر ضخامت قطعه شکل یافته و نیروها در فرآیند شکل دهی تدریجی نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی، نیروی عمودی کاهش می یابد و بیان کردند که شکل پذیری وابسته به سرعت پیشروی ابزار می‌باشد [۸]. شانموگانتان وهمکارانش، به بهینه سازی این فرآیند با استفاده از روش پاسخ دهی سطح روی آلومینیوم ۱۲۰۰ پرداختند و نتیجه گرفتند که ضخامت متوسط جام استوانه ای شکل با کاهش قطر، افزایش می یابد و افزایش پیشروی و افزایش گام عمودی نیز همین اثر را دارند [۹]. هنرپیشه و همکارانش، به شکل دهی افزایشی گرم ورق تیتانیوم توسط تجهیزات الکتریکی پرداختند [۱۰]. در زمینه‌ی شکل‌دهی افزایشی ورقهای چندلایه، قیصریان و هنرپیشه [۱۲، ۱۱] به بررسی پارامترهای شکل‌دهی افزایشی در ورقهای دو لایه جوش انفجاری شده مس/آلومینیوم پرداختند. انجام فرایندهای ثانویه بر روی ورقهای جوش انفجاری شده از جمله مواردی است که مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. مطالعه اثرات نورد بر روی ورقهایی جوش انفجاری شده فولاد-آلومینیوم [۱۳] و آلومینیوم- مس [۱۴] از جمله اقداماتی است که در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. البته شکل دهی ورق های دو جنسی در فرایندهای کشش عمیق سابقه کافی در تحقیقات داشته است لیکن به علت تاثیر غالب جنس ورق بر یکنواختی شکل حاصل از فرایند شکل دهی افزایشی، این فرایند بر روی ورق های دو جنسی چندان مورد آزمایش قرار نگرفته است.

در این تحقیق یک ورق سه لایه شامل صفحات آلومینیوم (Al۱۰۵۰)، مس (Cu۱۴) و آلومینیوم (Al۱۰۵۰) که به روش جوش انفجاری به یکدیگر متصل شده‌اند تهیه گردید و سپس به انجام تست های تجربی روی این ورق ها در فرآیند شکل دهی افزایشی پرداخته می شود و تاثیر پارامترهای قطر ابزار، گام عمودی، سرعت دورانی اسپیندل و سرعت پیشروی ماشین بر روی میزان نیرو و زمان شکل دهی مورد بررسی قرار می گیرد. نیرو و زمان عملیات شکل دهی افزایشی بر روی ورق های سه لایه به کمک دستگاه دینامومتر اندازه گیری شد. بدین منظور، با روش رویه پاسخ، طراحی آزمایشات ناشی از تاثیر متغیرهای قطر ابزار، گام عمودی، سرعت دورانی اسپیندل و سرعت پیشروی ماشین مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

در این مطالعه از ورق‌های آلومینیوم (Al۱۰۵۰) در لایه رویی و زیرین و ورق مس (Cu۱۴) در لایه میانی به ترتیب با ضخامت ۱ و ۰/۸ میلیمتر در اتصال به روش جوشکاری انفجاری و با چیدمان موازی استفاده شده است. جهت انجام جوشکاری، ابتدا صفحه آلومینیومی زیرین به عنوان صفحه ساکن بر روی بلوک بتنی گذاشته شده و سپس صفحه مسی به عنوان صفحه میانی و با فاصله توقف برابر با ضخامت لایه پرنده و توسط پایه‌های چوبی بر روی صفحه ساکن قرار داده شد. در آخر صفحه آلومینیومی رویی به عنوان صفحه پرنده و به صورت آرایش موازی بر روی صفحات دیگر قرار گرفت و مواد منفجره پس از آماده سازی و توزین، در داخل جعبه‌ای از جنس چوب کاملا خشک ریخته شده و سپس روی صفحه پرنده قرار گرفته است.

در آزمایش جوش انفجاری انجام شده در این تحقیق از پودر آماتول با ترکیب شیمیایی ۹۲٪ درصد وزنی نیترات آمونیوم به همراه ۶٪ درصد وزنی گازوئیل و با چگالی ۰/۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب و با سرعت انفجاری متوسط ۲۵۰۰ متر بر ثانیه استفاده شده است. همچنین جهت آغاز و اطمینان از عملیات انفجار، از چاشنی C۴ استفاده گردیده است. به منظور مطالعه تاثیر پارامترهای شکل‌دهی بر میزان نیرو و زمان عملیات شکل دهی افزایشی ورق‌های جوش انفجاری، نمونه ها با ابعاد ۱۷۰×۱۷۰ میلیمتر از ورق آلومینیوم/ مس/ آلومینیوم تهیه گردید و عملیات حرارتی نمونه‌ها داخل کوره با تلرانس دمایی $\pm 5^{\circ}C$ به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد صورت گرفت.

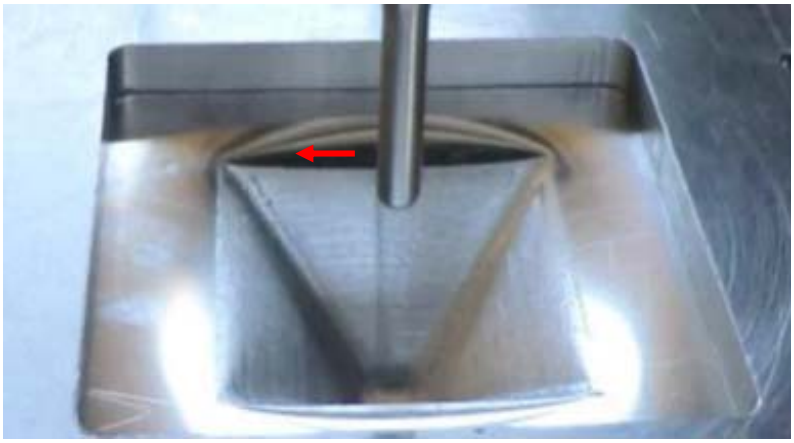
جهت بررسی تاثیر پارامترهای قطر ابزار، گام عمودی، سرعت دورانی اسپیندل و سرعت پیشروی از یک دستگاه فرز CNC[1] سه محوره با کنترلر زیمنس[2] مدل802C با یکسری تجهیزات اضافی شامل ورق گیر (فیکسچر) و ابزار شکل دهی استفاده گردید. بدین ترتیب که نمونه ها جهت قرار گرفتن در قالب شکل دهی افزایشی، ابتدا سوراخ کاری و سپس آماده قرار گرفتن در قالب می شوند. ابعاد دهانه فیکسچر ۱۶۰×۱۶۰ میلیمتر بودند. جهت انجام و القای حرکت به ابزار فرم دهی، در مسیر مشخص شده بر روی ورق سه لایه و نهایتا شکل‌دهی آن حرکت مورد نظر توسط برنامه گرفته شده از نرم افزار پاورمیل[3] ایجاد می گردد و توسط نرم افزار سیمکو به کنترلر دستگاه CNC منتقل می گردد.

شکل (۱) نمای کلی از نحوه حرکت میله ابزار ماشین فرز CNC بر روی ورق را نشان می‌دهد. استفاده از مایع روانکار به منظور بهبود صافی سطح، افزایش حد شکل پذیری و به طور خاص کاهش اصطکاک بین ورق و ابزار بسیار ضروری می باشد. با حرکت ابزار دستگاه فرز CNC بر روی قطعه ورق سه لایه، عملیات شکل دهی افزایشی با هندسه هرمی شکل انجام می شود که ابعاد دهانه ۷۲ در ۷۲ میلیمتر، عمق ۴۰ میلیمتر و زاویه دیواره ۶۰ درجه تعیین گردید.

---

[1] Computer numerical control
[2] Siemens
[3] Powermill

شکل۱– نمایی از نحوه قرارگیری و حرکت ابزار در شکل دهی افزایشی



شکل۲– فرم هندسی از شکل دهی افزایشی ورق سه لایه جوش انفجاریAl/Cu/Al

شکل (۲) آزمایش ایجاد هرم ناقص در شکل دهی افزایشی را نشان می‌دهد. همزمان نمودارهای اثر نیرو ناشی از ارتباط با دینامومتر، در هر سه راستای X، Y و Z بدست می‌آیند. به دلیل اصطکاک بسیار زیادی که از تماس بین ورق و ابزار حین عملیات شکل دهی حاصل می شود، ابزار از فولاد MO40، به صورت سر کروی، با مقاومت سایشی بالا، با درجه صلبیت و قابلیت ماشین کاری خوب انتخاب شد که دارای سختی لازم برای انجام فرآیند بوده و عدم سایش ابزار و شکل دهی مناسب را تضمین می‌کند و همچنین مشخصات ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است. همچنین برای جلوگیری از گرم شدن ورق در محل تماس با ابزار از روانکار روغن استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

با انجام عملیات شکل دهی افزایشی، تاثیر متغیرهای شکل‌دهی روی مقادیر نیرو و زمان شکل پذیری ورق های سه لایه آلومینیم-مس- آلومینیم مورد مطالعه قرار می گیرد. مشخصات این فاکتورها به ترتیب ذیل می باشد:

الف) متغیر قطر ابزار(A)، در بازه ۲۰- ۱۶ mm .

ب) متغیر گام عمودی(B)، در بازه ۱-۰/۲۵ mm.

ج) متغیر دور اسپیندل(C)، در۲۰۰۰-۸۰۰ Rate/min.

د) متغیر سرعت پیشروی(D)، ۱۵۰۰-۵۰۰mm /min.

با فرض انتخاب ۵ قطر، ۴ گام عمودی، ۱۳ سرعت دورانی و ۱۱ سرعت پیشروی ملاحظه شد تعداد حالات انجام آزمایشات بسیار زیاد و مستلزم مدت زمان زیادی می باشد. در این گونه موارد روش‌های رویه پاسخ[1] جایگزین‌های مناسبی به شمار می روند. روش‌های رویه پاسخ به وسیله توابع تخمینی، تقریبی از فضای طرح مبتنی بر نمونه‌های طرح‌ریزی شده و حاصل از طراحی آزمایش[2] را تعیین می نمایند. روش آماری رویه پاسخ با طراحی آزمایشات و انتخاب حالات بهینه می تواند سبب کاهش تعداد آزمایشات شود. بطور کلی می توان روش رویه پاسخ را به سه مرحله اساسی طراحی آزمایش[3]، اجرای آزمون‌های آزمایش[4] و تحلیل داده های آزمایش[5] تقسیم بندی نمود [۱۵] . با استفاده از طرح‌های مرکب مرکزی[6]، تعداد آزمایشات طرح ریزی شده به ۱۲ مورد آزمایش تقلیل یافت. بنابراین آزمایش شکل‌دهی افزایشی ورق سه لایه بر طبق طراحی متغیرهای ورودی آزمایش انجام شدند و پاسخ های این آزمایش شامل دو خروجی نیروی[7] شکل دهی و زمان شکل دهی با استفاده از تحلیل ترسیمی، مطابق با روش اندازه گیری محققین قبلی اندازه گیری و محاسبه شدند [۱۶].

جدول۱- مشخصات ترکیب شیمیایی ابزار فولاد mo40

	C	i	Mn	P	s	cr	mo	Ni
Min	۰/۳۸	۰/۱۵	۰/۷۵	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۸	۰/۱۵	۰/۲۵
max	۰/۴۳	۰/۳۵	۱	-	-	۱/۱	۰/۲۵	-

جدول۲- مشخصات خواص مکانیکی ابزار فولاد mo40

Yield strength	Tensile strength	Elongation %	Hardness
۷۰۰	۹۲۰	۱۵	۲۷۰

[1] Response surface methodology
[2] Design of experiment
[3] Planning experiment
[4] Implementations of experiment
[5] Analyzing of experiment
[6] Central Composite Designs
[7] Force

به منظور تعیین نیرو و زمان حاصل از شکل دهی افزایشی ورق، از دستگاه دینامومتر[1] مدل9257B کیستلر[2] قابل اتصال به ماشین CNC استفاده می شود. نتایج این اندازه گیری در جدول (۳) نتایج ارائه شده است. این دستگاه (دینامومتر) دارای یک تقویت کننده و یک دریافت کننده اطلاعات می باشد که این دو توسط یک کابل RS232 به یکدیگر متصل شده اند. همچین نرم افزار دایناوار[3] جهت کنترل دستگاه و آنالیز داده ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. سنسور دینامومتر بر روی میز CNC و زیر قالب فرایند نصب و تعبیه می‌گردد.
محور z در راستای ابزار و x و y در راستای محورهای میز دستگاه CNC می باشند. با توجه به بررسی و تاثیر متغیرهایی همچون دور بر دقیقه اسپیندل، گام عمودی، سرعت پیشروی و قطر ابزار بر فرایند شکل دهی افزایشی ورق های سه لایه آلومینیم-مس-آلومینیم جوش انفجاری، نمودارهای نیرو-زمان متنوعی بدست آمد. در جدول (۳) نتایج این اندازه گیری و ماتریس طراحی آزمایشات همراه با پاسخ های بدست آمده از آنها نشان داده شده است. همان گونه که بیان شد مقادیر پاسخ ها شامل نیرو(R_1) و زمان(R_2) از روی نمودارهای دستگاه دینامومتر استخراج شدند. این پارامترهای خروجی می توانند خواص شکل پذیری ورق سه لایه را توصیف نمایند [۱۶] . هرچه مقادیر R_1 ,R_2 کمتر باشند عملیات شکل دهی ورق آلومینیوم- مس-آلومینیم مطلوبتر خواهد بود.

روش رویه پاسخ منجر به حصول یک مدل تجربی $Y = f(x_1, \dots, x_k)$ می شود و بنابراین اثر متغیرهای قطرابزار (X_1)، گام عمودی (X_2)، دور اسپیندل (X_3) و سرعت پیشروی (X_4) به عنوان فاکتورهای مستقل روی پارامترهای خروجی به عنوان متغیر پاسخ (Y)، با استفاده از یک معادله چندجمله ای مرتبه دوم بصورت ذیل مرتب می‌شود:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum\sum b_{ij} x_i x_j \qquad i \geq j \qquad i, j = 1, 2, 3 \qquad (۱)$$

در این معادله، b_0 یک جمله مستقل مطابق با میانگین مقدار طرح ریزی آزمایش، b_i ضرایب رگرسیون است که اثرات متغیرها را در خطوط آنها (طولشان) توصیف می کند، و b_{ij} ضرایب رگرسیون ناشی از برهم کنش جمله ها میان متغیرها می‌باشد [۱۵] .

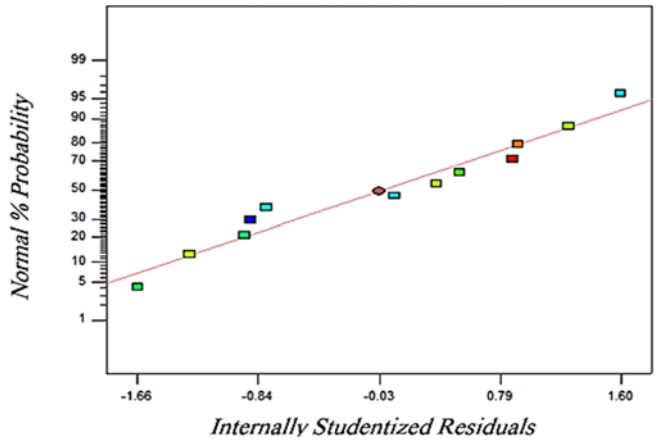
۳-۱- بررسی آزمون نرمال روی پارامترهای اصطکاکی

به منظور اطمینان از روند خطی مناسب داده های خروجی، از تست نرمال استفاده گردید، در این آزمون نرم افزار داده‌های ورودی را بررسی کرده و نتایج بدست آمده را مورد آنالیز قرار می‌دهد و خطی بودن و نرمال بودن داده‌ها و پاسخ‌های بدست آمده را نمایش می‌دهد و در صورتی که داده‌ای غیر منطقی باشد در نمودار نمایان می‌کند. نتایج آزمون نرمال بر نیرو و زمان شکل‌دهی در شکل (۳- الف وب)، نشان داده شده که حاکی از حسن جوابهای تحقیق و داشتن روند خطی مناسب پاسخ‌ها است.

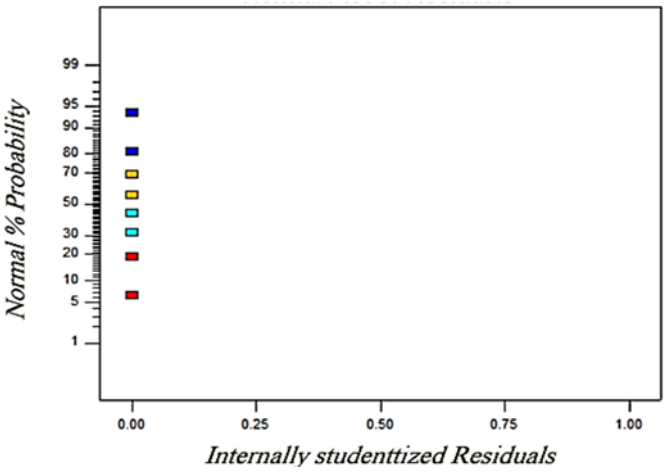
---
[1] Dynamometer
[2] Kistler
[3] Dynoware

جدول۳- ماتریس طراحی از ترتیب آزمایشات و پاسخ های آنها

کد	قطرابزار (mm)	گام عمودی (mm)	سرعت دورانی (rpm)	پیشروی (mm/min)	نیرو (N)	زمان (Sec)
۱	۲۰	۰/۲۵	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۹۷۹	۸۵۰
۲	۱۶	۱	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۹	۲۲۰
۳	۲۰	۰/۲۵	۲۰۰۰	۵۰۰	۱۵۹۱	۹۹۰
۴	۱۶	۱	۸۰۰	۱۵۰۰	۲۱۹۳	۲۲۰
۵	۲۰	۱	۸۰۰	۵۰۰	۱۷۷۸	۴۰۰
۶	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۱۵۰۰	۱۶۵۲	۸۵۰
۷	۱۶	۰/۲۵	۲۰۰۰	۵۰۰	۱۳۸۴	۹۹۰
۸	۱۶	۱	۲۰۰۰	۵۰۰	۱۸۹۶	۴۰۰
۹	۲۰	۱	۸۰۰	۱۵۰۰	۲۲۹۸	۲۲۰
۱۰	۲۰	۱	۲۰۰۰	۵۰۰	۱۹۸۹	۴۰۰
۱۱	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۵۰۰	۱۵۹۳	۹۹۰
۱۲	۲۰	۰/۲۵	۸۰۰	۱۵۰۰	۱۷۴۶	۸۵۰



(الف) نیروی شکل دهی

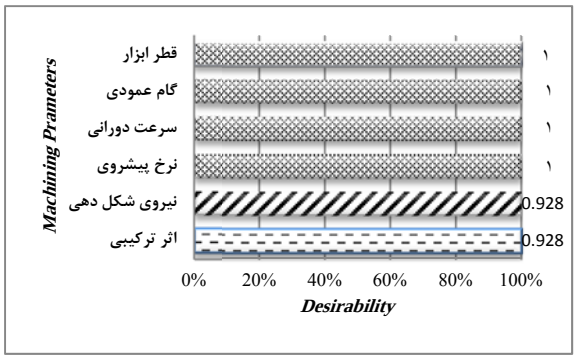


(ب) زمان شکل دهی

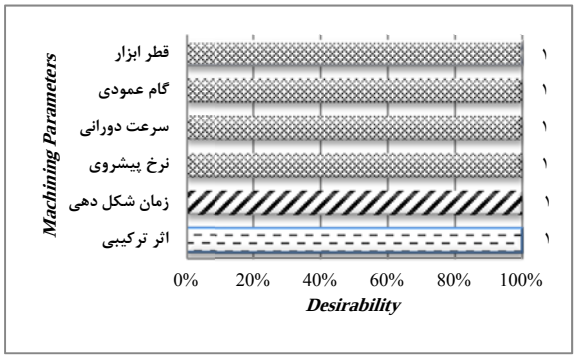
شکل۳- نمودار تست نرمال مقادیر خروجی (الف) نیرو، (ب) زمان در فرایند شکل دهی

۳-۲- بررسی توابع مطلوبیت

میزان مطلوبیت متغیرهای مذکور تعیین می‌کند که بهینه‌سازی به چه میزان نسبت به سطح مطلوب (۱/۰۰۰) صورت گرفته است. همچنین بیانگر آن است که با وجود اعمال محدودیت‌های تحقیق، متغیرهای مذکور تا چه میزان می‌توانند بر روی نرخ مطلوبیت اثرگذار باشند. در شکل (۴- الف و ب)، میزان مطلوبیت متغیرها بر روی هر یک از خروجی‌های نیرو و زمان تحقیق نشان داده شده است. میزان نسبتا زیاد تابع مطلوبیت (۱/۰۰۰) متغیرهای قطر ابزار، گام عمودی، دور اسپیندل و سرعت پیشروی به عنوان فاکتورهای مستقل روی تک تک پارامترهای خروجی، حاکی از اثردار بودن قطعی هر یک و برابری با مقدار هدف می‌باشد.



(الف) نیروی شکل دهی



(ب) زمان شکل دهی

شکل ۴- میزان مطلوبیت فاکتورهای تحقیق بر روی مقادیر(الف) نیرو، (ب) زمان

جدول ۴- رگرسیون خروجی بکوارد از آنوا برای مدل رویه پاسخ Y_1: F_{mean}

Source	Df	F-value	P-value
Model	۴	۱۰/۳۹	۰/۰۰۴۵
A[قطرابزار]	۱	۲/۲۰	۰/۱۸۱۵
B[گام عمودی]	۱	۲۵/۳۱	۰/۰۰۱۵
C [دوراسپیندل]	۱	۰/۱۱	۰/۷۵۱۹
D [پیشروی]	۱	۱۳/۱۸	۰/۰۰۸۴
Residual	۷		
Cor total	۱۱		

جدول۵- رگرسیون خروجی بکوارد از آنوا برای مدل رویه پاسخ *Y2: Time*

Source	Df	F-value	P-value
Model	۳	۶/۳۶۶E+۷	۰/۰۰۰۱
B[گام عمودی]	۱	۶/۳۶۶E+۷	۰/۰۰۰۱
D [پیشروی]	۱	۶/۳۶۶E+۷	۰/۰۰۰۱
BD	۱	۶/۳۶۶E+۷	۰/۰۰۰۱
Residual	۸		
Cor total	۱۱		

۳-۳- اجرای آزمون های آزمایش

پارامترهای اصطکاکی بدست آمده از جدول(۳)، با استفاده از آزمون های آنوا[1] و بکوارد[2] (توسط نرم افزار آماری DOE[3]) مورد تحلیل قرار گرفتند [۶، ۹] که نتایج آنها در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است. آزمون آنوا و بکوارد وجود ارتباط خطی معنی دار بین متغیر پاسخ (Y) و فاکتورهای ورودی آزمایش را بررسی می‌نماید.

همان گونه که از جداول فوق بر می آید، اثرات مستقل هریک از فاکتورهای قطرابزار (A)، گام عمودی (B)، دور اسپیندل (C) و سرعت پیشروی (D) به عنوان فاکتورهای مستقل روی پارامترهای خروجی و همچنین برهم کنش معنی دار بین آنها در سطح اطمینان ۹۹٪، بر روی مقادیر متغیرهای پاسخ نشان داده شده است. بنابر آزمون آنوا، فاکتورهایی که مقادیر*P-value* آنها کمتر از ۰/۰۱ باشد، نشان دهنده تاثیردار بودن قطعی آنها بر روی میزان نیرو و زمان عملیات شکل دهی می باشد. نتایج آزمون آنوا از جداول (۴) و (۵) نشان می‌دهد که دو متغیر گام عمودی (B) و سرعت پیشروی (D)، تاثیر بسیار مهمی بر نیروی شکل دهی ورق های سه لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم دارند. همچنین دو متغیر گام عمودی (B) و سرعت پیشروی (D)، بر زمان عملیات شکل دهی بسیار اثر می‌گذارند.

۳-۳-۱-تاثیر تغییر قطر ابزار بر فرایند شکل دهی ورق سه لایه

نتایج آزمون آنوا از جداول (۴) و (۵) نشان می دهد که تغییرات قطر ابزار ماشین CNC در محدوده تغییرات ۲۰-۱۶ میلیمتر بر روی نیروی شکل‌دهی و زمان عملیات شکل‌دهی تاثیر معنی داری ندارد.

البته انتخاب قطر ابزار شکل‌دهی در محدوده بالا به سبب استحکام و ضخامت زیاد ورق سه لایه (۲/۸ میلیمتر) بود که با توجه به احتمال شکستگی ابزارهای با قطر پایین، انجام این تحقیق میسر نبود. نتایج بدست آمده، تا حدودی با تحقیقات پیشین نیز مطابقت داشت [۶].

۳-۳-۲- تاثیر گام عمودی بر فرایند شکل دهی ورق سه لایه

نتایج (*P-value*= ۰/۰۰۰۱) بدست آمده از روش رویه پاسخ و آزمون آنوا جداول (۴) و (۵) نشان می‌دهد که

[1] ANOVA
[2] Backward
[3] Design Expert

تغییر میزان گام عمودی ماشین CNC، بر روی نیروی شکل‌دهی و زمان عملیات شکل‌دهی ورق‌های سه لایه تحقیق، شدیدا اثرگذار است که نشان دهنده اهمیت این متغیر در پارامترهای شکل‌دهی می‌باشد.
هرچه اندازه گام کوچکتر باشد، شکل‌پذیری بیشتر است. بنابراین با تغییر گام عمودی ابزار در محدوده تغییرات ۱-۰/۲۵میلیمتر، بطور قطع میزان نیرو، زمان دستخوش تغییرات می‌شوند. نتایج بدست آمده، با نتایج تحقیقات پیشین نیز کاملا مطابقت داشت. نتایج میرنیا و ملائی در فرآیند شکل‌دهی افزایشی نیز نشان داده بود که با افزایش گام عمودی، نیروهای شکل‌دهی افزایش می‌یابند. همچنین لیو و همکارانش در تحقیقات خود، مهمترین پارامتر تاثیرگذار در زمان فرایند شکل را گام معرفی نمودند که منطبق با نتایج این تحقیق است [۶].

۳-۳-۳- تاثیر سرعت دورانی بر فرایند شکل دهی ورق سه لایه

نتایج آزمون آنوا از جداول (۴) و (۵) و (*P-value*= ۰/۰۰۰۱) نشان می‌دهد که تغییرات سرعت دورانی اسپیندل ماشین CNC در محدوده ۸۰۰-۲۰۰۰ دور بر دقیقه، بر مقدار نیروی شکل‌دهی و همچنین زمان عملیات شکل دهی ورق سه لایه تاثیر چندانی نگذاشت.

۳-۳-۴- تاثیر پیشروی بر فرایند شکل دهی ورق سه لایه

نتایج (*P-value*= ۰/۰۰۰۱) بدست آمده از روش رویه پاسخ و نتایج آزمون آنوا از جداول (۴-۳) تا (۴-۵) نشان می دهد که تغییرات سرعت پیشروی ماشین CNC در محدوده ۱۵۰۰-۵۰۰ میلیمتر بر دقیقه، شدیدا بر روی نیرو و زمان عملیات شکل دهی ورق سه لایه تاثیرگذار بود.

نتایج تحقیقات همیلتون و همکارانش در بررسی فرایند شکل دهی نموی با سرعت های پیشروی بالا روی ورق Al3003 نشان داده بود که پیشروی تاثیر چندانی بر توزیع ضخامت ندارد. همچنین آزمایشات قاسمی وهمکارانش، در مطالعه برخی پارامترهای موثر بر روی تغییر ضخامت قطعه شکل یافته و نیروها در فرآیند شکل دهی تدریجی نشان داده بود که با افزایش سرعت پیشروی نیروی عمودی کاهش می یابدکه نشان می دهد نتایج بدست آمده، با نتایج تحقیقات پیشین نیز کاملا مطابقت دارد. بدین ترتیب، شکل پذیری وابسته به سرعت پیشروی ابزار خواهد بود [۷].

۳-۳-۵-معادلات نهایی مدل رویه پاسخ

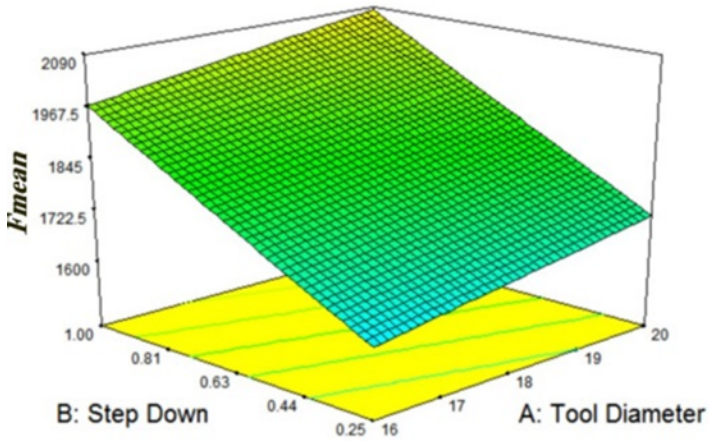
مطابق با نتایج رگرسیون بکوارد، مدل (فرمول) از جواب ها با استفاده از فاکتورهای قطر ابزار (A)، گام عمودی(B)، دور اسپیندل (C) و سرعت پیشروی(D) و همچنین اثر متقابل بین آنها بدست آمد که در جداول (۶) و (۷) نمایش داده شده است.

جدول۶- معادلات نهایی نیروی شکل دهی از مدل رویه پاسخ

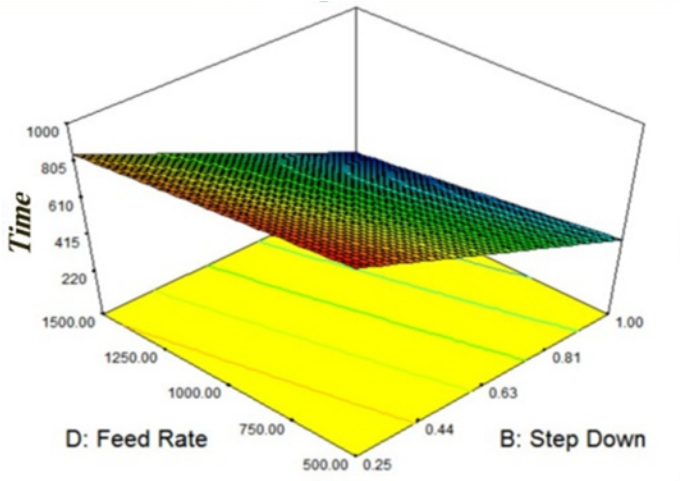
نوع	معادله نیروی شکل دهی
Coded	$1842.33 + 54.50A + 184.83B + 12.81C + 141.44D$
Actual	$731.007 + 27.25A + 492.888B + 0.021C + 0.283D$

جدول۷- معادلات نهایی زمان شکل دهی از مدل رویه پاسخ

نوع	معادله زمان شکل دهی
Coded	$615 - 305B - 80D - 10BD$
Actual	$1250 - 760B - 0.127D - 0.053BD$



الف) نیروی شکل دهی



ب) زمان شکل دهی

شکل۵- نمودارهای مدل رویه پاسخ برای جواب های (نیرو و زمان شکل دهی) تحقیق حاصل از اثر متقابل فاکتورها

حوزه روش رویه پاسخ، متشکل از استراتژی تجربی[1] جهت بررسی متغیرهای مستقل($x_i = A, B, C, D$) و مدل های آماری تجربی[2] است تا یک نسبت تقریبی مناسب میان جواب ها و متغیرهای فرایند بوجود آورد. در جداول (۶) و (۷) ضرایب تخمینی به عنوان ضریب رگرسیون مورد پیش بینی در جواب y نسبت به تغییرات واحد x می باشد. باید توجه داشت که این ضرایب تحت شرایطی بدست می‌آیند که کلیه فاکتورهای باقیمانده ثابت نگه داشته شوند.

[1] Experimental Strategy
[2] Empirical Statistical Modeling

همان گونه که از جدول مذکور مشاهده می شود، بالاترین ضرایب تخمین متعلق به فاکتور گام عمودی (B) می باشد که این امر بیانگر اهمیت زیاد آن بر روی خواص شکل‌پذیری ورق سه لایه می باشد.
در شکل (۵- الف و ب)، نمونه ای از نمودارهای مدل رویه پاسخ برای جواب های بدست آمده تحقیق حاصل از اثر متقابل قطر ابزار(A) و گام عمودی(B) نمایش داده شده است.

۳-۳-۶- دستیابی به مقادیر بهینه نیرو و زمان با پارامترهای شکل‌دهی

در این تحقیق، مقادیر بهینه حاصل از انتخاب فاکتورهای اثرگذار در معادلات رویه پاسخ بر روی نیروی شکل دهی، زمان شکل‌دهی و تغییرات ضخامت شکل‌دهی بدست آمد که در جداول (۴-۹)، (۴-۱۰) نتایج ۷ پیش بینی بهینه بدست آمده از مدل رویه پاسخ (با درجه مطلوبیت نزدیک به۱/۰۰۰) ناشی از انتخاب مناسب فاکتورهای تحقیق نمایش داده شده است. با استفاده از این داده‌ها می‌توان محدوده متغیرهای مختلف را تعیین نمود.

جدول۸- طراحی نقاط بهینه نیروی شکل دهی پارامترهای تحقیق

کد	قطر ابزار(mm)	گام عمودی (mm)	سرعت دورانی (rpm)	پیشروی (mm/min)	نیرو (N)	میزان مطلوبیت
۱	۱۶	۰/۲۵	۸۴۸	۵۰۰	۱۴۵۰	۰/۹۲۸
۲	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۵۰۰	۱۴۵۰	۰/۹۲۷
۳	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۵۰۰	۱۴۵۳	۰/۹۲۴
۴	۱۶	۰/۲۵	۱۰۲۹	۵۰۰	۱۴۵۴	۰/۹۲۴
۵	۱۶	۰/۲۵	۹۴۷	۵۰۸	۱۴۵۴	۰/۹۲۳
۶	۱۶	۰/۲۵	۱۰۹۸	۵۰۰	۱۴۵۵	۰/۹۲۲
۷	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۵۰۰	۱۴۵۷	۰/۹۲۰

جدول۹- طراحی نقاط بهینه زمان شکل دهی پارامترهای تحقیق

کد	قطر ابزار (mm)	گام عمودی (mm)	سرعت دورانی (rpm)	پیشروی (mm/min)	زمان (Sec)	میزان مطلوبیت
۱	۱۹	۱/۰۰	۱۵۷۸	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۲	۱۷	۱/۰۰	۸۴۴	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۳	۱۹	۱/۰۰	۸۵۵	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۴	۱۸	۱/۰۰	۱۴۴۶	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۵	۱۷	۱/۰۰	۱۹۲۶	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۶	۱۸	۱/۰۰	۱۶۵۲	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۷	۱۷	۱/۰۰	۱۷۷۸	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰

۴- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات سرعت دورانی، بر نیرو و زمان عملیات شکل‌دهی نقشی ندارد، اما تغییر سرعت پیشروی ماشین CNC شدیدا بر روی نیرو و زمان عملیات شکل دهی ورق سه لایه تاثیرگذار بود. همچنین با تغییر میزان گام عمودی ماشین CNC، تاثیر بسیار شدیدی بر نیرو و زمان عملیات شکل دهی ایجاد می شود البته نتایج مدل رویه پاسخ نیز نشان داد که بالاترین ضرایب تخمین متعلق به فاکتور گام عمودی (B) می باشد که نشان دهنده اهمیت این متغیر در پارامترهای شکل‌دهی می باشد. مدل رویه پاسخ با انتخاب مناسب فاکتورهای تحقیق، محدوده بهینه ای از فاکتورهای اثرگذار شکل‌دهی دارای کمترین نیرو و زمان عملیات شکل‌دهی ورق های سه لایه را با درجه مطلوبیت ۱/۰۰۰ تعیین نمود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله لازم است که از معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان بابت حمایت مالی این مقاله تشکر نمایند. (شماره قرارداد: ۲/۶۸۲۵۸۰)

مراجع

[1] Powell, N., and Andrew, C., "Incremental Forming of Flanged Sheet Metal Components without Dedicateddies", IMECHE Part , J. Engineering Manufacture, Vol. 206, pp. 41- 47, (1992).

[2] Sedighi, M., and Honarpisheh, M., "Investigation of Cold Rolling Influence on Near Surface Residual Stress Distribution in Explosive Welded Multilayer", Strength of Materials, Vol. 44, No. 6, pp. 693-698, (2012).

[3] Akbari Mousavi, S.A.A., and Farhadi Sartangi, P., "Effect of Post-weld Heat Treatment on the Interface Microstructure of Explosively Welded Titanium–Stainless Steel Composite", Materials Science and Engineering A, Vol. 494, pp. 329–336, (2008).

[4] Hussain, G., Gao, L., and Zhang, Z. Y., "Formability Evaluation of a Pure Titanium Sheet in the Cold Incremental Forming Process", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 37, pp. 920–926, (2008).

[5] Mirnia, M. J., and Dariani, B. M., "Analysis of Incremental Sheet Metal Forming using the Upper-bound Approach", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 226, No. 8, pp. 1309-1320, (2012).

[6] Liu, Z.B., Li, Y.L., Daniel, W.J.T.B., and Meehan, P., "Taguchi Optimization of Process Parameters for Forming Time in Incremental Sheet Forming Process", Materials Science Forum, Vols. 773-774, No. 137143, pp. 773-774, (2014).

[7] Hamilton, K., and Jeswiet, J., "Single Point Incremental Forming at High Feed Rates and Rotational Speed: Surface and Structural Consequences", CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 59, pp. 311-314, (2010).

[8] Ghasemi, H., and Solttani, B., "Experimental Investigation on the Effective Parameters on Forming Force, Dimensional Accuracy and Thickness Distribution in Single Point Incremental Forming", Modares Mechanical Engineerring, Vol. 14, No. 1, pp. 89-96, (2014). (In Persian).

[9] Shanmuganatan, S. P., and Kumar, V. S., "Modeling of Incremental Forming Process Parameters of Al 3003 (O) by Response Surface Methodology", Procedia Engineering, Vol. 97, pp. 346– 356, (2014).

[10] Honarpisheh, M., Abdolhoseini, M. J., and Amini, S., "Experimental and Numerical Investigation of the Hot Incremental Forming of Ti-6Al-4V Sheet using Electrical Current", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 83, No. 9, pp. 2027-2037, (2016).

[11] Gheysarian, A. and Honarpisheh, M., "Process Parameters Optimization of the Explosive-Welded Al/Cu Bimetal in the Incremental Sheet Metal Forming Process", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, doi.org/10.1007/s40997-018-0205-6, (2018).

[12] Gheysarian, A. and Honarpisheh, M., "An Experimental Study on the process parameters of Incremental Forming of Explosively-Welded Al/Cu Bimetal", Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME), Vol. 7, No. 1, pp. 73-83, (2017).

[13] Honarpisheh, M., Niksokhan, J., and Nazari, F., "Investigation of the Effects of Cold Rolling on the Mechanical Properties of Explosively-welded Al/St/Al Multilayer Sheet", Metallurgical Research & Technology, Vol. 113, No. 1, pp. 105, (2016).

[14] Asemabadi, M., Sedighi, M., and Honarpisheh, M., "Investigation of Cold Rolling Influence on the Mechanical Properties of Explosive-welded Al/Cu Bimetal", Materials Science and Engineering A, Vol. 558, pp. 144-149, (2012).

[15] Myers, H. R., and Montgomery, D. C., "*Response Surface Methodology*", John Wiley & SONS, INC, (2002).

[16] Ambrogio, G., Filice, L., and Micari, F., "A Force Measuring Based Strategy for Failure Prevention in Incremental Forming", Journal of Materials Processing Technology", Vol. 177, pp. 413-416, (2006).

Abstract

Incremental sheet metal forming is one of methods more innovation in science and industrial zone. The purpose of this research is the study of influence of factors such as tool diameter, step down, rotation speed and feed rate on metallurgical properties of explosive-welded Al/Cu/Al multilayer. In order to this purpose, a sample of explosive-welded Al/Cu/Al multilayer was produced. Then, a statistical model (RSM) was used for the experimental plan (with these variables) to determine the runs of experiment (or selected points). Next, forces and times values of sheet metal forming were measured. The experimental results showed that force and time forming of Al/Cu/Al multilayer is highly sensitive to factors like step down and feed rate. Also the most effective coefficient on the incremental forming is belonged to step down factor that showed it is very important in machining parameters.
Finally, by using coefficient estimates of (RSM) model, relation between input variables and response was obtained. Finally, this model was predicted the optimum design points of machining parameters.