

تأثیر مسیر ابزار در فرآیند شکل‌دهی افزایشی ورق‌های دولایه

Archive of SID

علی ابراهیم^۲

عباس وفايي صفت^۱

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۱۹)

چکیده

شکل‌دهی افزایشی ورق به‌علت انعطاف‌پذیری بالا روشی برای نمونه‌سازی سریع معرفی شده است. رفتار شکل‌پذیری ورق را می‌توان در ۴ پارامتر اصلی ضخامت ورق، مسیر ابزار، سرعت (سرعت چرخشی و پیشروی ابزار) و شعاع ابزار بیان کرد. در این مقاله برخلاف تحقیقات گذشته به بررسی رفتار ورق‌های پوشش‌دار یا دولایه که توسط نورد به هم چسبیده‌اند پرداخته می‌شود. ورق‌های دولایه با عنایت به کارایی و خواص ترکیبی در صنایع مختلف همچون هوافضا، الکتریکی، شیمیایی، خودروسازی و غذایی کاربردهای مختلف دارند. تأثیر پارامترهای مهم بر رفتار شکل‌دهی در حین فرایند مانند استحکام، نیروی شکل‌دهی، قابلیت کشش و میزان کاهش ضخامت ورق بررسی می‌گردد. به‌منظور مطالعه فرایند از مدل اجزای محدود جهت شبیه‌سازی کمک گرفته می‌شود. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی موجب ارزیابی شایستگی مدل می‌شود. نتایج حاکی از انتخاب صحیح معیارهای به‌کار گرفته شده می‌باشد که می‌تواند روش شبیه‌سازی در جهت پیش‌بینی پارامترهای مختلف فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: مدل اجزای محدود، نمونه‌سازی سریع، نازک‌شدگی ضخامت

The Influence of Tool Path in Incremental Forming of Double-Layers Sheet

A. Vafaeseefat

A. Ebrahim

Mechanical Engineering Department.

Imam Hossein University

Islamic Azad University, Science and Research Branch

(Received: 27/November/2012; Accepted: 10/November/2014)

ABSTRACT

Because of high flexibility of the incremental sheet metal forming, it is used as a Rapid prototyping tool. The formability of the sheet can be defined in terms of four major parameters: sheet thickness, tool path, speed (both rotational and feed rate) and radius of the forming tool. In this paper unlike previous studies, the forming behavior of clad sheet or double-layers is studied in which the two layers are produced by roll bonding. The double-layers sheet have different industrial applications in various industries according to their combined properties such as aerospace, electrical, chemical, automotive and food. The influences of major parameters on the formability during the process are studied such as strength, forming force, tensility and thinning of thickness. In order to study the process parameters, the use FE simulation of the process is used. A comparison between numerical and experimental results is made to assess the suitability of model. The results for both the methods are in good agreement, which indicate that the criteria chosen for determination of the mechanical behavior of the formed sheets has been adequate. The results also show strong potentials of the finite element method for simulation of the incremental sheet forming process, with the aim of estimating the critical parameters in this process.

Keywords: Finite Element Model, Rapid Prototyping, Thickness Thinning

۱- مقدمه

امروزه استفاده از ورق‌های چند لایه به خصوص ورق‌های دولایه با توجه به خواص ترکیبی که دارند در محصولات مختلف، قطعات صنعتی و خانگی گسترش یافته است. از جمله این خواص می‌توان به دستیابی استحکام بالا همراه با وزن کمتر، افزایش مقاومت در برابر خوردگی و اکسید شدگی، افزایش میرایی صوت و ارتعاش، توزیع یکنواخت حرارت به سبب ضریب انبساط حرارتی متفاوت لایه‌ها در محصولاتی که نیاز به گرم کردن و گرم نگه‌داشتن مواد دارند، اشاره نمود. همچنین ورق‌های دولایه در بهبود فرایندهای شکل‌دهی به‌طور خاص در بهبود شکل‌پذیری ورق‌ها با شکل‌پذیری کم، یا در محصولات دقیق به جهت کاهش برگشت فنری و چین خوردگی نسبت به ورق فلزی هم ضخامت و در نهایت کاهش هزینه‌ها کاربرد زیادی پیدا کرده‌اند.

کاربرد این ورق‌ها در صنایع مختلفی همچون هوافضا، الکتریکی، شیمیایی، خودروسازی، غذایی و حتی بسته‌بندی گسترش یافته است. در این میان ترکیب فلزات مختلف با یکدیگر مورد توجه می‌باشد. خواص این نوع ورق‌های چند لایه بستگی به نسبت حجمی لایه‌های تشکیل دهنده دارد. به‌عنوان مثال ورق‌های پوشش دار فولاد زنگ نزن با پوشش مس دارای استحکام فولاد همراه با خواص رسانایی گرمایی مس می‌باشد. در صنعت خودروسازی به‌دلیل خواص خوب مکانیکی، ضریب انتقال حرارت بالا و مقاومت در برابر خوردگی، آلیاژهای آلومینیوم به‌صورت ترکیبی به‌صورت ورق‌های چند لایه در رادیاتورها و کندانسورهای خودرو استفاده می‌شوند. از دیگر موارد کاربردی این ورق‌ها می‌توان به قوطی‌های کنسرو پوشش‌دار در صنایع غذایی و حتی ورق‌های دولایه با پوشش ضد سایش در صنایع معدنی و ابزار آلات مربوطه اشاره نمود.

روش‌های مختلفی به‌منظور تولید این نوع ورق‌ها در صنعت وجود دارد. یکی از این روش‌ها فرایند نورد است که می‌تواند به‌طور داغ یا سرد صورت گیرد و نسبت به روش‌های دیگر مانند اتصال انفجاری یا اتصال به‌کمک چسب‌های مخصوص، اقتصادی‌تر و مؤثرتر است. استحکام ورق دولایه به عوامل مختلفی مانند فشار نورد، نسبت‌های ضخامت دولایه‌ای که به هم پیوند می‌خورند، زبری و تمیزی دو سطح پیوند وابسته است [۱].

روش‌های متنوعی جهت تهیه و شکل‌دهی ورق‌های چند لایه تاکنون استفاده شده است. لانگ^۱ و همکارانش [۲] در زمینه

www.SID.ir

هیدروفرمینگ ورق‌های چندلایه مطالعه نمودند. اسلام^۲ و همکارانش [۳] در مورد امکان‌سنجی شکل‌دهی اجزاء لوله‌های چند لایه توسط فرایند هیدروفرمینگ و شبیه‌سازی المان محدود تحقیق کرده‌اند. باقرزاده و ملایی داریانی [۴] در مورد تعیین فشار بحرانی کشش عمیق هیدرو مکانیکی ورق‌های دولایه فلزی تحقیق کردند. هانگ هسیو^۳ و همکارانش [۵] دو مدل تحلیلی برای شکل‌دهی فشاری ورق‌های دولایه ارائه دادند. جیو-یی^۴ و همکارانش [۶] مدل تحلیلی اصلاح شده نورد نورد سرد ورق‌های دولایه با لحاظ اصطکاک را ارائه نمودند. شاکری و همکارانش [۷] کریمی و نارویی [۸] در مورد شکل‌پذیری ورق دولایه فلزی تحقیق نمودند. رجیبی و کدخدایان [۹] و ملایی داریانی و همکارانش [۱۰] به شبیه‌سازی و مطالعه چروکیدگی ورق‌های دولایه در فرایند کشش عمیق پرداختند. مسلمی نائینی و همکارانش [۱۱] به بررسی اثر ضخامت لایه‌ها بر برگشت فنری ورق فلزی دولایه در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد پرداختند.

روش شکل‌دهی افزایشی قادر است اشکال پیچیده که دارای برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های بسیار متنوع هستند را بر روی ورق‌های مدنظر به‌وجود آورد. از محدودیت‌های این روش می‌توان به طولانی بودن زمان فرایند و محدودیت‌های هندسی اشکال تولیدی اشاره نمود که البته مزیت عدم نیاز به قالب‌های ویژه این روش را در قبال فرایند کلاسیک کشش عمیق در قطعات نمونه و تعداد کم برتری داده است.

آتانیسیو^۵ و همکارانش [۱۲] به بهینه‌سازی مسیر ابزار در شکل‌دهی افزایشی ورق تک لایه از جنس فولاد پرداختند. آنها با انتخاب دو نوع مسیر ابزار عمق فرم دهی را در هر مرحله ابتدا ثابت و سپس افزایشی در نظر گرفتند و به بررسی تأثیر آن در کیفیت سطح و دقت ابعادی و همچنین نازک شدگی ضخامت ورق پرداختند. رودریگز^۶ و همکارانش [۱۳] تحت عنوان انتخاب بهینه استراتژی شکل‌دهی افزایشی ورق به بررسی تأثیر تعداد مراحل عمق‌دهی و مسیر ابزار در صافی سطح و پارگی ورق‌های تک لایه پرداخته‌اند. در آزمایشی دیگر یاماشیتا^۷ و همکارانش [۱۴] با به‌کارگیری کد المان محدود دینامیک تأثیرات مسیر ابزار بر روی رفتار شکل‌پذیری ورق در فرایند شکل‌دهی افزایشی را مورد مطالعه قرار دادند. و در این میان به بررسی پارامترهای خروجی پروفایل محصول شکل‌یافته، توزیع

2- Islam

3- Hung-Hsiou

4- Gow-Yi

5- Attanasio

6- Rodriguez

7- Yamashita

ورق‌ها بوجود می‌آید و البته با انتخاب مسیر ابزار بهینه می‌توان از مقدار این کاهش به‌طور چشمگیری کاست.

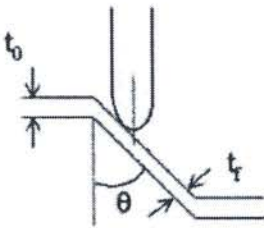
۲- رابطه بین خم شدن و کاهش ضخامت آن

در فرایند شکل‌دهی تدریجی نیز مانند فرایند کشش عمیق با نازک شدن دیواره‌ها مواجه هستیم اما با این تفاوت که در این روش میزان نازک شدن بسیار زیاد می‌باشد. به این منظور باید به‌طور دقیق میزان نازک شدن تعیین شده و در شکل نهایی قطعه در نظر گرفته شود. از آنجا که قطر ابزار به ضخامت ورق بستگی دارد، ابزار با قطر کوچک قادر به تحمل نیروهایی که در فرایند شکل‌دهی ورق‌های ضخیم عمل می‌کنند نخواهد بود.

در شکل ۱ رابطه بین کاهش ضخامت ورق و خم شدن براساس ضخامت نهایی (t_f) به ضخامت اولیه (t_0) و زاویه خم θ نشان داده شده است. این رابطه تقریبی کاهش ضخامت ورق در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$t_f = t_0 \sin \theta. \quad (1)$$

باید به این نکته دقت کرد که این رابطه برای شرایطی که تغییر ضخامت ثابت می‌باشد اعتبار دارد. در شکل‌دهی تدریجی میزان نازک شدن دیواره قطعه کار در قسمت‌های مختلف متفاوت است [۲۰].



شکل (۱): رابطه بین کاهش ضخامت ورق و خم شدن [۲۰].

۳- مسیرهای ابزار

گزینه‌های متعددی در شکل‌دهی افزایشی برای انتخاب مسیر ابزار موجود می‌باشد. یک روش معمول تشکیل کانتورها با اندازه گام مساوی می‌باشد. در این شیوه ابتدا یک سطح صاف ورق به‌عنوان صفحه X-Y قبل از شکل‌دهی تعریف می‌شود که محور Z در این سطح مساوی با صفر است. ابزار با حرکت دورانی از قسمت خارج صفحه به مرکز آن یا بالعکس وارد عمق‌دهی می‌شود. این حلقه‌ها تکرار می‌شوند و با نفوذ ابزار به داخل قطعه، شکل نهایی ایجاد می‌گردد. روش دیگر مسیر ابزار ماریچی می‌باشد. از پارامترهای مهم مسیر ابزار می‌توان به طول مسیر، اندازه گام عمودی (میزان باردهی) و افقی، تعداد حلقه اشاره نمود [۲۱]. در حل این مدل مسیرهای از پیش تعیین شده‌ای متناسب با شکل نهایی قطعه در نظر گرفته

کرنش و مقدار نیروی مصرفی پرداختند. راج^۱ و همکارانش [۱۵] به بهینه‌سازی برنامه مسیر ابزار در جهت کاهش نیروی مصرفی به‌صورت تجربی پرداخته‌اند. کیم^۲ و همکارانش [۱۶] نشان دادند که قابلیت شکل‌پذیری در فرایند با سرعت‌های پیشروی پایین افزایش می‌یابد. کیو^۳ و جانو^۴ [۱۷] بر روی فرایند فلنج‌کاری با استفاده از شکل‌دهی افزایشی چند مرحله مطالعه نمودند و نشان دادند که نتایج قابل قبولی با استفاده از مسیر ابزار چند مرحله ایی می‌توان حاصل نمود.

بامبچ^۴ [۱۸] جهت بهبود مسیر ابزار به‌صورت تکرارشونده استراتژی توصیف نمود که اصلاح مسیر به جهت افزایش دقت محصول انجام می‌پذیرفت این تکرار اصلاح مسیر ابزار یک مزیت منحصربه‌فردی است اما به سبب فعل و انفعالات پیچیده و مرکب انتخاب‌های اولیه و نهایی مسیر ابزار همگرایی به شکل نهایی محصول بسیار سخت و پیچیده گردید. آلود^۵ و همکارانش [۱۹] با به‌کارگیری دوربینی در زیر قطعه کار به‌جهت به‌دست آوردن بازخور هندسه محصول در حین فرایند اقدام به تنظیم مسیر ابزار نمودند. تنظیم نمودن مسیر ابزار توسط الگوریتم بهینه‌سازی انجام می‌پذیرفت که با به‌کارگیری مدل خطی فرم قطعه در حین فرایند و میزان انحراف آن تا قطعه مدنظر و مسیر ابزار طراحی شده را مقایسه و اقدام به اصلاح مسیر ابزار می‌نمود. این رویه به نظر بسیار امیدبخش بوده اما در هندسه‌های ساده، کارایی مناسب را دارد.

تاکنون تمامی مطالعات در زمینه شکل‌دهی افزایشی بر روی ورق‌های تک لایه از موادی از قبیل ورق‌های فولادی، آلومینیوم، منیزیم، مس و آلیاژهای آنها، حتی در مواد لاستیکی و پلاستیکی انجام پذیرفته شده است. در مقاله پیش رو با استفاده از روش اجزای محدود اقدام به شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی افزایشی ورق دولایه آلومینیوم-مس پرداخته که جنس دوگانه ماده رفتار جدیدی از شکل‌پذیری را در بر خواهد داشت. مسلماً بررسی پارامترهای مختلف کمک به شناخت رفتار شکل‌پذیری این نوع ورق‌ها می‌کند. در این مطالعه پارامترهای مسیر ابزار و عمق محصول مورد بررسی قرار می‌گیرد سپس با انجام آزمایشات تجربی در این زمینه اقدام به اعتبارسنجی نتایج می‌گردد. مشخص گردید با افزایش عمق محصول مقادیر تنش‌ها افزایش یافته و کاهش در شکل‌پذیری

1- Rauch
2- Kim
3- Cui
4- Bambach
5- Allwood

آن انجام پذیرد. با حرکت دورانی ابزار سرکروی به قطر ۱۰

میلی متر اقدام به ساخت محصولات *SID* کرد.

۱- محصول با عمق ۱۰ میلی متر با مسیر ابزار مطابق شکل

۲- (الف) (عمق دهی پله‌ای)،

۲- محصول با عمق ۱۵ میلی متر با مسیر ابزار مطابق شکل

۲- (الف) (عمق دهی پله‌ای) و

۳- محصول با عمق ۱۵ میلی متر و مسیر ابزار مطابق شکل

۲- (ب) (عمق دهی حلقوی).

جهت کنترل حرکت ابزار، برنامه کنترل عددی مطابق مسیر

ابزارهای مختلف مد نظر مطابق با عمق دهی جدول ۱ و شکل ۲

با گام عرضی ۵ میلی متر در هر حلقه توسط برنامه Power

Mill تهیه و به ماشین CNC منتقل گردید.

شده‌اند. شکل ۲ استراتژی مختلف ابزار استفاده شده را نشان می‌دهد.

۴- آزمایش تجربی

فرم نهایی محصول هرم ناقصی با ضلع بزرگ 120×120

میلی متر و عمق ۱۰ و ۱۵ میلی متر بازایه دیواره ۱۸ و ۲۶ درجه

می‌باشد. آزمایشات با استفاده از یک ماشین فرز عمودی CNC

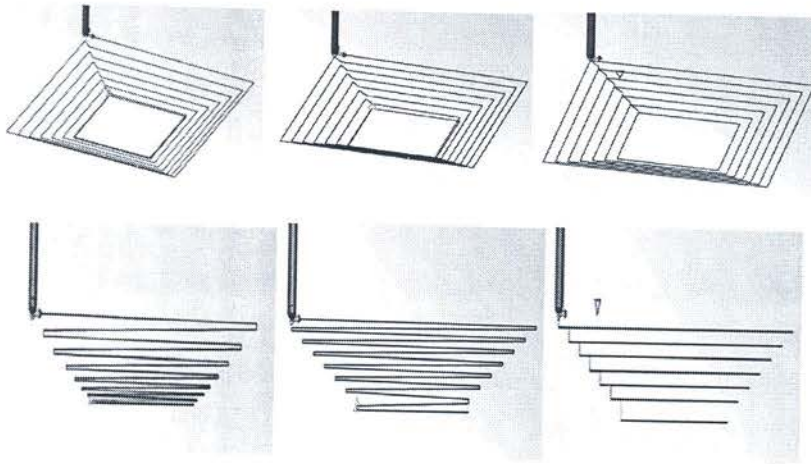
سه محوره انجام شدند. ورق دولایه که محصول فرایند نورد

می‌باشند از جنس آلومینیوم ۱۱۰۰ با ضخامت ۱ میلی متر و

ورق مس ۹۹٪ به ضخامت ۰/۶ میلی متر در کوره الکتریکی در

دمای ۳۹۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت قرار گرفته و

سپس در محیط کوره خنک شده تا عملیات آنیلینگ بر روی



(پ)

(ب)

(الف)

شکل (۲): (الف) ابزار پس از هر بار کامل نمودن حلقه به میزان بار عمودی پایین رفته، (ب) ابزار همزمان با کامل نمودن حلقه به میزان یک چهارم گام عمودی در هر ضلع پایین می‌رود، (پ) ابزار همزمان با کامل نمودن حلقه ابزار عمق پیدا می‌کند با این تفاوت که عمق حلقه‌های ابتدایی بیشتر از عمق حلقه‌های انتهایی است.

گردد در طول هر ضلع ۰/۵ میلی متر ابزار به تدریج عمق پیدا می‌کند و به صورت حلقوی ابزار عمق ۱۵ میلی متر را در

محصول ایجاد می‌کند (مطابق شکل ۲- (ب)). در محصول ۴

به جای عمق دهی در هر ضلع ۰/۵ در حلقه‌های ابتدایی در هر

ضلع عمق بیشتری می‌یابد و عمق حلقه‌ها متفاوت می‌باشد.

(مطابق شکل ۲- (پ)). شکل ۳ نمونه‌ای از قطعات ساخته

شده را نشان می‌دهد.

جدول (۱): عمق دهی برحسب میلی متر در هر حلقه برای مسیر ابزار.

نوع محصول	حلقه ۱	حلقه ۲	حلقه ۳	حلقه ۴	حلقه ۵	حلقه ۶	حلقه ۷
محصول ۱	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱
محصول ۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳
محصول ۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳
محصول ۴	۴	۳	۲/۵	۲	۱/۵	۱	۱

مسیر ابزار در محصول ۱ با عمق ۱۰ میلی متر و در محصول ۲

با عمق *SID* میلی متر به صورت عمق دهی پله‌ای مطابق با شکل

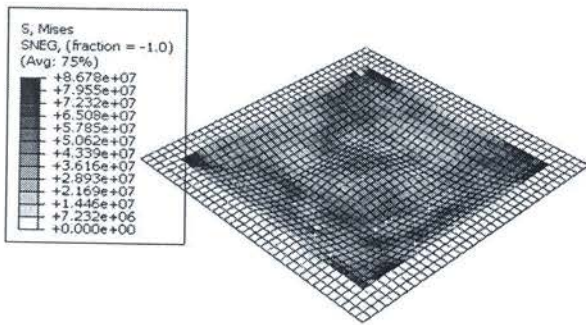
۲- (الف) می‌باشد. در محصول ۳ میزان عمق ۱۵ میلی متر بوده

با این تفاوت که بجای اینکه عمق دهی به صورت یکدفعه انجام

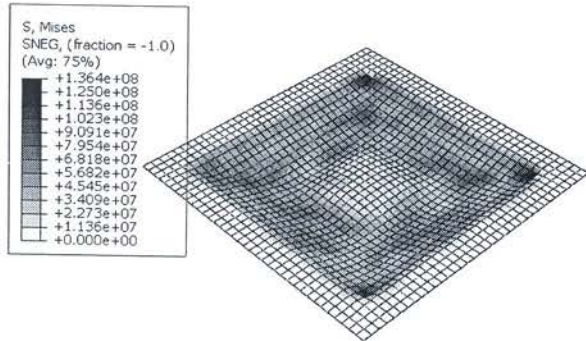
جدول (۲): خواص مکانیکی ورق Archigrid

نوع مواد	چگالی (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
آلومینیوم	۲۷۲۰/۶	۶۸۲۵۰	۰/۲۴	۳۹	۹۰
مس	۸۹۴۰/۶	۱۱۷۲۰۰	۰/۳۳	۵۰	۱۷۲

مشاهده تنشها براساس معیار فون میزز در قطعه شبیه‌سازی شده در محصول ۱ (عمق محصول ۱۰ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی پله‌ای) به صورت شکل ۵ می‌باشد.



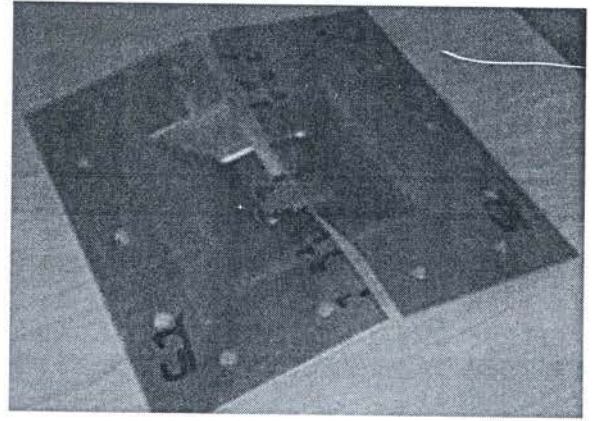
(الف)



(ب)

شکل (۵): تنش بر اساس معیار فون میزز در محصول با عمق ۱۰ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی پله‌ای (محصول ۱): (الف) ورق آلومینیوم، (ب) ورق مس.

حداکثر تنش محاسبه شده توسط نرم‌افزار در محصول ۱ برای آلومینیوم $8/67 \times 10^7$ Pa و $1/36 \times 10^8$ Pa برای مس می‌باشد. حداکثر تنش مذکور در آلومینیوم کمتر از مس می‌باشد. تنش براساس معیار فون میزز در محصول ۲ (محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی پله‌ای) در شکل ۶ نشان داده شده است که حداکثر آن $9/04 \times 10^7$ Pa برای آلومینیوم و $1/88 \times 10^8$ Pa برای مس است و ملاحظه می‌شود



شکل (۳): نمونه‌ای از قطعات هرمی ساخته شده.

قطعات تولید شده برای مقایسه از مقطع توسط وایرکات برش زده شده و اندازه ضخامت هریک از ورق‌ها پس از پولیش کاری سطح مقطع توسط میکروسکوپ اندازه‌گیری شد (شکل ۴).

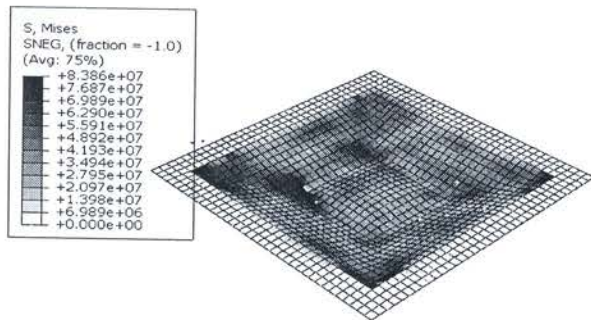
۵- شبیه‌سازی

فرایند مدل کردن شکل‌دهی افزایشی ورق، قطعه‌ای به شکل هرم ناقص توسط نرم‌افزار ABAQUS به صورت سه‌بعدی انجام پذیرفته شد. به جهت غیرخطی بودن و تغییر شکل‌های بزرگ مسئله از محیط Explicit نرم‌افزار که کدی دینامیک می‌باشد استفاده گردیده شد. در این مدل ورق دولایه آلومینیوم- مس عضو انعطاف‌پذیر و ابزار سرکروی صلب انتخاب شده و از رژیم تماسی صلب- انعطاف‌پذیر استفاده گردیده شد. المان انتخابی برای ابزار از نوع R3D4 و برای ورق S4R می‌باشد. برای شبیه‌سازی حرکت ابزار از شرایط مرزی استفاده شده و در مدل Step اقدام به تعریف حرکت ابزار با مسیرهای مختلف شد. از اثر پوشینگر و ناهمسانگردی ورق صرف‌نظر شده است. برای کسب اطلاع از بعضی از خواص مکانیکی ورق، بر روی نمونه‌ای از آن تست کشش انجام شد که نتایج آن مطابق جدول ۲ بوده و در نرم‌افزار هر دو قسمت الاستیک و پلاستیک مطابق تست اعمال گردید. میزان اصطکاک ۰/۰۴ بین سطوح تماسی ابزار و ورق تعریف گردیده است.

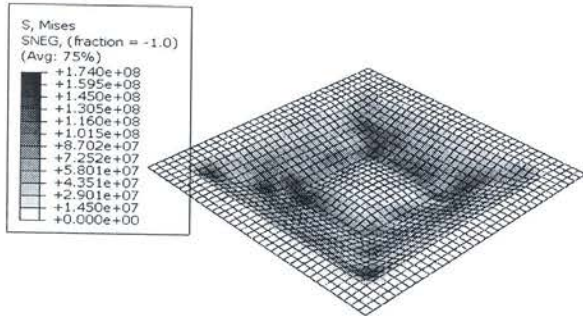


شکل (۴): میکروسکوپ اندازه‌گیری ضخامت.

آلومینیوم برای هر ۴ محصول می‌باشد. σ_{Hmax} نشانگر مقدار ماکزیمم تنش افقی یا تنش هم جهت با سطح ورق و σ_{Vmax} نشانگر مقدار ماکزیمم تنش عمودی یا تنش عمود بر سطح ورق می‌باشد. مقادیر ماکزیمم تنش در هر دو ورق در هنگام حرکت ابزار در بار دهی (عمودی) بیشتر از مقادیر ماکزیمم تنش در حرکت ابزار در طول مسیر حلقه می‌باشد. با مقایسه دو محصول ۲ و ۳ مشخص است که با تغییر مسیر ابزار از عمق‌دهی پله‌ای به عمق‌دهی حلقوی از مقادیر ماکزیمم تنش کاسته شده و انتظار می‌رود تا درصد کمتری از کاهش ضخامت در ورق داشته باشیم.



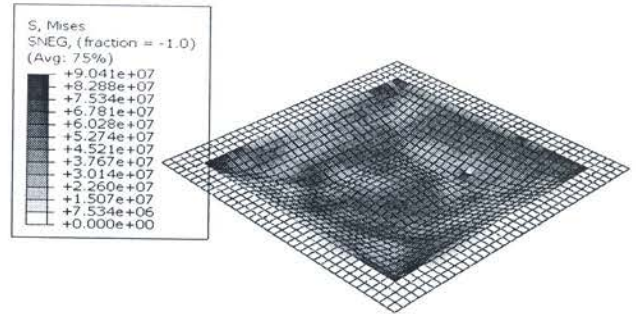
(الف)



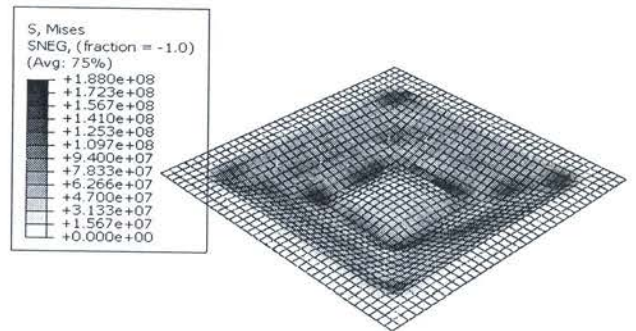
(ب)

شکل (۷): تنش بر اساس معیار فون میزز در محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی حلقوی (محصول ۳): (الف) ورق آلومینیوم، (ب) ورق مس.

که تنش‌ها در محصول ۲ یا با عمق بالاتر از محصول ۱ بیشتر می‌باشد و عمق محصول رابطه مستقیم با مقادیر تنش‌ها دارد. به طوری که رشد ۴ درصدی در حداکثر تنش فون میزز برای ورق آلومینیوم و رشد ۲۷ درصدی برای ورق مس مشاهده می‌گردد.



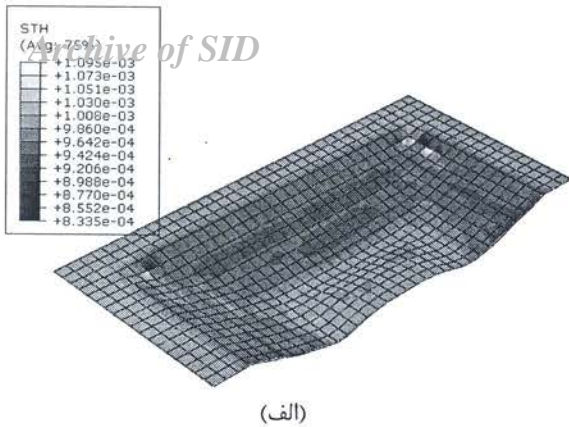
(الف)



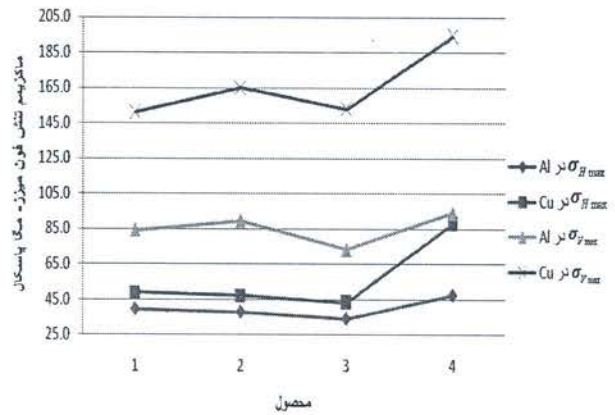
(ب)

شکل (۶): تنش بر اساس معیار فون میزز در محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی پله‌ای (محصول ۲): (الف) ورق آلومینیوم، (ب) ورق مس.

شکل ۷ نمایشگر تنش‌ها بر اساس معیار فون میزز در محصول ۳ (عمق ۱۵ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی حلقوی) است. حداکثر تنش برای آلومینیوم $8/38 \times 10^7$ Pa و برای مس $1/74 \times 10^8$ Pa است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداکثر تنش در محصول ۳ از محصول ۲ کمتر می‌باشد. به طوری که کاهش ۷ درصدی در ورق آلومینیوم و کاهش ۶/۴ درصدی در ورق مس مشاهده می‌گردد پس با تغییر مسیر ابزار می‌توان از مقادیر تنش‌ها کاست. در تمامی مراحل شکل‌دهی بالاترین تنش‌ها هنگام تماس ابزار سرکروی با ورق در حین شکل‌دهی می‌باشد. با حرکت بیشتر ابزار کروی به سمت پایین مقدار تنش‌ها افزایش خواهد یافت. شکل ۸ نمایشگر ماکزیمم تنش افقی و عمودی بر اساس معیار فون میزز در ورق مس و



(الف)



شکل (۸): ماکزیمم تنش فون میزز در جهات مختلف در ورق

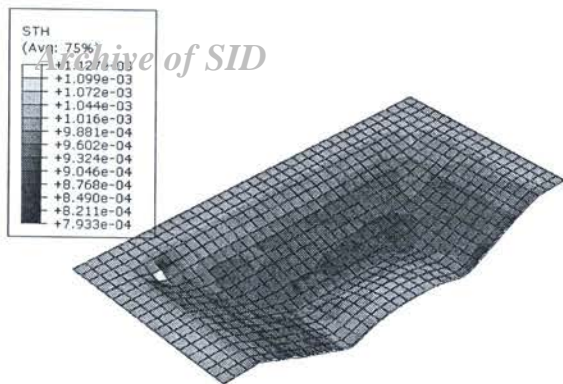
مس و آلومینیوم در هر ۴ محصول.

شکل ۹ تغییرات ضخامت در محصول ۱ (عمق محصول ۱۰ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی پله‌ای) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که درصد تغییرات ضخامت ورق در طول یال برای آلومینیوم ۸ درصد کاهش و برای ورق مسی ۸/۷ درصد کاهش می‌باشد. به جهت اینکه حداکثر تنش فون میزز در مس بیشتر از حداکثر تنش در آلومینیوم می‌باشد مس بیشتر دچار تغییر شکل گشته است. علت وقوع تغییرات در ضخامت ورق به خاطر تنش‌های موضعی می‌باشد که در هنگام شکل‌دهی از طرف ابزار بر روی ورق ایجاد می‌گردد به همین جهت در انتهای یال بیشترین افزایش درصد تغییرات مشاهده می‌گردد. از روش‌های کاهش پدیده تغییر ضخامت می‌توان به افزایش تعدد حلقه‌های مسیر یا کاهش عمق‌ها در هر گام، انتخاب مسیر ابزار بهینه، کاهش سرعت پیشروی، انتخاب قطر ابزار بهینه اشاره نمود.

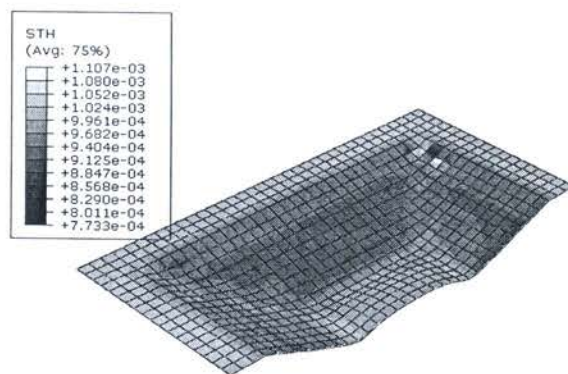
شکل ۱۰ تغییرات ضخامت در طول یال در محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی پله‌ای (محصول ۲) را نشان می‌دهد که در ورق آلومینیوم در حدود ۱۴/۴ درصد کاهش و در ورق مس ۱۸ درصد کاهش می‌باشد. در این محصول نسبت به محصول ۱ رشد حدود ۶/۴ درصدی برای آلومینیوم و ۸ درصدی برای مس مشاهده می‌گردد. پس با افزایش عمق محصول کاهش ضخامت بیشتر رخ می‌دهد که به جهت افزایش تنش‌ها می‌باشد.

شکل (۹): تغییرات ضخامت در محصول با عمق ۱۰ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی پله‌ای (محصول ۱): (الف) ورق آلومینیوم، (ب) ورق مس.

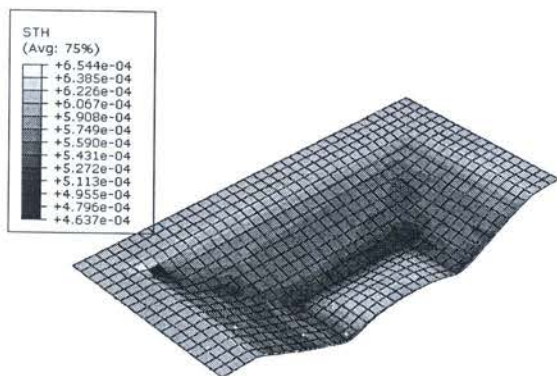
شکل ۱۱ تغییرات ضخامت در طول یال در محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی حلقوی (محصول ۳) را نشان می‌دهد که درصد تغییر ضخامت برای آلومینیوم ۹/۶ درصد کاهش و برای ورق مسی ۱۲ درصد کاهش نشان داده می‌شود. اما مشاهده می‌شود که با تغییر مسیر ابزار از عمق‌دهی پله‌ای به حلقوی کاهش ۴/۸ درصدی در تغییرات ضخامت در ورق آلومینیوم و کاهش ۶ درصدی در تغییرات در ورق مسی رخ داده است.



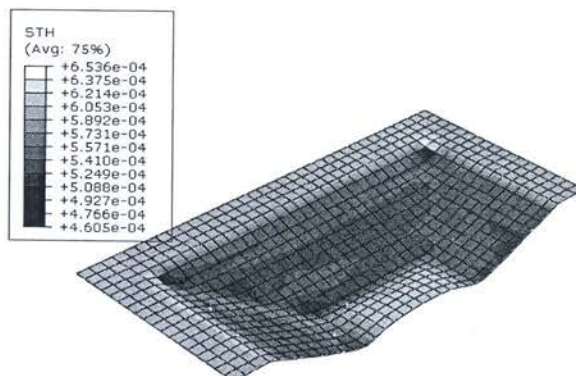
(الف)



(الف)



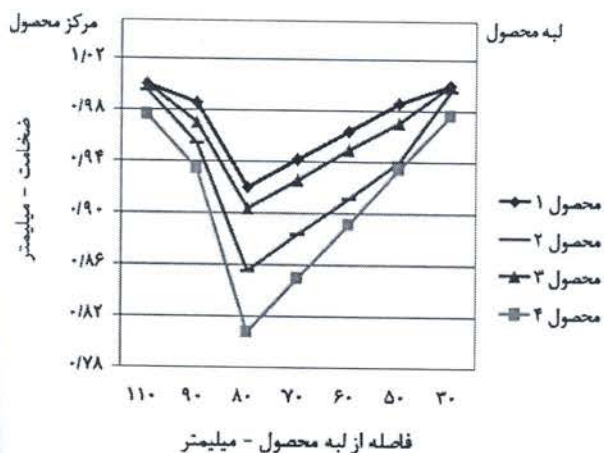
(ب)



(ب)

شکل (۱۱): تغییرات ضخامت در محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی حلقوی (محصول ۳): (الف) ورق آلومینیوم، (ب) ورق مس.

شکل (۱۰): تغییرات ضخامت در محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی پله‌ای (محصول ۲): (الف) ورق آلومینیوم، (ب) ورق مس.

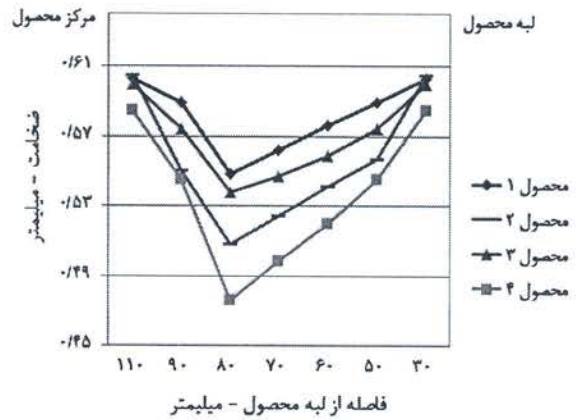
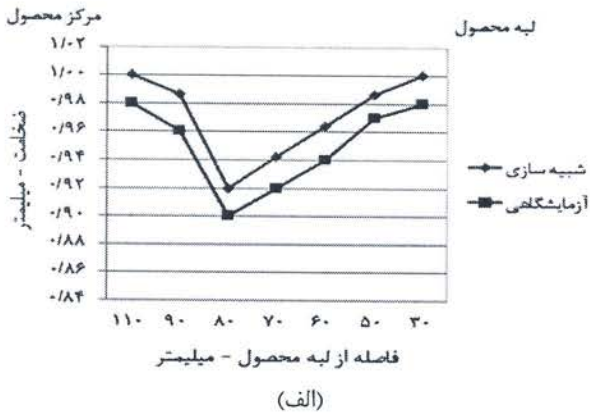


شکل (۱۲): تغییرات ضخامت در هر ۴ محصول به روش شبیه‌سازی در ورق آلومینیوم.

در یک مقایسه کلی در شکل ۱۲ تغییرات ضخامت برای آلومینیوم و شکل ۱۳ تغییرات ضخامت برای مس در هر ۴ محصول از شبیه‌سازی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود همان‌طور که انتظار کاهش درصد تغییرات ضخامت با عنایت به وضعیت تنش‌ها در محصول ۳ با عمق‌دهی حلقوی نسبت به عمق‌دهی پله‌ای یا محصول ۲ می‌رود، ضخامت ورق در این حالت عمق‌دهی کمتر کاهش یافته است. همچنین با افزایش عمق محصول کاهش بیشتری در ضخامت ورق به وقوع می‌پیوندد که در مقایسه بین محصول ۱ و ۲ مشخص است. محصول SID مناسب‌ترین ابزار نامناسب بیشترین کاهش ضخامت را داراست. این مسئله نشانگر آن است که انتخاب مسیر ابزار مسئله بسیار مهمی می‌باشد.

نازک شدگی ورق در مسیر ابزار حلقوی در اصل قابلیت

شکل‌پذیری ورق نیز افزایش یافته است.



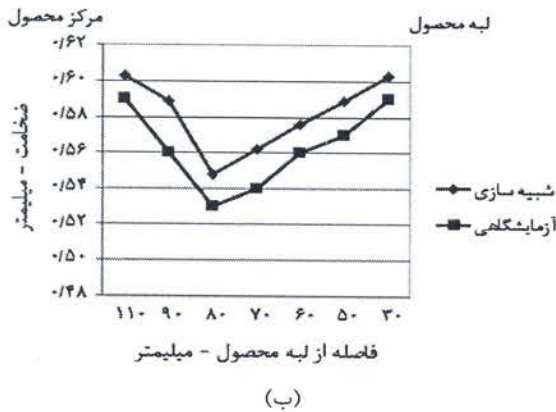
شکل (۱۳): تغییرات ضخامت در هر ۴ محصول به روش شبیه‌سازی در ورق مس.

۶- بررسی نتایج شبیه‌سازی و تجربی

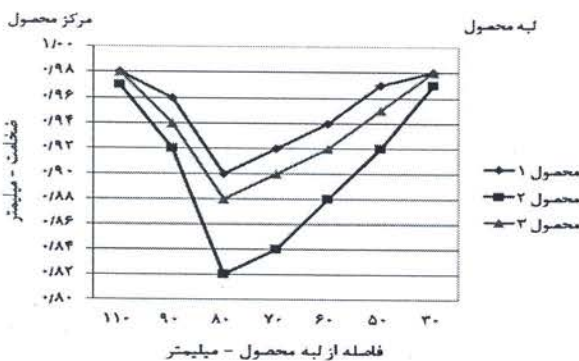
به منظور مقایسه شبیه‌سازی و صحت نتایج آن، همان‌طور که اشاره گردید کار عملی در این زمینه صورت گرفته است. شکل ۱۴ مقایسه ضخامت اندازه‌گیری شده طول یال محصول ۱ در حالت آزمایشگاهی و اندازه‌های حاصل از شبیه‌سازی برای ورق مس و آلومینیوم نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود میزان اختلاف نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در محصول ۱ برای ورق آلومینیوم از ۱/۶۵ تا ۲/۷ درصد و برای ورق مس از ۲/۲ تا ۵/۱۷ درصد می‌باشد که قسمتی از این اختلاف ناشی از عدم دقت وسایل اندازه‌گیری و احتمال بروز خطا در اندازه‌گیری و محاسبات می‌تواند باشد. شکل ۱۵ نتایج آزمایشگاهی ضخامت ورق برای آلومینیوم و شکل ۱۶ این تغییرات را برای ورق مس در سه محصول تولید شده با عمق ۱۰ میلی‌متر (محصول ۱) و عمق ۱۵ میلی‌متر (محصول ۲) و عمق ۱۵ میلی‌متر با مسیر ابزار عمق‌دهی حلقوی (محصول ۳) نشان می‌دهد. شکل ۱۷ نمونه مقاطع اندازه‌گیری شده در سه محصول را نشان می‌دهد.

در مقایسه با تحقیقات گذشته دیگر محققان بر روی ورق‌های تک لایه می‌توان به این نکات اشاره نمود، در تحقیقی که یاماشیتا و همکارانش [۱۴] در زمینه مسیرهای مختلف ابزار پرداختند با تغییر مسیر ابزار از حالت عمق‌دهی پله‌ای به عمق‌دهی حلقوی توزیع کرنش یکنواخت‌تر و کمتری برای محصول SID.ir مشاهده شد و این نشان می‌دهد که قابلیت شکل‌پذیری ورق تک لایه از جنس فولاد نیز افزایش یافته و مشابه نتایج حاصله در این مطالعه می‌باشد که با کاهش درصد

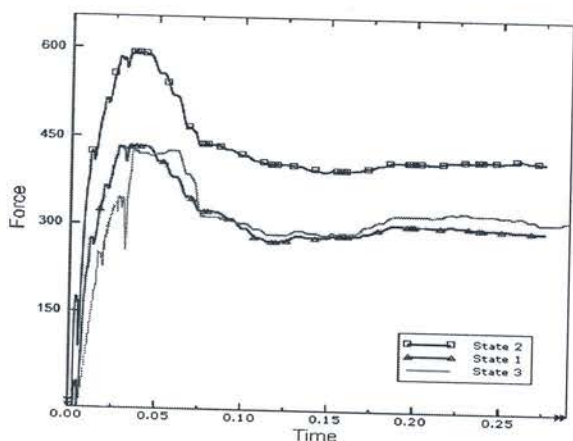


شکل (۱۴): مقایسه ضخامت ورق به روش شبیه‌سازی و روش تجربی در محصول ۱ (عمق ۱۰ میلی‌متر): (الف) ورق آلومینیوم، (ب) ورق مس.



شکل (۱۵): نتایج تجربی تغییرات ضخامت در محصول ۳ آلومینیوم.

نیروی مصرفی محصولات با مسیر ابزار مختلف را نشان می‌دهد. مقدار نیروی لازم در محصول با عمق ۱۰ میلی‌متر کمتر از مقدار نیروی لازم محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. از طرفی با اصلاح مسیر ابزار در همان محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر مقدار نیروی لازم بسیار کمتر می‌گردد.

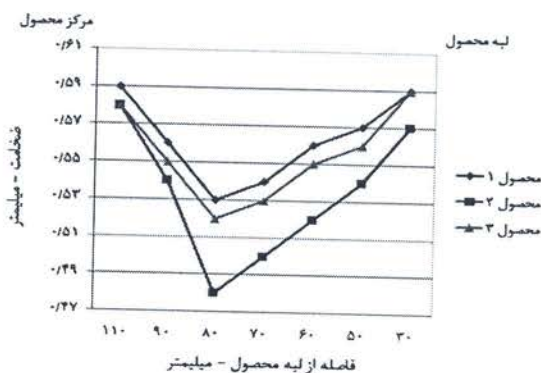


شکل (۱۸): منحنی نیرو برای محصولات شکل داده شده در سه حالت ساخته شده.

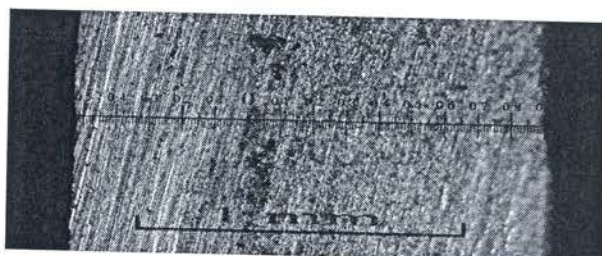
در آزمایشی که راجع و همکارانش [۱۵] بر روی ورق تک از جنس Al5086 نمودند نیز نتایج مشابهی دریافت شده است و مشخص گردید با انتخاب مسیر ابزار حلقوی مقدار نیروهای مصرفی که توسط دینامومتر ثبت گردیده است در قیاس با مسیر ابزار پله‌ای کاهش یافته است.

۸- نتیجه‌گیری

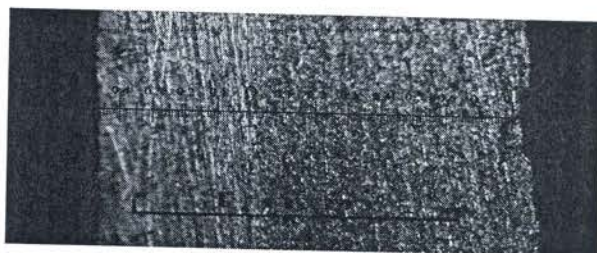
از مقایسه نتایج می‌توان دریافت خطای بین نتایج شبیه‌سازی و کار تجربی حدود ۱ تا ۷ درصد می‌باشد که قسمتی از این اختلاف ناشی از عدم دقت وسایل اندازه‌گیری و احتمال بروز خطا در اندازه‌گیری و محاسبات می‌تواند باشد. بیشترین میزان تغییر شکل در ورقی رخ می‌دهد که معمولاً بیشترین تنش‌ها را متحمل می‌گردد و میزان حد شکل‌پذیری یا نازک‌شدگی ورق‌ها در نمونه‌های تجربی از روند یکسانی نسبت به نتایج تجربی پیروی می‌کند. نزدیکی قابل قبول نتایج حاکی از صحت فرایند شبیه‌سازی و معیار به‌کار رفته مناسب جهت تعیین رفتار مکانیکی ورق می‌باشد. در مسیرهای متنوعی که مورد آزمایش قرار گرفت، هر جا که تنش‌های موجود در مسیر ابزار کاسته



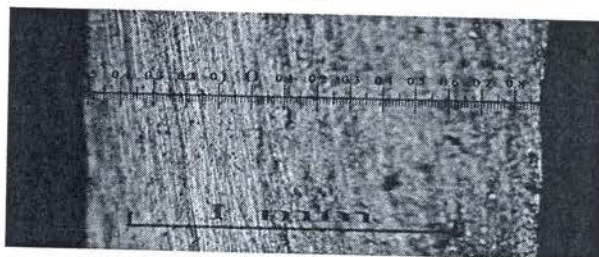
شکل (۱۶): نتایج تجربی تغییرات ضخامت در محصول ۳ در ورق مس.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۷): مقاطع ضخامت اندازه‌گیری شده: (الف) محصول با عمق ۱۰ میلی‌متر، (ب) محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر، (ج) محصول با عمق ۱۵ میلی‌متر و مسیر ابزار با عمق‌دهی حلقوی.

۷- بررسی نیروی شکل‌دهی

با به‌دست آوردن حداکثر نیروی لازم برای شکل‌دهی می‌توان فرایند شکل‌دهی را با موفقیت و بدون احتمال شکست ابزار به اتمام رساند. آنچه مسلم است نیروی عمودی از دو نیروی افقی برای قطعه هرمی شکل مذکور بیشتر است. شکل ۱۸ نتایج

- on Manufacturing Engineering, Birjand, Birjand University, 2009 (In Persian).
8. Karimi Taheri, A. and Naroee, K. "The Formability Studying of the Multi-Layers Sheet by Non-Liner Finite Element Method", 10th Congress of the Iranian Metallurgical Society, Mashhad, Ferdousi University, 2006 (In Persian).
 9. Rajabi, A. and Kadkhodiyani, M. "Studying the Shrinkage of the Metal-Composite Sheets in the Deep Drawing Process", 10th Conference of Iranian Aerospace Society, Tehran, Tarbiat Modares University, 2009 (In Persian).
 10. Molaee Dariyani, B., Sedighi, M. and Morovati Mameghani, M. "The Folding Simulation of the Two-Layer Sheet in Deep Drawing Process", 6th Annual Student Conference on Mechanical Engineering, Tehran, Amir Kabir University, 2009 (In Persian).
 11. Moslemi Naeeni, H., Nemati Faghir, A., Salmani Tehrani, M. and Azizi Tafti, R., "The Effect of Layers Thickness on the Spring Back in Cold Roll Forming Process of the Two Layer Sheets Metal", 20th Annual Conference on Mechanical Engineering, Shiraz, Shiraz University, 2012. (In Persian).
 12. Attanasio, A., Ceretti, E. and Giardini, C. "Optimization of Tool Path in Two Points Incremental Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, No. 1-3, pp.409-412, 2006.
 13. Cerro, I., Maidagan, E., Arana, J., Rivero, A. and Rodriguez, P.P. "Theoretical and Experimental Analysis of the Die Less Incremental Sheet Forming Process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, No. 1-3, pp.404-408, 2006.
 14. Yamashita, M., Gotoh, M. and Atsumi, S. "Numerical Simulation of Incremental Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol.199, No. 1-3, pp.163-172, 2008.
 15. Rauch, M., Hascoet, J., Hamann, J. and Plenel, Y. "Tool Path Programming Optimization for Incremental Sheet Forming Applications", Computer-Aided Design, Vol. 41, No. 12, pp.877-885, 2009.
 16. Kim, Y.H. and Park, J.J. "Effect of Process Parameters on Formability in Incremental Forming of Sheet Metal", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130-131, pp. 42-46, 2002.
 17. Cui, Z. and Gao, L. "Studies on Hole-Flanging Process Using Multistage Incremental Forming", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 2, No. 2, pp.124-128, 2010.
 18. Bambach, M. "Process Strategies and Modeling Approaches for Asymmetric Incremental Sheet Forming", PhD Thesis, Institute of Metal Forming, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2008.
 19. Allwood, J.M., Music, O., Raithathna, A. and Duncan, S.R. "Closed-Loop Feedback Control of Product Properties in Flexible Metal Forming

شده میزان کاهش ضخامت ورق آن مسیر کاهش یافته و یا به عبارتی میزان شکل‌پذیری در ورق افزایش می‌یابد. نیروی شکل‌دهی به طبع مسیر ابزار متغیر بوده و می‌توان با انتخاب بهینه مسیر در میزان آن کاهش داد. همچنین با افزایش عمق محصول افزایش تنش‌ها و در پی آن کاهش شکل‌پذیری در ورق‌ها را خواهیم داشت. همین‌طور نشان داده شد با عدم انتخاب صحیح بار دهی در مسیر ابزار افزایشی می‌توان نتایج حتی بدتر از عمق‌دهی پله‌ای دریافت نمود. تحلیل به روش اجزای محدود در این فرایند، کمک شایانی به دستیابی به تأثیر پارامترهای دیگر در این فرایند که نیاز به وقت و هزینه زیاد دارند می‌نماید.

۹-مراجع

1. Smith, L.M. and Celant, M. "Practical Handbook of Cladding Technology", CASTI Publishing, Alberta, pp. 3-45, 1998.
2. Lang, L., Danckert, J. and Nielsen, K.B. "Multi-Layer Sheet Hydro Forming: Experimental and Numerical Investigation into the very Thin Layer in the Middle", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 170, No. 3, pp.524-535, 2005.
3. Islam, M.D., Olabi, A.G. and Hashmi, M.S.J. "Feasibility of Multi-Layered Tubular Components Forming by Hydro Forming and Finite Element Simulation", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 174, No. 1-3, pp.394-398, 2006.
4. Bagher Zadeh, S. and Molaee Dariyani, B. "Determining the Critical Pressure in Hydro Mechanical Deep Drawing Process of Two-Layer Sheets Metal", 18th Annual Conference on Mechanical Engineering, Tehran, Sharif University, 2010 (In Persian).
5. Hung-Hsiou, H. and Gow-Yi, T. "Two Analytical Models of Double-Layer Clad Sheet Compression Forming Based on the Upper Bound and the Slab Methods", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, No. 1-3, pp.604-609, 2003.
6. Gow-Yi, T. and Ming-Nan, H. "Analytical Modified Model of the Cold Bond Rolling of Unbounded Double-Layers Sheet Considering Hybrid Friction", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, No. 1-3, pp.622-627, 2003.
7. Shakeri, M. and Molaee Dariyani, B. "Theoretical and Experimental Studying the Formability of the Two-Layer Sheets metal A11100-St12 by Equivalent Layer Model", 9th Iranian Conference

- Processes with Mobile Tools”, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol.58, No.1, pp.287–290, 2009.
20. Hemmati, B. and Farahani F. “Study of Incremental Sheet Forming and Simulation with FEM”, Second International Conference on Manufacturing Engineering, Tehran, Iran University of Science & Technology, 2007, (in Persian).
21. Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufloy, J. and Allwood, J. “Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal”, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol.54, No.2, pp.88–114, 2005.