



## اثر حرکت اصطکاکی ابزار بر دقت ابعادی و قابلیت شکل پذیری در فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای در سرعت‌های دورانی بالا

ابوالفضل طاهرخانی<sup>1</sup>، علی باستی<sup>2\*</sup>، نادر نریمانزاده<sup>3</sup>، علی جمالی<sup>2</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

\* رشت، صندوق پستی 3756، basti@guilan.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 12 شهریور 1395  
پذیرش: 30 آبان 1395  
ارائه در سایت: 08 دی 1395  
کلید واژگان:

شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای  
حرارت دهی موضعی  
سرعت دورانی ابزار  
دقت ابعادی

### چکیده

شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای<sup>1</sup> روشی نوین و انعطاف‌پذیر در تولید قطعات سه‌بعدی از ورق است. به‌علت ماهیت تغییر شکل موضعی در این فرایند، قابلیت شکل‌پذیری<sup>2</sup> نسبت به روش‌های سنتی بالاتر و نیروهای شکل‌دهی کمتر است. با این وجود دقت قطعات ساخته شده در این روش به علت برگشت فنری و همچنین خمش در نواحی مرزی پایین است. اخیراً فرایند شکل‌دهی تدریجی به کمک حرارت اصطکاکی موضعی توسعه پیدا کرده است. در این تحقیق اثر حرارت موضعی ایجاد شده توسط حرکت اصطکاکی ابزار در سرعت‌های دورانی بالا بر روی قابلیت شکل‌پذیری و دقت ابعادی در ورق‌هایی از جنس آلومینیوم 3105 با انجام یک سری از آزمایشات بررسی شده است. در این روش دمای ناحیه‌ی شکل‌دهی به علت تماس با ابزار دارای استحکام پایین و در سایر نواحی دارای استحکام بالا خواهد بود. در نتیجه نیروی وارده بر ورق در نواحی مرزی کاهش یافته و تغییر شکل پلاستیک نامطلوب کاهش می‌یابد. از طرفی با کاهش تنش تسلیم کرنش‌های الاستیک و در نتیجه برگشت فنری کمتر می‌شود. افزایش قابلیت شکل‌پذیری در اثر نرم شدن منطقه شکل‌دهی از دیگر نتایج این استراتژی می‌باشد. این ایده با ساخت قطعاتی با هندسه هرم ناقص در سرعت‌های دورانی 1000 تا 7000 RPM مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در سرعت‌های بالاتر از 3000 RPM قابلیت شکل‌پذیری و دقت ابعادی قطعات ساخته شده افزایش می‌یابد.

## Tool frictional stir effect on dimensional accuracy and formability in single point incremental forming at high rotational speeds

Abolfazl Taherkhani, Ali Basti\*, Nader Narimanzadeh, Ali Jamali

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

\* P.O.B. 3756 Rasht, Iran, basti@guilan.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 02 September 2016  
Accepted 20 November 2016  
Available Online 28 December 2016

#### Keywords:

Single point incremental forming  
Local heating  
Tool rotation speed  
Dimensional accuracy

### ABSTRACT

Single point incremental forming is a new and flexible method for 3D parts production of sheet metal. In this way, a hemispherical tool forms incrementally, the sheet being clamped in perimeter. Because of the nature of localized deformation in this process, the formability is higher and forming forces are lower as compared to traditional sheet metal forming process. However, in this method dimensional accuracy is somewhat low due to spring back and bending that occurs in boundaries. Recently, the incremental forming process using frictional heat has been developed. In this research, the experimental effect of generated heat by friction stir of the tool on dimensional accuracy in components of AA3105 sheet has been studied at high rotational speeds. By this method, due to friction movements of tool, the temperature of formation area rises while fixing the general temperature of sheet by spraying cooling liquid. Then, the sheet has low strength in contact region with tool while it has high strength in other areas. As a result, the force imposed on the sheet as well as the undesirable plastic deformation will decrease. Also, by decreasing the yielding stress, elastic strain and spring back decrease as well. An increase in formability because of softening of forming area is another contribution of this strategy. This idea has been studied via production of some parts of truncated-pyramid geometry and changing rotational speed from 1000 to 7000 RPM. The results show that at speed higher than 3000 RPM, formability and dimensional accuracy of the parts increase.

### 1-مقدمه

فلزی است که به‌علت ماهیت آن نیازی به ساخت قالب‌های پیچیده و گران‌قیمت نمی‌باشد. به همین دلیل هزینه و زمان تولید قطعات با تعداد

شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای روشی انعطاف‌پذیر برای شکل‌دهی ورق‌های

<sup>2</sup> formability

<sup>1</sup> Single point incremental forming

### Please cite this article using:

A. Taherkhani, A. Basti, N. Narimanzadeh, A. Jamali, Tool frictional stir effect on dimensional accuracy and formability in single point incremental forming at high rotational speeds, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 665-674, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله ذیل استفاده نمایید:

www.SID.ir

محدود در این روش پایین است. تجهیزات مورد نیاز این فرایند شامل یک ابزار ساده و صیقلی سر کرووی و یک قاب جهت گیره‌بندی ورق می‌باشد. ایده اولیه این روش کاملاً متفاوت از روش‌های سنتی است. هندسه نهایی قطعه با درگیری ابزار سر کرووی و ورق و طی مسیری مارپیچ متشکل از مقاطع مختلف قطعه و شکل‌دهی موضعی ورق به تدریج به دست می‌آید. حرکت ابزار و مسیر آن توسط یک ماشین فرز سه محوره کنترل عددی ایجاد می‌شود. نبود قالب پشتیبان باعث کاهش دقت قطعات ساخته شده در این روش می‌شود که مانع اصلی تجاری‌سازی این فرایند می‌باشد [1]. طبق تحقیقات انجام شده دقت ابعادی پایین یکی از مهمترین محدودیت‌های روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای می‌باشد. طبیعت بدون قالب این روش موجب می‌شود خطاهای هندسی برگشت فنری الاستیک و حرکت پلاستیک ناخواسته نواحی از ورق افزایش یابد [2]. خطای هندسی در SPIF به صورت فاصله‌ی بین نقطه‌ای از پروفایل قطعه‌ی تولید شده با نقطه متناظر از قطعه ایده‌آل می‌باشد. در "شکل 1" سه نوع خطای هندسی در قطعه‌ی نهایی نشان داده شده است: الف) خمش ورق در ناحیه‌ای از تماس اولیه ابزار در مجاورت صفحه پشتیبان، ب) بالا آمدن ورق به طوری که ارتفاع نهایی کمتر از مقدار طراحی است که برگشت فنری نامیده می‌شود، ج) اثر بالشی شدن در کف قطعه‌ی تولید شده. برگشت فنری که در بعد و حین شکل‌دهی رخ می‌دهد منبع اصلی خطا می‌باشد. برگشت فنری خود شامل برگشت فنری موضعی (در حین شکل‌دهی رخ می‌دهد)، برگشت فنری کلی (بعد از بی بار کردن و باز کردن ورق از قید بروز می‌کند) و برگشت فنری به علت برش زوائد می‌باشد [3].

علت اصلی خطا در این فرایند مربوط به تغییر شکل پلاستیک ناخواسته (خمش) در محل اتصال ورق به صفحه پشتیبان و نواحی مرزی و برگشت فنری حاصل از کرنش‌های الاستیک می‌باشد. برای به حداقل رساندن خطا در این فرایند به طور ایده‌آل می‌بایست در ناحیه شکل‌دهی، که با محدوده تماس ابزار و ورق مشخص می‌شود، ورق مقاومت تسلیم پایینی داشته باشد. از طرف دیگر در ناحیه اطراف شکل‌دهی باید ورق مقاومت تسلیم بالایی داشته تا پشتیبانی لازم را برای به دست آوردن دقت به عمل آورد [4]. این کار در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای با به کار بردن حرارت‌دهی موضعی قابل دستیابی است. لذا با استفاده از حرارت‌دهی موضعی می‌توان تنش تسلیم را

بررسی کردند. تمرکز اصلی غالب تحقیقات انجام گرفته بر روی افزایش قابلیت شکل‌پذیری از طریق انجام شکل‌دهی در حالت گرم می‌باشد. باید به این نکته توجه داشت که افزایش دمای قطعه موجب انبساط آن می‌شود و پس از اتمام فرایند شکل‌دهی با هم‌دم شدن قطعه با دمای محیط انقباض شدیدی روی می‌دهد که منبع ایجاد خطای ابعادی می‌گردد.

در این تحقیق اثر حرارت موضعی ایجاد شده حاصل از اصطکاک در محل تماس ابزار و ورق در سرعت‌های دورانی بالا بر روی تغییرات دمای ورق، قابلیت شکل‌پذیری و دقت ابعادی قطعات ساخته شده از آلیاژ آلومینیم 3105

بررسی کردند. تمرکز اصلی غالب تحقیقات انجام گرفته بر روی افزایش قابلیت شکل‌پذیری از طریق انجام شکل‌دهی در حالت گرم می‌باشد. باید به این نکته توجه داشت که افزایش دمای قطعه موجب انقباض شدیدی روی می‌دهد که منبع ایجاد خطای ابعادی می‌گردد.

بررسی کردند. تمرکز اصلی غالب تحقیقات انجام گرفته بر روی افزایش قابلیت شکل‌پذیری از طریق انجام شکل‌دهی در حالت گرم می‌باشد. باید به این نکته توجه داشت که افزایش دمای قطعه موجب انقباض شدیدی روی می‌دهد که منبع ایجاد خطای ابعادی می‌گردد.

بررسی کردند. تمرکز اصلی غالب تحقیقات انجام گرفته بر روی افزایش قابلیت شکل‌پذیری از طریق انجام شکل‌دهی در حالت گرم می‌باشد. باید به این نکته توجه داشت که افزایش دمای قطعه موجب انقباض شدیدی روی می‌دهد که منبع ایجاد خطای ابعادی می‌گردد.

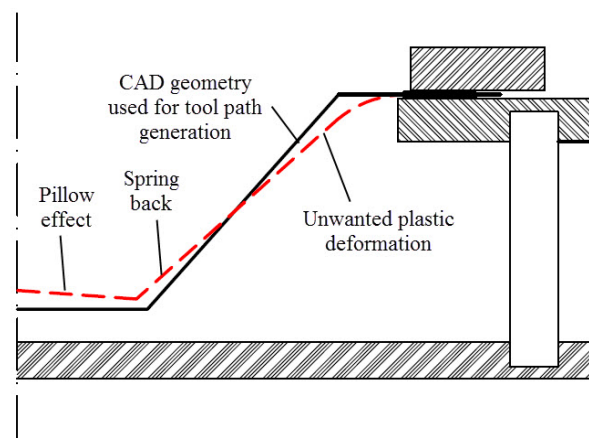


Fig.1 Types of geometrical errors during single point incremental forming [4]

شکل 1 انواع خطاهای هندسی به وجود آمده در حین شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای [4]

فنی را داشته باشد. برای ایجاد شرایط ذکر شده یعنی تنظیم تنش تسلیم و شکل‌پذیری خواص ماده ورق تحت تابعی از زمان و مکان می‌توان از حرارت‌دهی موضعی استفاده نمود. در اغلب فلزات با افزایش دما تنش تسلیم و نمای کرنش سختی کاهش یافته و قابلیت شکل‌پذیری افزایش می‌یابد [12,9]. به‌کارگیری حرارت‌دهی موضعی با استفاده از پرتو لیزر برای کاهش نیرو در ماشین‌کاری در تحقیقات [16,15] انجام شده است. همچنین دوفلو و همکاران حرارت‌دهی موضعی با استفاده از پرتو لیزر را برای افزایش قابلیت شکل‌پذیری و دقت ابعادی در شکل‌دهی تدریجی به‌کار بردند [12]. در این روش همزمان با حرکت ابزار شکل‌دهی توسط یک ربات از یک سمت ورق، یک پرتو لیزر نیز به‌منظور افزایش دما به سمت دیگر ورق تابانده می‌شود و منبع آن توسط یک سیستم کنترل عددی حرکت می‌کند. در این صورت دمای ورق به صورت موضعی افزایش یافته و استحکام تسلیم پایین می‌آید، لذا کرنش‌های الاستیک و در نتیجه برگشت فنی کاهش پیدا نموده و دقت ابعادی افزایش پیدا کرد. استفاده از این روش نیاز به تجهیزات پیشرفته و گران‌قیمت دارد، لذا در این تحقیق استفاده از حرارت به‌وجود آمده ناشی از اصطکاک بین ابزار و ورق در اثر حرکت چرخشی ابزار در سرعت‌های دورانی بالا پیشنهاد شده است.

بخش اصلی از گرمای به‌وجود آمده در این روش ناشی از اصطکاک بین ابزار و ورق می‌باشد. حرارت اصطکاکی به‌وجود آمده در نقطه‌ای مانند  $i$  در محل تماس ابزار و قطعه کار به‌صورت ساده با معادله (1) بیان می‌شود که در آن  $f_i$  نیروی اصطکاک،  $V_i$  سرعت خطی در نقطه تماس،  $t_i$  زمان تماس بین ابزار و ورق،  $r_i$  شعاع متناظر در نقطه تماس،  $\omega$  سرعت دورانی ابزار و  $v$  سرعت پیشروی ابزار شکل‌دهی می‌باشند.

$$Q_i = f_i V_i t_i = f_i (r_i \omega + v) t_i \quad (1)$$

از رابطه فوق می‌توان دریافت که در سرعت‌های دورانی بالا پیشروی نقش قابل توجهی در حرارت ایجاد شده ناشی از اصطکاک ندارد [17]. با این حال تحقیقات زاهدی و همکاران [18] نشان می‌داد در سرعت‌های دورانی پایین افزایش پیشروی تا حدی که موجب افت شرایط اصطکاکی در منطقه تماس نشود موجب سوق فرایند به سمت شکل‌دهی گرم شده و باعث افزایش زاویه حد شکل‌دهی می‌گردد. با توجه به تحقیقات انجام شده امکان محاسبه ضریب اصطکاک به‌صورت تحلیلی وجود ندارد به‌علت این‌که نیروی افقی تنها نشان‌دهنده نیروی اصطکاکی نیست و شامل نیروی شکل‌دهی نیز می‌باشد. برای محاسبه ضریب اصطکاک در سرعت‌های زیر 1000 RPM از رابطه (2) استفاده می‌شود که بیان‌کننده نسبت اجزای نیروی افقی و نیروی عمودی است که در نقطه موقعیت وسط آزمایش شکل‌دهی شیار در هر پاس به‌دست می‌آید.

$$\mu^* = \frac{f_H}{f_z} = \frac{\text{friction} + \text{forming load}}{|f_z|} \quad (2)$$

که در آن  $f_H$  نیروی افقی و  $f_z$  نیروی عمودی در نقطه وسط هر مسیر در آزمایش شکل‌دهی شیار می‌باشد [19]. باید توجه کرد که  $\mu^*$  تنها از شرایط اصطکاکی تعیین نمی‌شود و به سایر موارد مانند سخت شدن ماده و هندسه قطعه نیز بستگی دارد. مقادیر  $\mu^*$  در سرعت‌های مختلف بالای 1000 دور بر دقیقه به‌علت متغیر بودن شرایط اصطکاکی متفاوت خواهد بود. همچنین در سرعت‌های بالای 1000 دور بر دقیقه به‌علت وقوع سطوح مختلفی از نرم شدن ماده  $\mu^*$  نمی‌تواند اثرات اصطکاکی را بیان نماید [9].

بررسی شده است. تمرکز اصلی کار حاضر بررسی اثر حرارت اصطکاکی به‌وجود آمده در سرعت‌های دورانی بالا بر دقت ابعادی قطعات شکل‌داده شده می‌باشد که در تحقیقات قبلی به آن پرداخته نشده است. آزمایشات تجربی نشان می‌دهد حرارت ایجاد شده می‌تواند موجب افزایش قابلیت شکل‌پذیری و دقت ابعادی قطعات تولید شده گردد.

## 2- شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای با حرارت‌دهی موضعی

با توجه به هندسه قطعه، نبود تکیه‌گاه موضعی برای ورق در حال شکل‌دهی می‌تواند موجب تغییر شکل پلاستیک ناخواسته در مناطق نزدیک تماس ابزار گشته و موجب کاهش دقت ابعادی شود. به‌طور ایده‌آل برای این فرایند ترکیبی از خواص ماده و تنش‌های اعمالی باید به گونه‌ای باشد که تنش ماده در محدوده‌ای که مستقیماً تحت اثر ابزار نیست از تسلیم عبور نکند تا تغییر شکل پلاستیک ناخواسته روی ندهد. برای این منظور نیروهای شکل‌دهی، ضخامت ورق و خواص ماده از جمله فاکتورهای مهم هستند [12]. تاثیر پارامترهای کنترلی مانند قطر ابزار و اندازه گام عمودی بر روی نیروهای بین ابزار و قطعه در [14,13] شرح داده شده است. کنترل فرایند توسط تنظیم پارامترهای کنترلی هرچند موجب کاهش قابلیت فرایند می‌شود تاثیر محدودی بر روی نیروهای شکل‌دهی دارد. از طرفی تغییر ضخامت و جنس ورق زمانی که ساخت یک قطعه کاربردی با ویژگی‌های مشخص مدنظر باشد جز درجات آزادی فرایند نمی‌باشد. با در نظر گرفتن شرایط فوق راه حلی خلاقانه ارائه شده است: خواص مکانیکی ورق باید به‌صورت ساختار سفت با مقاومت تسلیم بالا در زمانی که تغییر شکلی مدنظر نیست باشد، و در زمان تغییر شکل در محدوده تماس ابزار و ورق باید مقاومت پایین، یا به‌طور ایده‌آل رفتار کاملاً پلاستیک داشته باشد.

به عبارت دیگر وقتی ورق در معرض تغییر شکل نمی‌باشد باید مقاومت تسلیم بالایی نشان دهد، تا تغییر شکل پلاستیک محدودی متحمل شده و پشتیبانی لازم و کافی را برای نواحی مجاور که در حال شکل‌دهی می‌باشد را تامین نماید. همچنین همان ورق زمانی که تحت بارگذاری قرار می‌گیرد تا تدریجاً تغییر شکل یابد می‌بایست مقاومت تسلیم پایین و شکل‌پذیری بالا داشته باشد تا به‌طور ایده‌آل پس از عبور ابزار و بی بار شدن حداقل برگشت

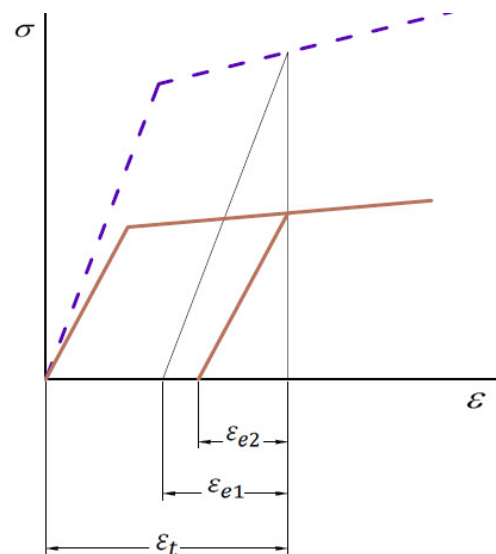


Fig. 2 Schematic representation of the dependence of elastic strain to yield stress

شکل 2 نمایش شمانیک وابستگی کرنش الاستیک به تنش تسلیم

### 3- تجهیزات آزمایشگاهی

ورق‌هایی از آلایز آلومینیم 3105 با ابعاد 160mm×160mm و ضخامت 1mm به‌عنوان نمونه تهیه شده و جهت یکنواخت کردن ساختار مکانیکی آنیل شدند. ساختار شیمیایی آلایز به کار رفته در جدول 1 آورده شده است. برای داشتن شرایط مشابه در شکل‌دهی راستای نورد ورق همیشه در جهت محور Y ماشین CNC نگه‌داشته می‌شود. این کار در مرحله اندازه‌گیری روی دستگاه اندازه‌گیری مختصات نیز انجام می‌شود تا قطعات در شرایط مشابه اندازه‌گیری گردند. برای تعیین خواص مکانیکی ورق، نمونه‌هایی را تحت زوایای 0°، 45° و 90° نسبت به راستای نورد براساس استاندارد ASTM(E8M) تهیه و در دستگاه تست کشش انیورسال مدل (GOTECH, AL-7000 LA30) با سرعت ثابت 1 میلی‌متر بر دقیقه تا حد شکست کشیده شدند. مشخصات مکانیکی آلایز به کار رفته در جدول 2 آورده شده است. از آنجا که انتظار می‌رود دمای ورق در حین فرایند شکل‌دهی در اثر سرعت‌های دورانی مختلف تفاوت داشته باشد و در نتیجه این تفاوت دما، رفتار مکانیکی ورق متغیر و وابسته به دما گردد، بنابراین بررسی خواص مکانیکی ورق AA3105 در دماهای بالا دارای اهمیت خواهد بود. برای بررسی رفتار مکانیکی ورق در دماهای بالا روی همان دستگاه کشش از کوره دولنگه‌ای سه ناحیه‌ای ساخت شرکت آذر کوره و دقت دمایی 2 درجه سانتی‌گراد استفاده گردید. به‌منظور تصحیح اختلاف دمای محیط کوره و نمونه یک ترموکوپل بر روی طول نشانه‌گذاری شده نمونه نیز چسبانده شد. نمونه‌هایی تهیه کرده در دمای اتاق، 100، 150، 200 و 250 درجه سانتی‌گراد تا حد پارگی کشیده شدند. در "شکل 3" نمودار تنش کرنش AA3105 در دماهای مختلف نشان داده شده است. تنش تسلیم و نمای کرنش سختی استخراج شده از نمودارهای تنش کرنش در دماهای بالا در "شکل‌های 4 و 5" آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تا دمای 150 درجه سانتی‌گراد تغییر چندانی در مقادیر تنش تسلیم و نمای کرنش سختی دیده نمی‌شود که به معنی عدم نرم شدن ورق تا این دماست. ولی با افزایش دما از 150 تا 250 درجه سانتی‌گراد تنش تسلیم کاهش می‌یابد. همچنین به‌علت ایجاد پدیده تبلور مجدد نمای کرنش سختی نیز کاهش یافته که منجر به نرم‌تر شدن ورق می‌گردد. همان‌طور که در "شکل 6" دیده می‌شود هندسه مورد آزمایش هرم ناقص با قاعده مربعی 140mm×140mm و ارتفاع 50mm می‌باشد. تغییر شکل ناخواسته پلاستیک در نواحی مجاور منطقه تغییر شکل، به‌علت دارا بودن

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق AA3105

Table 1 Chemical composition of AA 3105			
درصد وزنی	ترکیب شیمیایی	درصد وزنی	ترکیب شیمیایی
0.26	Si	96.65	Al
0.08	V	0.2	Cr
0.34	Zn	0.24	Cu
0.1	Ga	0.72	Fe
		0.62	Mg
		0.69	Mn

جدول 2 خواص مکانیکی آلومینیم AA3105

Table 2 Mechanical properties of AA 3105	
2700	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
99.5	تنش تسلیم (MPa)
0.195	توان کرنش سختی
69	مدول الاستیسیته (GPa)
0.33	ضریب پواسان

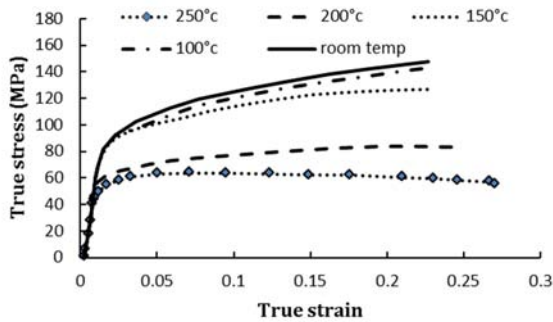


Fig. 3 Stress strain curve for AA 3105 at different temperatures

شکل 3 نمودار تنش کرنش AA3105 در دماهای مختلف

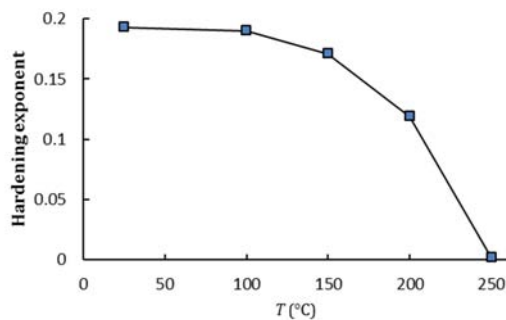


Fig. 4 Strain hardening exponent versus temperature relation for AA 3105

شکل 4 ارتباط نمای کرنش سختی با دما برای AA3105

سطوح بالای تنش، از دیگر دلایل اصلی منابع ایجاد خطا می‌باشد. به ویژه در مجاورت مستقیم شیب‌های تند این پدیده به وضوح دیده می‌شود [20]. برای بررسی اثر حرارت‌دهی موضعی بر تغییر شکل پلاستیک ناخواسته اندازه فضای داخلی صفحه پشتیبان 160mm×160mm در نظر گرفته شده در نتیجه نواری با هندسه مربع و عرض 10 میلی‌متر بدون پشتیبانی شکل داده می‌شود. برای ایجاد حرارت اصطکاکی در سرعت‌های بالا ابزار شکل‌دهی با قطر بزرگتر به‌علت تولید حرارت بیشتر ترجیح داده می‌شود [9]. البته استفاده از ابزار با قطر بزرگتر موجب کاهش قابلیت شکل‌پذیری می‌گردد [21]. همچنین افزایش قطر موجب بیشتر شدن برگشت فنری می‌شود [22]. در اغلب تحقیقات قطر ابزار شکل‌دهی بین 4 تا 12 میلی‌متر متغیر می‌باشد. ابزار شکل‌دهی سر کروی با قطر 9 میلی‌متر از فولاد spk با استاندارد 1.2080 برای این تحقیق انتخاب گردید که در "شکل 7" نشان داده شده است.

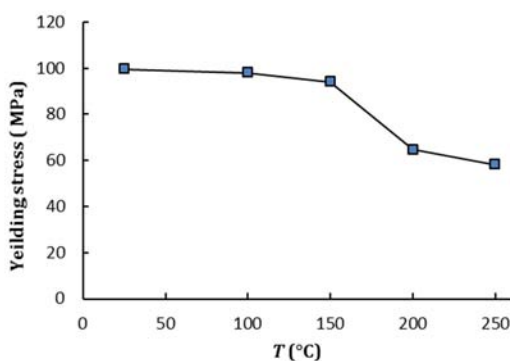


Fig. 5 Yielding stress versus temperature relation for AA 3105

شکل 5 ارتباط تنش تسلیم با دما برای AA3105



در کار حاضر نیز مورد استفاده واقع شد. هر چند به کار بردن سرعت‌های دورانی بالاتر باعث افزایش دمای موضعی قطعه و در نتیجه بنا بر استدلال بیان شده در مقدمه می‌باید موجب افزایش دقت ابعادی گردد ولی در صورت عدم خنک‌کاری، دمای کلی ورق افزایش یافته و پس از اتمام فرایند با هم‌دما شدن دمای قطعه با دمای محیط قطعه منقبض شده و موجب کاهش شدید دقت ابعادی می‌گردد. اندازه گیری قطعات حاصل از شکل‌دهی قطعه بدون استفاده از مایع خنک‌کاری این را ثابت می‌کند.

لذا همان‌طور که در "شکل 12" نشان داده شده است برای ثابت نگاه داشتن دمای کلی ورق از خنک‌کاری توسط مایع خنک‌کاری مورد کاربرد در ماشین‌کاری از پشت ورق هم‌زمان با شکل‌دهی استفاده می‌شود. ارتفاع



Fig. 7 hemispherical head tool with 9 mm diameter

شکل 7 ابزار سرکروی با قطر 9 mm

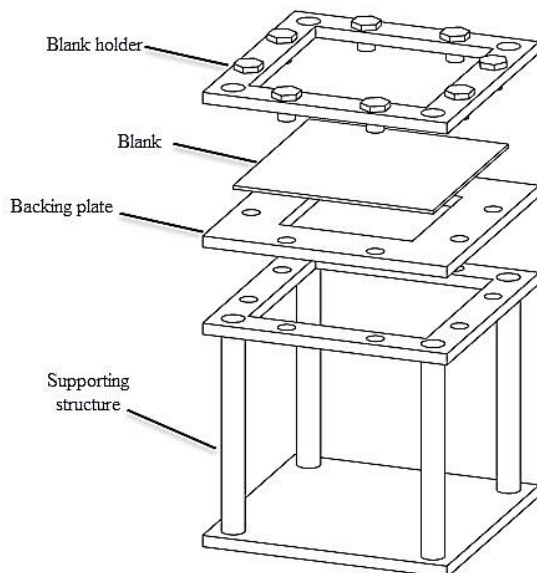


Fig. 8 Sheet clamping mechanism for single point incremental forming  
 شکل 8 مکانیزم گیره‌بندی ورق در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای



Fig. 9 Three axis CNC milling for incremental forming  
 شکل 9 ماشین فرز کنترل عددی سه محوره مورد استفاده در شکل‌دهی تدریجی

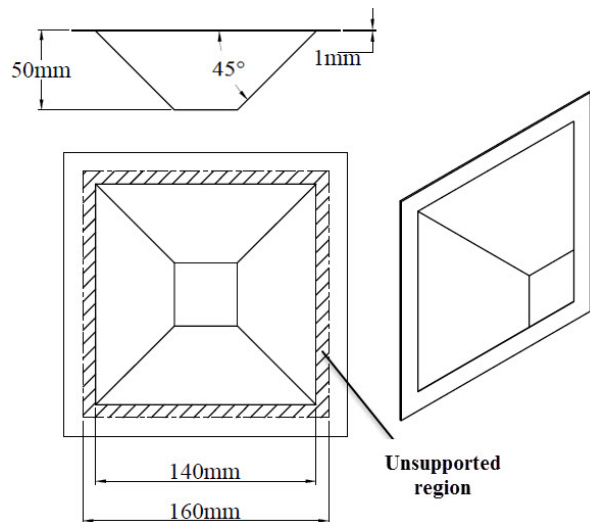


Fig. 6 Tested pyramid dimensions and unsupported region

شکل 6 ابعاد هرم مورد آزمایش و ناحیه بدون پشتیبان

برای مقید کردن ورق مکانیزم گیره‌بندی دارای فضای کاری 250mm×250mm با قابلیت نصب صفحات مختلف پشتیبان ساخته شده است که در "شکل 8" نشان داده شده است. برای انجام فرایند دستگاه سنتر CNC سه محور مدل VMC850 که سرعت دورانی اسپیندل آن حداکثر تا 8000 دور بر دقیقه قابل افزایش است به کار رفته است (شکل 9). شکل‌دهی ورق در یک مرحله با حرکت مرکز ابزار در مسیر مارپیچ به دست آمده از نرم‌افزار پاورمیل انجام می‌شود. اندازه گام عمودی  $\Delta z = 0.5\text{mm}$  و پیشروی  $f=200$  میلی‌متر بر دقیقه بوده که تا انتهای فرایند ثابت می‌باشد. ولی به علت موضوع تحقیق، سرعت‌های دورانی 1000، 3000، 5000 و 7000 RPM مورد آزمایش قرار گرفتند. همان‌طور که در "شکل 10" نشان داده شده است برای اندازه‌گیری دما کلی قطعه از ترموکوپل استفاده شد که در مرکز ورق نصب گردید. اگرچه ترموکوپل دمای مرکز و پشت ورق را نشان می‌دهد ولی شاخص مناسبی برای نشان دادن حرارت تولید شده و دمای کلی ورق می‌باشد. تغییر درجه حرارت در امتداد ضخامت بسیار کم می‌باشد [7]. ترموکوپل دمای مرکز ورق را نشان می‌دهد ولی برای بررسی دقیق‌تر اثر حرارت تولید شده بر فرایند تغییر شکل ورق نیاز است دمای ناحیه تماس ابزار و ورق ( محل شکل‌دهی موضعی) اندازه‌گیری گردد. برای این کار از یک دستگاه دماسنج مادون قرمز استفاده می‌شود "شکل 11". این دماسنج تشعشعات مادون قرمزی که از اجسام پراکنده می‌گردد را اندازه گرفته و برحسب دما کالیبره می‌کند. در این دماسنج از یک پرتو لیزر جهت مشخص نمودن دقیق موضع اندازه‌گیری دما استفاده می‌شود. باید به این نکته توجه داشت که پشت ورق آلومینیومی که دارای سطح صیقلی می‌باشد قبل از فرایند شکل‌دهی رنگ‌آمیزی گردد تا تشعشع یکنواختی ایجاد شود. قدرت تشخیص این دماسنج  $0.1^\circ\text{C}$  بوده و زمان پاسخ آن کمتر از 0.5 ثانیه می‌باشد و همان‌طور که در "شکل 11" نشان داده شده است وقتی بر روی یک هدف قفل می‌شود علاوه بر نمایش لحظه‌ای دما بیشینه دمای اندازه گرفته شده را در یک اندازه‌گیری نمایش می‌دهد. با توجه به سرعت پایین پیشروی ابزار که 200 mm/min انتخاب شده است در فواصل زمانی تقریباً مساوی دماسنج بر روی موضع شکل‌دهی هدف‌گیری و بیشینه دمای نمایش داده شده ثبت می‌شود. نیاز است در حین شکل‌دهی منطقه تماس با استفاده از یک ماده مناسب روان‌کاری گردد. در تحقیق میرنیا و همکاران [23] از روغن هیدرولیک جهت کاهش اصطکاک استفاده گردید که

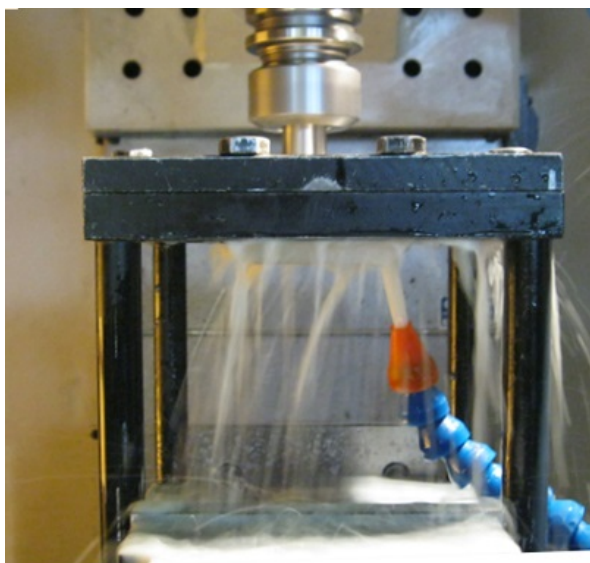


Fig. 12 Spraying a cooling liquid to the back of the plate to keep the overall temperature of the part

شکل 12 پاشش مایع خنک کننده از پشت ورق ثابت نگه داشتن دمای کلی قطعه

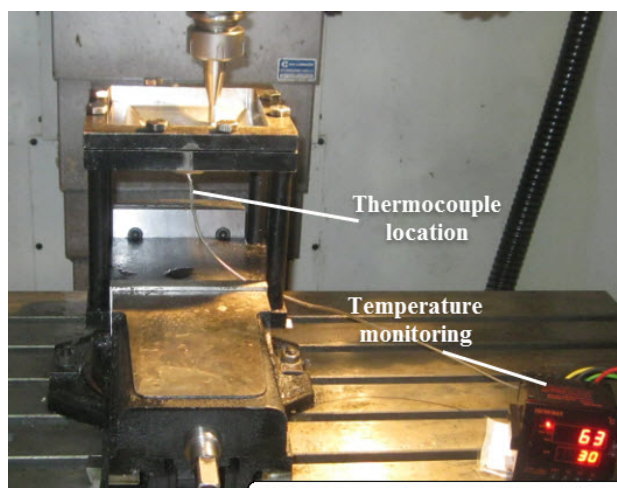


Fig. 10 The location of thermocouple for measuring the temperature of part center

شکل 10 محل نصب ترموکوپل برای اندازه گیری دمای مرکز قطعه

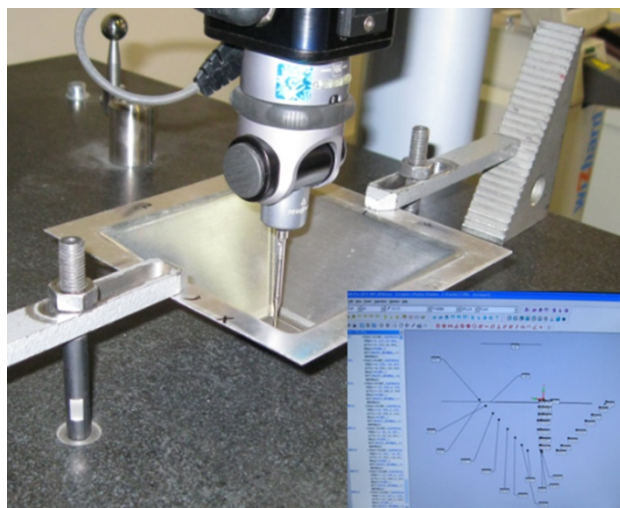


Fig. 13 Measuring formed part using coordinate measuring machine

شکل 13 اندازه گیری قطعه شکل داده شده به وسیله ماشین اندازه گیری مختصات



Maximum detected temperature



Fig. 11 Infrared thermometer to measure forming location temperature

شکل 11 دماسنج مادون قرمز برای اندازه گیری موضع شکل دهی

که در آن ارتفاع نقطه اندازه گیری شده،  $Z_i^*$  ارتفاع نقطه مورد انتظار،  $Z_{ave}$  میانگین ارتفاع اندازه گیری شده و  $N$  تعداد نقاط اندازه گیری شده است.

#### 4- نتایج و بحث

##### 1-4- اندازه گیری دما

در "شکل 14" و "شکل 15" به ترتیب دماهای اندازه گیری شده در حین فرایند برای سرعت‌های دورانی 1000، 3000، 5000 و 7000 دور بر دقیقه توسط ترموکوپل و دماسنج مادون قرمز نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در هر دو نمودار با گذشت زمان دما افزایش می یابد. علت این موضوع اشباع ظرفیت حرارتی ورق می باشد [7]. در مراحل اولیه شکل دهی سرعت افزایش دما پایین است. علت این امر عدم نفوذ کافی ابزار در ورق و در نتیجه کم بودن سطح درگیری ابزار و ورق می باشد که موجب تولید کم حرارت می شود. با ادامه فرایند و افزایش سطح درگیری دمای موضع شکل دهی و دمای کلی ورق به طور پیوسته افزایش یابد. هر چند همان طور که

قطعات ساخته شده توسط دستگاه اندازه گیری مختصات مدل TESA در مقطعی عمود بر راستای نورد ورق که از مرکز قطعه می گذرد در 26 نقطه اندازه گیری می شود. در "شکل 13" نمونه ای از اندازه گیری قطعه توسط دستگاه اندازه گیری مختصات نشان داده شده است. اندازه خطا در هر نقطه برابر اختلاف ارتفاع بین قطعه تولید شده و قطعه مورد انتظار خواهد بود. مقادیر میانگین و حداکثر خطا از روابط زیر به دست می آید:

$$e_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i - Z_i^*| \quad (3)$$

$$e_{max} = \max |Z_i - Z_i^*| \quad (4)$$

اندازه‌گیری دمای محل تماس ابزار و ورق به علت پاشش مایع روان کار وجود ندارد می‌توان قابلیت شکل‌پذیری ورق را در شرایط شکل‌دهی در سرعت دورانی بالا همراه با استفاده از مایع خنک‌کننده بررسی نمود. حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی و عمق شکست به‌عنوان شاخص‌هایی برای بیان قابلیت شکل‌پذیری ماده در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای به کار می‌روند [24]. حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی بزرگترین زاویه شکل‌یافته در یک قطعه بدون خرابی و شکست است [25]. بنابر تحقیقات دونگایی و همکاران [9] به کار بردن سرعت دورانی بالا موجب افزایش موضعی دما و در نتیجه افزایش قابلیت شکل‌پذیری می‌شود. بخشی از افزایش قابلیت شکل‌پذیری مربوط به کاهش استحکام ماده در دمای بالا و بخشی دیگر مربوط به کاهش نمای کرنش سختی در نتیجه تبلور مجدد ریزساختار ماده در دماهای بالا می‌باشد. بنابراین در صورتی که قابلیت شکل‌پذیری ورق در فرایند شکل‌دهی در سرعت‌های دورانی بالا توأم با استفاده از مایع خنک‌کننده افزایش یابد می‌توان نتیجه گرفت که با ثابت نگه‌داشتن دمای کلی ورق با استفاده از مایع خنک‌کننده همچنان دمای موضعی ورق به اندازه کافی افزایش یافته است. برای محاسبه حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی تعدادی قطعه تحت زوایای مختلف با ثابت نگه داشتن سایر شرایط و به ترتیبی که در جدول 3 نشان داده شده است تولید می‌شوند.

در "شکل 16" زاویه‌ای که در آن شکست مشاهده شود به‌عنوان حداکثر زاویه شکل‌دهی در نظر گرفته می‌شود. براساس جدول 3 حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی برای آلومینیم 3105 در سرعت دورانی 1000 RPM و گام 1mm،  $64.5^\circ$  می‌باشد. در "شکل 17" حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی برحسب سرعت دورانی به کار رفته نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی اسپیندل، حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی افزایش می‌یابد. کمترین مقدار زاویه قابل شکل‌دهی مربوط به سرعت دورانی 1000 RPM و بیشترین زاویه قابل شکل‌دهی برابر  $69.5^\circ$  مربوط به سرعت دورانی 7000 RPM می‌باشد. یکی از معیارهای شکل‌پذیری در شکل‌دهی تدریجی، میزان حداکثر عمق شکل‌دهی در یک زاویه ثابت است [26]. عمق نوک ابزار که در آن شکست رخ می‌دهد به‌عنوان عمق شکست تعریف می‌شود [9]. همان‌طور که در "شکل 18" نشان داده شده است برای بررسی تاثیر سرعت‌های دورانی مختلف بر عمق شکست هرماهایی با زاویه  $69.5^\circ$  در سرعت‌های دورانی مختلف ساخته می‌شود. در "شکل 19" حداکثر عمق شکست برای سرعت‌های دورانی مختلف آورده شده است. به‌طور کلی با افزایش سرعت دورانی حداکثر عمق شکست افزایش می‌یابد و در سرعت دورانی 7000 RPM هرم تا حداکثر ارتفاع ممکن شکل داده می‌شود. نکته قابل توجه افزایش ناگهانی عمق شکست در سرعت‌های دورانی بالاتر از 5000 RPM می‌باشد. با مراجعه به "شکل 15" مشاهده می‌شود که دمای محل تماس ابزار و ورق در سرعت 5000 RPM در حدود  $180^\circ\text{C}$  می‌باشد که براساس "شکل 4" در این دما علاوه بر کاهش استحکام نمای کرنش سختی نیز کاهش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با بررسی هر دو معیار قابلیت شکل‌پذیری می‌توان نتیجه گرفت افزایش سرعت دورانی به‌خصوص در محدوده سرعت دورانی 5000 RPM تا 7000 RPM موجب افزایش قابلیت شکل‌پذیری گردیده است. لذا می‌توان استدلال نمود علی‌رغم ثابت نگه‌داشتن دمای کلی ورق با به‌کارگیری مایع خنک‌کننده دمای محل تماس ورق و ابزار به اندازه‌ای که نیاز است تا استحکام ورق کاهش یابد افزایش یافته است.

#### 3-4- دقت ابعادی

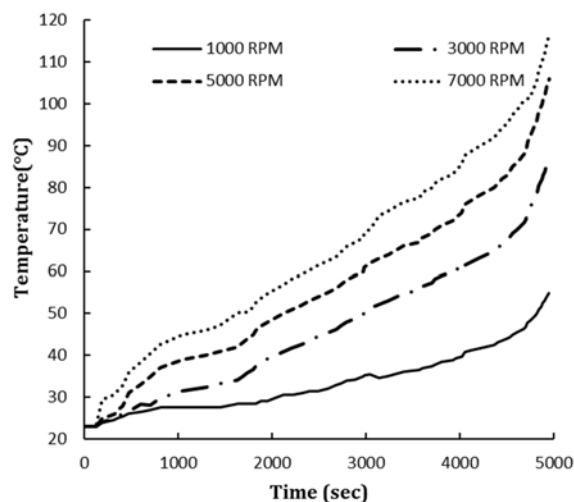


Fig. 14 Thermocouple temperatures recorded at different tool rotation speeds

شکل 14 دماهای ثبت شده توسط ترموکوپل در سرعت‌های دورانی مختلف ابزار

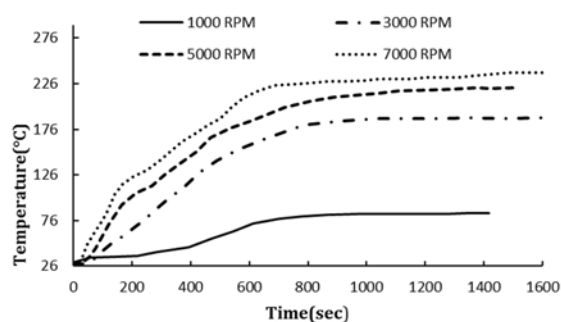


Fig. 15 Temperatures recorded by infrared thermometer at different tool rotation speeds of forming position

شکل 15 دماهای ثبت شده توسط دماسنج مادون قرمز از موضع شکل‌دهی در سرعت‌های دورانی مختلف ابزار

در "شکل 15" دیده می‌شود بعد از گذشت حدود 600 ثانیه در همه سرعت‌ها نوعی پایداری دما دیده می‌شود که نشان‌دهنده تعادل حرارت تولید شده در اثر اصطکاک و حرارت خارج شده از ورق می‌باشد. بدیهی است در سرعت‌های بالاتر حرارت اصطکاکی بیشتری تولید شده و دمای ثبت شده توسط ترموکوپل و دماسنج بالاتر است. همچنین همان‌طور که در "شکل 14" دیده می‌شود در انتهای فرایند به‌علت نزدیکی محل درگیری ابزار و ورق با مرکز قطعه که محل اتصال ترموکوپل است نرخ افزایش دما بسیار زیاد است. نکته قابل توجه شیب کم نمودار در سرعت‌های 1000 و حتی 3000 دور بر دقیقه می‌باشد. علت این موضوع نسبت پایین حرارت تولید شده در اثر اصطکاک به حرارت خارج شده از قطعه می‌باشد. از طرف دیگر در سرعت‌های 5000 و 7000 دور بر دقیقه حرارت موضعی ایجاد شده در اثر کار اصطکاک از حرارت‌های اتلافی از طریق تابش ماده و جریان هم‌رفتی به هوای اطراف بیشتر بوده، لذا شیب نمودارهای مربوطه بیشتر است.

#### 4-2- بهبود قابلیت شکل‌پذیری

همان‌طور که قبلاً ذکر شد جهت جلوگیری از افزایش کلی دمای قطعه و در نتیجه اثرات انقباضی ناشی از سرد شدن در طی فرایند شکل‌دهی از پاشش مایع خنک‌کننده در پشت ورق استفاده می‌شود. با توجه به این که امکان



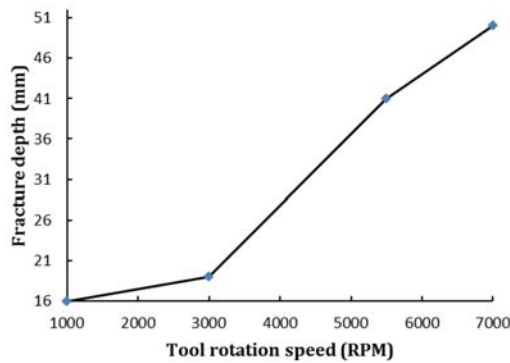


Fig. 19 Fracture depth at different tool rotation speeds

شکل 19 عمق شکست در سرعت‌های دورانی مختلف

در "شکل 20" مقطع سطح داخلی قطعه مورد انتظار، قطعه تولید شده در سرعت معمولی (1000 RPM) و قطعه تولید شده در سرعت دورانی بالا (7000 RPM) نشان داده شده است. همان‌طور که در جز A مشاهده می‌شود خمیدگی بین ورق تغییر شکل داده نشده و لبه بالای قطعه تولید شده در سرعت‌های دورانی بالا نسبت به قطعه مشابه تولید شده در سرعت دورانی پایین کاهش یافته است. این نتیجه مورد انتظار در تطابق با تحقیقی است که دفلو و همکاران [12] با به‌کارگیری حرارت‌دهی موضعی ناشی از تابش پرتو لیزر بر پشت ورق و همزمان با شکل‌دهی ورق انجام دادند. با توجه به مطالعات دونگایی و همکاران برابند نیروهای وارد بر ابزار از معادلات (5) و (6) به‌دست می‌آید:

$$F_r^2 = F_{in-plane}^2 + F_z^2 \quad (5)$$

$$F_{in-plane}^2 = F_x^2 + F_y^2 \quad (6)$$

که در آن  $F_x$  و  $F_y$  به ترتیب مولفه‌های نیرو در جهت  $x$  و  $y$  برابند این نیروها در صفحه  $xy$  و  $F_z$  مولفه نیرو در جهت محور  $z$  می‌باشد. به‌علت تقارن قطعه  $F_x$  و  $F_y$  با یکدیگر برابر بوده و تنها اختلاف فاز دارند. با افزایش سرعت دورانی ابزار تمامی مولفه‌های نیرو و در نتیجه نیروی برابند وارد بر ابزار کاهش می‌یابد [9]. علت این کاهش با مراجعه به "شکل‌های 4، 5 و 15" توضیح داده می‌شود.

با افزایش سرعت دورانی حرکت نسبی بین ابزار شکل‌دهی و ورق افزایش یافته و حرارت اصطکاکی تولید شده افزایش می‌یابد. در نتیجه همان‌طور که از "شکل 4 و 5" مشاهده می‌شود با افزایش دمای ورق در آزمایش تست کشش به  $150^\circ\text{C}$  تنش تسلیم کاهش پیدا کرده و ورق تا حدی نرم می‌شود. با افزایش بیشتر دما علاوه بر کاهش تنش تسلیم نمای کرنش سختی نیز کاهش پیدا کرده و ورق بیشتر نرم می‌گردد که موجب کاهش مولفه‌های نیروی وارد بر ابزار می‌گردد. لذا می‌توان نتیجه گرفت با کمک حرارت‌دهی موضعی ورق نرم‌تر می‌شود و این نرم شدن موجب کاهش نیروهای وارد شده به ورق در محل تماس با ابزار و همچنین در محل تماس با صفحه پشتیبان می‌گردد. در نتیجه کاهش نیروی وارد بر ورق در محل تماس با صفحه پشتیبان تغییر شکل ناخواسته نیز کاهش می‌یابد. در قسمت دیواره شیب‌دار (جز B) نیز همان‌طور که انتظار می‌رود با توجه به کاهش تنش تسلیم که در نتیجه حرارت تولید شده در اثر اصطکاک است مقدار کرنش الاستیک کاهش می‌یابد. با کاهش کرنش الاستیک برگشت فنی کاهش یافته و دقت ابعادی افزایش می‌یابد. دیواره تولید شده در سرعت بالاتر به هندسه ایده‌آل نزدیکتر است. این کاهش محسوس پدیده برگشت فنی و در نتیجه کاهش خطا اثر مفید به‌کارگیری حرارت‌دهی موضعی را در بهبود دقت ثابت می‌کند.

جدول 3 نتایج آزمایشی تعیین حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی در سرعت دورانی 1000 RPM

Table 3 Experimental results for maximum formable angle determination at 1000 RPM tool rotation speed

مشاهده شکست	زاویه شکل‌دهی (درجه)
خیر	55
خیر	60
بله	65
خیر	64
خیر	64.5

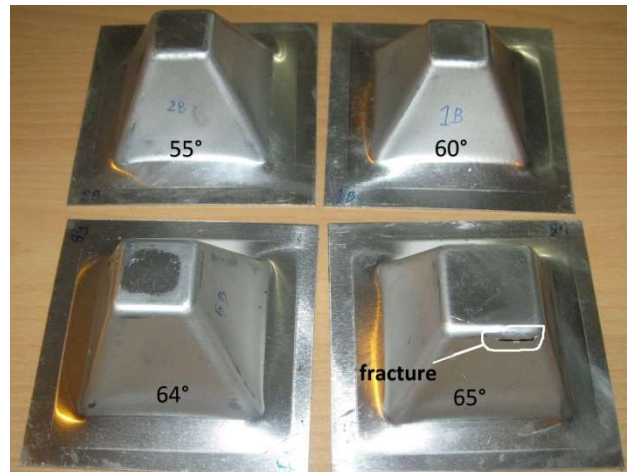


Fig. 16 Formed parts for determination of maximum formable angle at 1000 RPM tool rotation speed

شکل 16 قطعات شکل داده شده برای تعیین حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی در سرعت دورانی 1000 RPM

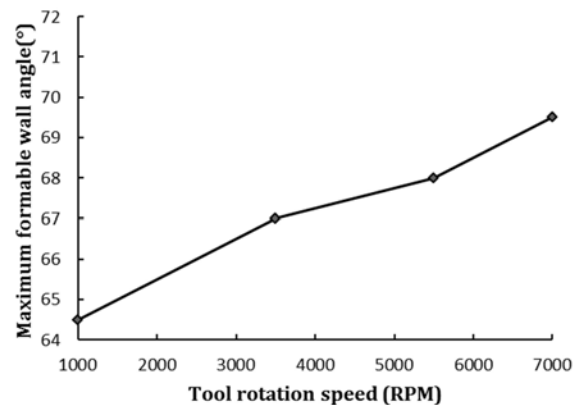


Fig. 17 Maximum formable angle at different tool rotation speeds

شکل 17 حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی در سرعت‌های دورانی مختلف ابزار

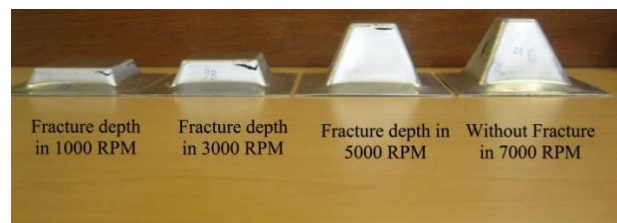


Fig. 18 Formed parts for fracture depth determination at different tool rotation speeds

شکل 18 قطعات تولید شده برای تعیین عمق شکست در سرعت‌های دورانی مختلف



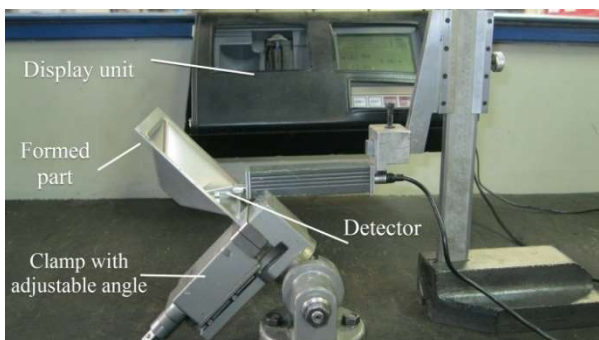


Fig. 22 Experimental setup for surface roughness measurement

شکل 22 تجهیزات آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری زبری سطح

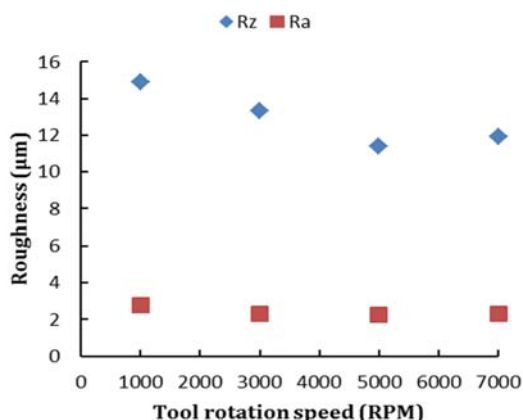


Fig. 23 Surface roughness of formed parts at different tool rotation speeds

شکل 23 زبری سطح قطعات تولید شده در سرعت‌های دورانی مختلف

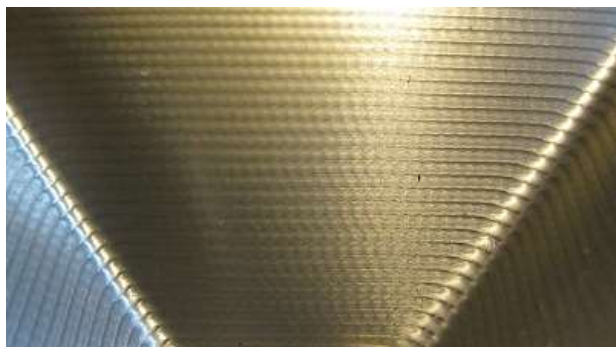


Fig. 24 Surface roughness of formed part at tool rotation speed of 1000 RPM

شکل 24 زبری سطح قطعه تولید شده در سرعت دورانی 1000 RPM



Fig. 25 Surface roughness of formed part at tool rotation speed of 5000 RPM

شکل 25 زبری سطح قطعه تولید شده در سرعت دورانی 5000 RPM

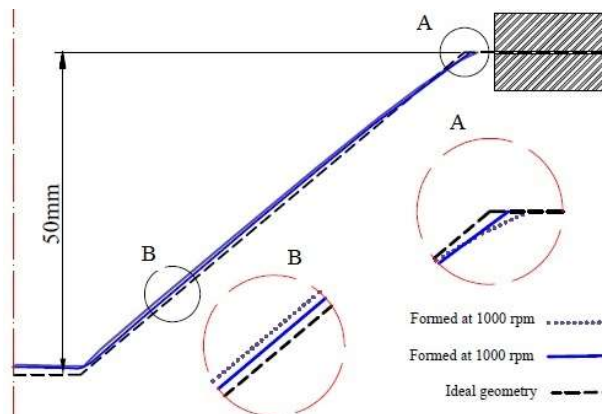


Fig. 20 Section view of cad geometry and inner surface of formed parts at 1000 RPM and 7000 RPM tool rotation speeds

شکل 20 نمایش مقطع سطح داخلی قطعه مورد انتظار و قطعات تولید شده در سرعت‌های دورانی 1000 RPM و 7000 RPM

در "شکل 21" میانگین و بیشینه خطای اندازه‌گیری شده در سرعت‌های مختلف آورده شده است. بیشینه خطای اندازه‌گیری شده در جز A اتفاق می‌افتد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش سرعت دورانی به ویژه در سرعت‌های بالاتر از 5000 RPM خطای ابعادی قطعه کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش خطا در سرعت دورانی 7000 RPM و به اندازه 33 درصد بوده که مقدار قابل توجهی می‌باشد.

#### 4-4- کیفیت سطح

برای بررسی تاثیر سرعت دورانی ابزار بر کیفیت سطح زبری سطح قطعات تولید شده توسط دستگاه زبری‌سنج میتوتویو مدل SJ301 که در "شکل 22" نشان داده شده است با دو معیار  $R_z$  و  $R_a$  اندازه‌گیری شد. در "شکل 23" نتایج اندازه‌گیری شده زبری سطح آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی تا 5000 RPM مقادیر  $R_z$  و  $R_a$  تا حدی کاهش می‌یابند ولی افزایش بیش از آن تاثیر چندانی بر کیفیت سطح ندارد. به لحاظ هندسی سرعت دورانی ابزار ارتباطی با ارتفاع پستی و بلندی‌های قطعات شکل داده ندارد. در "شکل‌های 24 و 25" به ترتیب کیفیت سطح قطعات فرم داده شده در سرعت دورانی 1000 RPM و 5000 RPM نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مسیر حرکت ابزار پستی و بلندی‌هایی دیده می‌شود که اندازه آن‌ها در قطعه شکل داده شده در سرعت دورانی 1000 RPM بزرگتر به نظر می‌رسد. علت این موضوع والنگی بسیار کم ابزار شکل دهی می‌باشد.

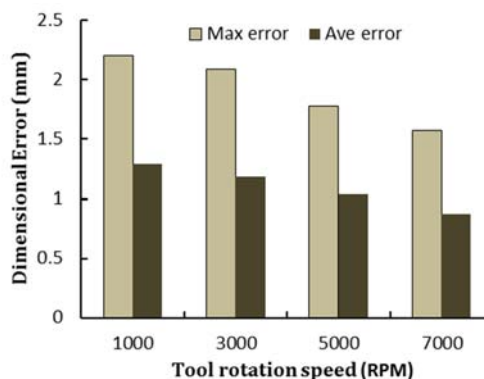


Fig. 21 Average and maximum of measured error values

شکل 21 مقادیر میانگین و بیشینه خطای اندازه‌گیری شده

## 5- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر سرعت‌های دورانی بالای ابزار شکل دهی بر قابلیت شکل پذیری و دقت ابعادی در فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای به‌طور آزمایشی بررسی گردید. مشاهده شد به کارگیری سرعت‌های دورانی بالای 3000 RPM برای ابزار باعث افزایش حرارت اصطکاکی تولید شده در محل تماس با ورق شده که در نتیجه آن دمای موضعی ورق نیز افزایش می‌یابد. البته آزمایشات اولیه نشان داد برای رسیدن به دقت ابعادی بالاتر با استفاده از این روش ضرورت دارد دمای کلی قطعه در حین فرایند با استفاده از مایع خنک‌کاری ثابت نگاه داشته شود تا از انقباض قطعه پس از اتمام فرایند جلوگیری گردد. نرم شدن موضع در حال شکل‌گیری در حالی که سایر نواحی ورق ساختار سفت دارند نتیجه انجام فرایند شکل‌دهی در سرعت‌های دورانی بالا می‌باشد. در این صورت نیروهای وارده بر ابزار و در نتیجه نیروی وارده بر ورق در محل تماس آن با صفحه پشتیبان کاهش یافته و تغییر شکل ناخواسته کاهش یافت. همچنین پایین آمدن موضعی استحکام ورق موجب کاهش کرنش‌های الاستیک شده و در نتیجه برگشت فتری در دیواره شیب‌دار نیز به نحو چشمگیری کاهش یافت. بیشترین کاهش خطای ابعادی در سرعت دورانی 7000 RPM به میزان 33 درصد نسبت به سرعت دورانی معمولی 1000 RPM که شکل‌دهی در آن تقریباً در دمای محیط انجام می‌گیرد مشاهده شد. همچنین مشاهده شد حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی و عمق شکست به‌عنوان معیارهای قابلیت شکل‌پذیری علی‌رغم ثابت نگاه داشتن دمای کلی ورق با استفاده از مایع خنک‌کاری افزایش پیدا کردند که ثابت می‌کرد دمای موضعی ورق در حال شکل‌گیری علی‌رغم پاشش مایع خنک‌کاری از پشت ورق به اندازه‌ی لازم برای نرم کردن ورق افزایش پیدا کرده است.

## 6- مراجع

- [9] D. Xu, W. Wu, R. Malhotra, J. Chen, B. Lu, 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 & Manufacture* Vol. 73, pp. 37–46, 2013.
- [10] M. Otsu, M. Yasunagab, M. Matsuda, K. Takashima, Friction stir incremental forming of A2017 aluminum sheets, *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 2318-2323, 2014.
- [11] G. Ambrogio, L. Filice, F. Gagliardi, Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming, *International Journal of Materials in Engineering Applications*, Vol. 34, pp. 501- 508, 2012.
- [12] J. R. Dufloy, B. Callebaut, J. Verbert, H. De Baerdemaeker, Improved SPIF performance through dynamic local heating, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 48, No.5, pp. 543–549, 2008.
- [13] J. R. Dufloy, A. Szekeres, P. Vanherck, Force measurements for single point incremental forming: an experimental study, *Proceedings of the 11th International Conference on Sheet Metal*, Erlangen, pp. 441–448, 2005.
- [14] J. R. Dufloy, Y. Tunc-kol, Force modelling for single point incremental forming, *Proceedings of the Ninth ESAFORM Conference on Material Forming*, Glasgow, pp. 287–290, 2006.
- [15] D. Heyon Kim, C. Lee, A study of cutting force and preheating-temperature prediction for laser-assisted milling of Inconel 718 and AISI 1045 steel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71, pp. 264-274, 2014.
- [16] J. C. Rozzia, F. E. Pfefferkorna, F. P. Incroperab, Y. C. Shina, Transient, three-dimensional heat transfer model for the laser assisted machining of silicon nitride: I. Comparison of predictions with measured surface temperature histories, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43. No. 8, pp. 1409–1424, 2000.
- [17] D. Xu, B. Lu, T. Cao, J. Chen, H. Long, J. Cao, A comparative study on process potentials for frictional stir and electric hot assisted incremental sheet forming, *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 2324 – 2329, 2014.
- [18] A. Zahedi, B. Mollaei-Dariani, M. R. Morovvati, Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 1-8, 2015. (in Persian فارسی)
- [19] M. Durante, A. Formisano, A. Langella, F. C. Minutolo, The influence of tool rotation on an incremental forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 9, pp. 4621–4626, 2009.
- [20] J. R. Dufloy, B. Lauwers, J. Verbert, Y. Tunckol, H. De Baerdemaeker, Achievable accuracy in single point incremental forming: case studies, *Proceedings of the Eighth ESAFORM Conference on Material Forming*, Cluj Napoca, pp. 675–678, 2005.
- [21] M. B. Silva, P. S. Nielsen, N. Bay, P. A. F. Martins, Failure mechanism in single point incremental forming of metals, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 9, pp. 893–903, 2011.
- [22] H. Mohammadi Najafabadi, A.A. Atai, M. Sharifinia, Numerical and Experimental Investigation of Incremental Sheet Metal Forming Parameters and Multi-objective Optimazation Using Neural-genetic Algoritm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 167-174, 2014. (in Persian فارسی)
- [23] M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 262-270, 2015. (in Persian فارسی)
- [24] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Dufloy, J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 623–649, 2005.
- [25] M. Ham, J. Jeswiet, Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp.241-244, 2006.
- [26] A. H. Nikdooz, M. Mirnia, H. Baseri, Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two stage incremental sheet forming, *Journal of Modares Mechanic Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 210-220, 2016. (in Persian فارسی)
- [1] J. Allwood, G. King, J. Dufloy, A structured search for applications of the incremental sheet forming process by product segmentation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 219, No. 2, pp. 239–244, 2005.
- [2] J. R. Dufloy, B. Callebaut, J. Verbert, H. De Baerdemaeker, Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, No.1, pp. 273–276, 2007.
- [3] O. Lasunon, W. Knight, Comparative investigation of single point and double-point incremental sheet metal forming processes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221 No. 12, pp. 1725-1732, 2007.
- [4] G. Ambrogio, V. Cozza, L. Filice, F. Micari, An analytical model for improving precision in single point incremental forming, *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 191, No. 1–3, pp. 92–95, 2007.
- [5] P. Lehtinen, T. Väisänen, M. Salmic, The effect of local heating by laser irradiation for aluminum, deep drawing steel and copper sheets in incremental sheet forming, *15th Nordic Laser Materials Processing Conference, Nolamp 15*, Lappeenranta, Finland, pp. 312 – 319, 2015.
- [6] G. Ambrogio, L. Filice, G.L. Manco, Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 257-260, 2008.
- [7] G. Buffa, D. Campanella, L. Fratini, On the improvement of material formability in SPIF operation through tool stirring action, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 9, pp. 1-9, 2012.
- [8] G. Palumbo, M. Brandizzi, Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high tool rotation speed, *Materials and Design*. Vol. 40, No. 1, pp. 43-51, 2012.