مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 439-445

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# مطالعه عدم قطعیت تنش پسماند در روش کانتور روی قطعات روزنرانی شده آلومینیومی در حالت گرم

محمد هنرپیشه[1*]، فرشاد نظری[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

* کاشان، صندوق پستی 8731751167، honarpishe@kashanu.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 01 بهمن 1395
پذیرش: 14 فروردین 1396
ارائه در سایت: 27 اردیبهشت 1396

*کلید واژگان:*
روزنرانی
تنش پسماند
روش کانتور
عدم قطعیت

**چکیده**

روش کانتور یکی از روش‌های جدید در اندازه‌گیری تنش پسماند می‌باشد که برای اندازه‌گیری نقشه دوبعدی تنش‌های پسماند استفاده می‌شود. در این مطالعه، تنش‌های پسماند در میله‌های تولید شده به روش اکستروژن گرم با کاهش سطح مقطع زیاد، اندازه‌گیری شده است. این میله‌ها از جنس آلیاژ 6061 آلومینیوم بوده و تأثیر عملیات حرارتی آنیل بر آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا تنش‌های پسماند قبل و بعد از عملیات حرارتی آنیل بررسی شده و عدم قطعیت اندازه‌گیری تنش پسماند به روش کانتور، محاسبه شده است. مطالعه نتایج نشان می‌دهد در میله‌های تولید شده به روش اکسترود گرم با کاهش سطح مقطع زیاد، تنش پسماند کششی در مرکز میله ایجاد شده و با حرکت در راستای شعاع به تنش پسماند فشاری تغییر می‌کند به‌طوری‌که سطح در تعادل بین تنش کششی و فشاری قرار دارد. بیشترین تنش پسماند کششی در مرکز میله اتفاق می‌افتد و انجام عملیات حرارتی آنیل سبب کاهش بسیار زیاد تنش‌ها می‌گردد. همچنین مطالعه عدم قطعیت نشان داد، عدم قطعیت روی سطح نمونه تقریباً یکنواخت بوده و منابع خطای جابجایی و خطای مدل تأثیر مشابهی بر عدم قطعیت در روش کانتور دارند.

# Uncertainty analysis of contour method in the hot extruded Aluminum specimens

**Mohammad Honarpisheh*, Farshad Nazari**

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
*P.O.B. 8731751167 Kashan, Iran, honarpishe@kashanu.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 20 January 2017
Accepted 03 April 2017
Available Online 17 May 2017

*Keywords:*
Extrusion
Residual stress
Contour method
Uncertainty

**ABSTRACT**

The contour method is a new approach to measure the residual stress and is used to provide a two-dimensional map of residual stresses. In this study, residual stresses were measured in the rods that are produced by hot extrusion with high reduction cross section. The rods material was 6061 aluminum alloy and the effect of annealing heat treatment has been studied on the rods. For this purpose, residual stress has been evaluated before and after annealing heat treatment and the uncertainty of the contour method is calculated. The results indicate that in the rods produced by hot extrusion with high reduction cross section, tensile residual stress is created in the rod core and by moving along the radius is changed to compressive residual stress such that the surface is balanced via tensile and compressive stress. The maximum tensile residual stress is formed on the rod center and performing annealing heat treatment results in high reducing residual stress. Also, as the uncertainty investigation determined, the uncertainty was almost uniform on the surface and displacement error and model error sources have the same effect on the uncertainty of contour method.

## 1- مقدمه

فرایند اکستروژن کاربردهای بسیاری در تولید داشته و می‌تواند برای دامنه وسیعی از فلزات و آلیاژها استفاده گردد. بسیاری از پروفیل‌ها با سطح مقطع‌های مختلف با این روش تولید می‌شوند. یکی از ویژگی‌های فرایند اکستروژن توانایی ایجاد کاهش زیاد در سطح مقطع، بدون تولید عیب در قطعات می‌باشد [1] که به دلیل استفاده از شرایط فشار سه محوره روی ماده است.

آلومینیوم یک از فلزات پرکاربرد در فرایند اکستروژن می‌باشد و آلیاژ 6061 آلومینیوم به دلیل استحکام نسبتاً بالا از پرکاربردترین آلیاژهای آلومینیوم است. این آلیاژ قابلیت عملیات حرارتی داشته و دارای چقرمگی خوب و مقاومت به خوردگی مناسبی است.

تغییر شکل‌های پلاستیک شدید و ناهمگن و نرخ خنک شوندگی در طول فرایند اکستروژن سبب تغییر ریزساختار و ایجاد اعوجاج و تنش پسماند در قطعات می‌گردد [3,2]. تنش‌های پسماند اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر عملکرد قطعات مهندسی دارند. این تنش‌ها می‌توانند برای عمر خستگی، مقاومت به خورگی، استحکام تسلیم و پایداری ابعادی مفید یا مضر باشند. بررسی تنش پسماند در فرایند اکستروژن در سال 1981 توسط مک-مکینگ و لی [4] انجام شد. آنها از یک مدل کامل الاستیک-پلاستیک جهت تحلیل استفاده کرده و نتایج را با مدل المان محدود مقایسه کردند. در مطالعه‌ای

**Please cite this article using:**

M. Honarpisheh, F. Nazari, Uncertainty analysis of contour method in the hot extruded Aluminum specimens, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 439-445, 2017 (in Persian)

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

دیگر، پیزالا و ریمیرز [5] تنش پسماند میله‌های فولادی تولید شده به روش اکستروژن مستقیم سرد را توسط روش‌های پراش اشعه ایکس، تابش سینکرون با انرژی بالا و روش تفرق اشعه نوترونی اندازه‌گیری کردند. آنها بیان کردند، در قطعات تولید شده به روش اکستروژن مستقیم سرد، تنش پسماند فشاری در مرکز میله ایجاد شده و در راستای شعاع میله با تغییر به تنش پسماند کششی به تعادل می‌رسد.

روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری و بررسی تنش‌های پسماند وجود دارد [6] اما تعدادی کمی از آنها برای اندازه‌گیری تنش در راستای عمق قطعات، بدون محدودیت ضخامت و هندسه مناسب هستند. روش کانتور یکی از روش‌های تقریباً جدید بوده که توسط پرایم [7] معرفی و توسعه پیدا کرد. این روش می‌تواند یک طرح دوبعدی از تنش پسماند را بدون هیچ محدودیتی ازنظر ریزساختار، ضخامت و هندسه محاسبه نماید. روش کانتور در مطالعات مختلف، جهت بررسی تنش‌های پسماند در فرایندهای جوشکاری مانند جوشکاری پلاسما [8]، جوش قوس الکتریکی [9]، جوش قوس الکتریکی با گاز محافظ [10]، جوش تیگ [11]، جوش با پرتو الکترونی [12]، جوشکاری به روش میگ و مگ [14,13]، جوشکاری اصطکاکی خطی [15] و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [16] استفاده‌شده است. در این مطالعات حالت‌های مختلف جوشکاری مانند جوش لب‌به‌لب، جوش اتصال T و جوشکاری لوله بررسی شده و جوشکاری‌های یک پاس و یا چند پاس مطالعه شده است ,14] [17. از دیگر فرایندهای مورد بررسی توسط روش کانتور می‌توان به اندازه-گیری تنش‌های پسماند در قطعه ایرفویل [18]، بررسی قطعات تحت کوبش لیزر [19] و کوبش اولتراسونیک [20]، قطعات ماشین‌کاری شده [21] و قطعات شیشه‌ای [22] اشاره کرد که در این پژوهش‌ها، تنش‌های پسماند در نزدیک سطح اندازه‌گیری شده بود. همچنین اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات شکل‌دهی دقیق شده با لیزر [23]، بررسی تنش در قطعات آلومینیومی فورج شده [24] و ارزیابی سه محوری تنش‌های پسماند در ریل-های راه‌آهن [25] پژوهش‌هایی بوده که در حوزه فرایندهای شکل‌دهی انجام شده است.

بررسی عدم قطعیت جهت تعیین دقت نتایج همواره در روش‌های مختلف اندازه‌گیری تنش پسماند مورد توجه بوده است [26]. اما تا به امروز مطالعات بسیار کمی روی محاسبه عدم قطعیت در روش کانتور انجام گرفته است. در اولین مطالعه پرایم و همکارانش [27] مطالعه‌ای را روی تأثیر هموارسازی داده‌ها بر عدم قطعیت و تخمین آن بر ورق‌های جوشکاری شده انجام دادند. در پژوهشی دیگر عدم قطعیت بر اساس پارازیت‌های موجود در اندازه‌گیری ناهمواری‌های سطح مورد بررسی قرار گرفت و از روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ناهمواری‌های سطح بهره گرفته شد [29,28,12]. در سال 2015، اولسون و همکارانش [30] خطاهای احتمالی در روش کانتور را دسته‌بندی کرده و روشی را برای تخمین عدم قطعیت در روش کانتور ارائه دادند.

با توجه به توضیحات پیشین می‌توان بیان کرد، روش کانتور در بررسی تنش‌های پسماند در فرایندهای شکل‌دهی بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی تنش‌های پسماند به روش کانتور و محاسبه عدم قطعیت این روش روی میله‌های اکسترود گرم شده با کاهش سطح مقطع زیاد می‌باشد. در این مطالعه، تنش‌های پسماند در راستای شعاع قطعات ارزیابی‌شده و تأثیر عملیات حرارتی آنیل بر میزان تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر منابع خطا بر تنش‌های پسماند بررسی شده و عدم قطعیت فرایند محاسبه شده است.

## 2- مواد و شرایط فرایند اکستروژن

در این مطالعه میله‌هایی از جنس آلیاژ 6061 آلومینیوم با قطر 15 میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. قطر اولیه بیلت قبل از اکستروژن 203.2 میلی‌متر بوده و فرایند اکستروژن به‌صورت گرم انجام گرفته است که در طی این فرایند کاهش قطری برابر 92.62 درصد ایجاد گردیده است. قالب مورد استفاده برای تولید میله‌ها دارای زاویه 5 درجه بوده و فرایند با استفاده از پرس 500 تن و در دمای 400 درجه سانتی‌گراد انجام گرفته است. سرعت حرکت پرس 5 متر بر دقیقه بوده و میله‌ها در دمای اتاق سرد شده‌اند. جهت بررسی تنش پسماند از نمونه‌هایی با طول 25 mm استفاده شده است. در جدول 1 خواص مکانیکی ماده که با استفاده از تست کشش و سختی به‌دست‌آمده، نمایش داده شده است.

## 3- روش کانتور

در روش کانتور، تغییر شکل‌های ناشی از برش و آزاد شدن تنش‌های پسماند، اندازه‌گیری شده و با مدل‌سازی جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در یک آنالیز المان محدود، تنش‌های پسماند محاسبه می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل، نقشه دوبعدی تنش‌های پسماند عمود بر صفحه را نشان می‌دهد. روش کانتور بر اساس اصل جمع آثار می‌باشد و تئوری انجام آن در شکل 1 نمایش داده شده است.

شکل 1(A) قطعه با تنش‌های درونی متعادل را نمایش می‌دهد. در شکل 1(B) نمونه از وسط برش خورده و تنش‌های پسماند آن آزاد و سبب تغییر شکل سطح برش شده است و شکل 1(C) مقدار تنش اعمال شده به نمونه جهت بازگرداندن سطح به حالت اولیه را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل، حاصل جمع تنش در مرحله‌های B و C، تنش‌های پسماند اصلی در سراسر قطعه را می‌دهد که در رابطه (1) بیان شده است.

$$\sigma_{\mathrm{A}}(x,y,z)=\sigma_{\mathrm{B}}(x,y,z)+\sigma_{\mathrm{C}}(x,y,z) \qquad (1)$$

به‌طورکلی روش اندازه‌گیری کانتور برای میدان‌های تنش پسماند پیچیده با تغییرات مکانی، مناسب است و هیچ محدودیتی در اندازه قطعات وجود ندارد. همچنین به دلیل اینکه هندسه قطعه با استفاده از مدل المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد، در شکل قطعات نیز محدودیتی وجود ندارد.

### 3-1- برش نمونه‌ها

جهت تعیین بهترین پارامترها برای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم و به دست آوردن بهترین کیفیت سطح، ابتدا چندین برش با پارامترهای مختلف در انتهای آزاد میله که دارای حداقل تنش پسماند می‌باشد، انجام گرفت (شکل 2).

برش نمونه‌ها به‌وسیله دستگاه ماشین‌کاری چارمیل[1] و با استفاده از سیم برنجی (Cu-Zn37) با قطر 250 µm [32] و نرخ باربرداری 40 mm$^2$/min انجام گرفت. برای مهار نمونه‌ها، قطعات در نزدیک ناحیه برش با استفاده از بست از

**جدول 1** خواص مکانیکی میله اکسترود شده از جنس آلیاژ 6061 آلومینیوم

**Table 1** Mechanical properties of extruded 6061 Aluminum rod

| مدول یانگ (GPa) | مدول برشی (GPa) | ضریب پواسون | استحکام کششی (MPa) | استحکام تسلیم (MPa) | سختی (Brinell) |
|---|---|---|---|---|---|
| 69 | 26 | 0.33 | 202 | 184 | 50 |

[1] Charmilles wire cut machine

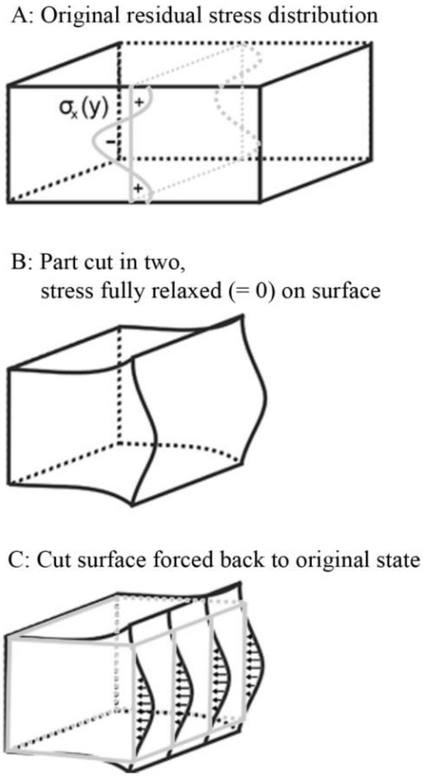


**Fig. 1** Primary of super position in the contour method [31]

**شکل 1** اصل جمع آثار در روش کانتور [31]

دو طرف مقید گردیدند و سپس از وسط، به‌صورت مستقیم و عمود بر محور میله، نمونه‌ها برش داده شد. بعد از برش دو قسمت نمونه علامت‌گذاری گردید تا برای اندازه‌گیری بتوان آنها را به‌درستی روی ماشین اندازه‌گیری موقعیت دهی کرد.

### 3-2- اندازه‌گیری سطح

درنتیجه برش قطعات، تنش‌های پسماند آزادشده و سبب تغییر شکل سطح و ایجاد جابجایی روی سطح می‌گردند. این ناهمواری‌ها باید روی هر دو سمت صفحه برش اندازه‌گیری شود تا میزان جابجایی‌ها تعیین گردد. جهت انجام اندازه‌گیری سطحی از دستگاه اندازه‌گیری تماسی تیلور هابسون[1] استفاده گردید. داده‌برداری بافاصله مکانی 0.1 mm در راستای x و 2 mm در راستای y با عدم قطعیت 2% در راستای محور z انجام گرفت. اندازه‌گیری کانتور سطح برای هر سطح مقطع دومرتبه انجام گرفت و از میانگین داده‌ها استفاده شد.


**Fig. 2** Cutting near to the free end of the sample to determinate the best EDM machining parameters

**شکل2** برش در نزدیک انتها آزاد میله جهت تخمین بهترین پارامترهای ماشین‌کاری

[1] Taylor Hobson

در اندازه‌گیری سطح کاملاً دقت گردید تا نقاط متناظر به‌درستی تعیین گردند و خطا در کانتور نهایی سطح به حداقل برسد. نمونه‌ها در مدت اندازه‌گیری کاملاً ثابت بوده و از هرگونه جابجایی پیشگیری گردید تا از اندازه‌گیری دقیق نقاط و موقعیت‌گیری مناسب دستگاه اطمینان حاصل شود. پس از کامل شدن اندازه‌گیری و میانگین‌گیری از داده‌ها در سطوح متناظر، با استفاده از نرم‌افزار متلب کانتورهای سطح هموار گردید تا نویزها و ناهمواری‌های ناشی از زبری سطح عملیات ماشین‌کاری حذف گردد که برای این کار از رابطه دومتغیره درجه چهار[2] برای نمونه قبل از عملیات حرارتی آنیل و رابطه دومتغیره درجه‌دو[3] برای نمونه بعد از عملیات حرارتی استفاده گردید. شکل 3 کانتور سطح را بعد از میانگین‌گیری و هموارسازی در دو حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی نمایش می‌دهد.

### 3-3- مدل المان محدود

در روش کانتور استفاده از تحلیل المان محدود جهت به دست آوردن توزیع تنش پسماند در سطح اندازه‌گیری ضروری می‌باشد. در این بررسی از نرم‌افزار آباکوس جهت تعیین تغییرات تنش‌های پسماند در میله‌ها استفاده‌شده است. به دلیل متقارن بودن میله‌های اکسترود شده در راستای x و y، تنها یک‌چهارم نمونه به‌جای دایره کامل مدل‌سازی شده است. این تحلیل به‌صورت سه‌بعدی با اندازه مش 0.5 mm و با استفاده از المان C3D8R انجام شده و شکل 4، هندسه مدل و شرایط مرزی آن را نمایش می‌دهد.

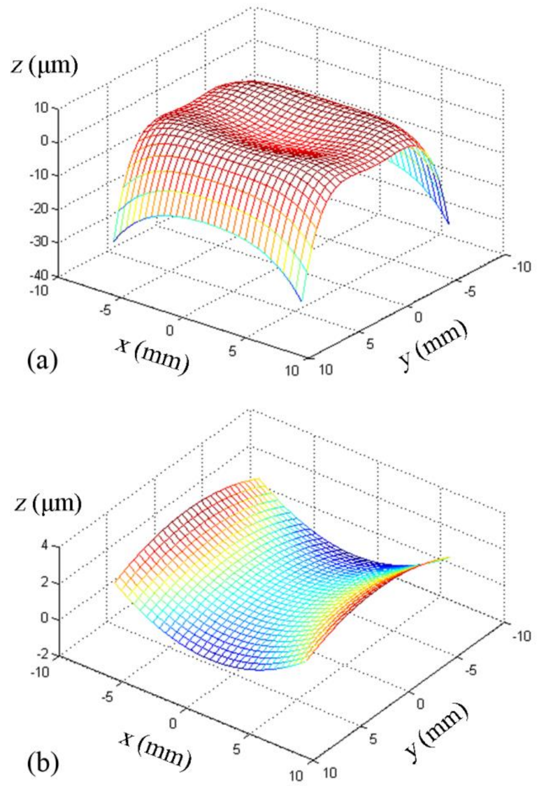


**Fig. 3** Surface contour after averaging and smoothing, (a) before annealing heat treatment, (b) after annealing heat treatment

**شکل 3** کانتور سطح بعد از میانگین‌گیری و هموارسازی، (a) قبل از عملیات حرارتی آنیل، (b) بعد از عملیات حرارتی آنیل

[2] Bivariate fourth grade spline
[3] Bivariate quadratic spline

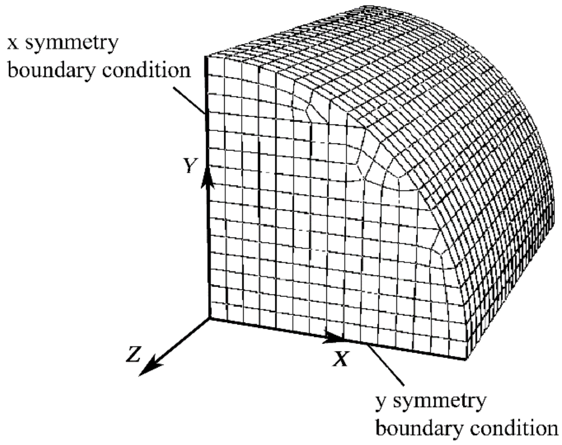


**Fig. 4** Geometry and boundary condition of finite element model for residual stress computation

**شکل 4** هندسه و شرایط مرزی مدل المان محدود جهت محاسبه تنش پسماند

برای محاسبه تنش‌های پسماند با استفاده از روش کانتور، همواره سطح قطع در ابتدا به‌صورت تخت و مسطح مدل‌سازی شده و ناهمواری‌ها به‌صورت قرینه ناهمواری‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از شرایط مرزی روی سطح تعریف می‌گردند تا به‌این‌ترتیب تنش‌های به‌دست‌آمده از این شبیه‌سازی المان محدود برابر تنش‌های پسماند باشد.

## 4- عملیات حرارتی آنیل

برای بررسی تأثیر عملیات حرارتی آنیل بر تنش‌های پسماند قطعات اکسترود شده، نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM B918 [33] آنیل کامل گردید. برای این کار، ابتدا نمونه‌ها به مدت 2 ساعت در کوره با دمای 4078 سانتی‌گراد قرار گرفتند سپس درون کوره با نرخ کاهش دمای 28 درجه بر ساعت، سرد گردیدند و زمانی که دمای آنها به 2608 سانتی‌گراد رسید، نمونه‌ها را از کوره خارج کرده تا به دمای محیط برسند. نمودار عملیات حرارتی آنیل برای میله‌های آلومینیومی در شکل 5 نمایش داده‌شده است. در این بررسی جهت اندازه‌گیری تنش پسماند قبل و بعد از عملیات حرارتی از دو سری نمونه استفاده گردید.

## 5- عدم قطعیت

عدم قطعیت در روش کانتور بر اساس عدم قطعیت منابع تصادفی خطا محاسبه می‌شود. پارازیت‌های موجود در جابجایی‌های اندازه‌گیری شده و

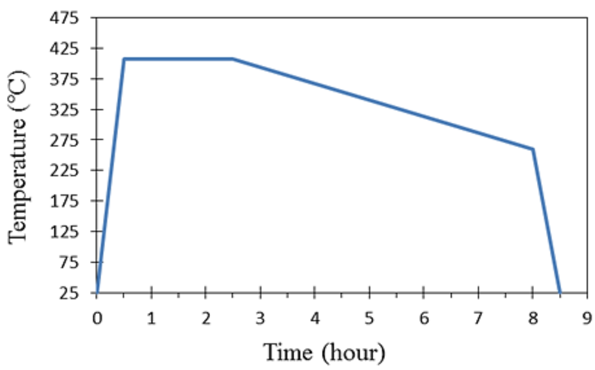


**Fig. 5** Annealing heat treatment diagram for aluminum rods

**شکل 5** نمودار عملیات حرارتی آنیل برای میله‌های آلومینیومی

خطاهای ناشی از هموارسازی جابجایی‌های سطح، دو منبع اصلی خطا در تعیین عدم قطعیت روش کانتور هستند. عدم قطعیت بر اساس پارازیت‌های موجود در جابجایی‌های اندازه‌گیری شده " خطای جابجایی" و عدم قطعیت ناشی از هموارسازی داده‌ها "خطای مدل" نامیده می‌شود [30].

### 5-1- خطای مدل

در روش کانتور، عموماً جابجایی‌های اندازه‌گیری شده روی یک منحنی دومتغیره منطبق می‌شوند. مقدار هموارسازی سطح به مدل انطباق انتخاب‌شده، بستگی دارد. همچنین مدل انطباق و پارامترهای آن بر نتایج روش کانتور تأثیرگذار است. پس مدل هموارسازی از منابع عدم قطعیت بوده و "خطای مدل" نامیده می‌شود [30]. جهت تعیین خطای مدل، جابجایی‌های سطح، با استفاده از مدل‌های هموارسازی با درجات مختلف هموار شده، و تنش‌های پسماند محاسبه می‌شوند. سپس در هر نقطه، انحراف معیار استاندار بر اساس تنش‌های به‌دست‌آمده محاسبه می‌گردد. تخمین خطای مدل در هر نقطه با استفاده از رابطه (2) انجام می‌شود.

$$U_{\mathrm{model}}(x,y) = \mathrm{std}(\sigma_{m-1,n}(x,y), \sigma_{m,n-1}(x,y), \sigma_{m,n}(x,y), \sigma_{m+1,n}(x,y), \sigma_{m,n+1}(x,y)) \quad (2)$$

در رابطه (2)، $U_{\mathrm{Model}}$ خطای مدل و $\sigma$ تنش پسماند تعیین‌شده به روش کانتور در هر نقطه می‌باشد. همچنین $m$ و $n$ بالاترین درجات در سری هموارساز داده‌های جابجایی در جهت محورهای x و y می‌باشد. در تعریف خطای مدل، بالاترین و پایین‌ترین درجات هموارسازی در هر دو جهت مختصات ($x$ و $y$) در نظر گرفته شده است که سبب می‌شود حساسیت تنش پسماند اندازه‌گیری شده به مدل انطباق مشخص شود [30].

### 5-2- خطای جابجایی

وجود پارازیت در ناهمواری‌های اندازه‌گیری شده سبب ایجاد خطا در تنش‌های پسماند محاسبه شده به روش کانتور می‌شود که به آن "خطای جابجایی" می‌گویند [30]. جهت تعیین خطای جابجایی، پارازیت‌های تصادفی موجود در داده‌های تجربی (عملی) باید محاسبه شود. پارازیت‌های تصادفی با محاسبه اختلاف بین پروفیل سطح اندازه‌گیری شده و پروفیل سطح هموارشده تعیین می‌گردد که به آنها پارازیت‌های اصلی می‌گویند.

جهت بررسی تأثیر پارازیت‌ها بر تنش‌های پسماند، پارازیت‌هایی تصادفی به ناهمواری‌های اندازه‌گیری شده اضافه می‌گردد و سپس تحلیل داده‌ها (فرایند هموارسازی) انجام می‌شود. یعنی، جابجایی‌های جدید (پیش از هموارسازی)، از جابجایی‌های اندازه‌گیری شده که به‌طور طبیعی همراه با پارازیت هستند به‌اضافه پارازیت‌های تصادفی که به‌طور مصنوعی ایجادشده‌اند تشکیل می‌گردد. تنها ویژگی پارازیت‌های تصادفی تولید شده این است که باید انحراف معیار استاندارد آنها با انحراف معیار استاندارد پارازیت‌های اصلی برابر باشد.

تنش‌های پسماند بعد از تحلیل ناهمواری‌های جدید محاسبه می‌شود و این فرایند چندین بار با مجموعه پارازیت‌های مختلف تکرار می‌شود. به‌این‌ترتیب به ازای هر مجموعه پارازیت یک مجموعه تنش پسماند به دست می‌آید. خطای جابجایی در هر نقطه، با محاسبه انحراف معیار استاندارد تنش‌های پسماند به‌دست‌آمده به ازای پارازیت‌های مختلف، تخمین‌زده می‌شود [30].

### 5-3- عدم قطعیت کل

برای محاسبه عدم قطعیت کل، دو منبع عدم قطعیت با استفاده از ریشه جمع مربعات (رابطه (3)) باهم ترکیب می‌شوند. سپس، میانگین ریشه جمع مربعات برای همه نقاط روی سطح مقطع با رابطه (4) محاسبه می‌گردد، که $(x_i, y_i)$ مجموعه‌ای شامل $N$ نقطه با فاصله تقریباً یکنواخت روی سطح مقطع می‌باشد.

$$U_{\mathrm{RSS}}(x,y)=\sqrt{U_{\mathrm{Model}}^2(x,y)+U_{\mathrm{Disp}}^2(x,y)} \quad (3)$$

$$\bar{U}_{\mathrm{RSS}}=\frac{\sum_{i=1}^{N} U_{\mathrm{RSS}}(x_i,y_i)}{N} \quad (4)$$

برای تعیین عدم قطعیت هر نقطه، مقدار عدم قطعیت اندازه‌گیری شده برای آن نقطه ($U_{RSS}$) با عدم قطعیت میانگین ($\bar{U}_{RSS}$) مقایسه شده و مقدار بیشتر برای عدم قطعیت آن نقطه در نظر گرفته می‌شود. در نظر گرفتن مقدار میانگین در تخمین عدم قطعیت سبب می‌شود تا عدم قطعیت در یک سطح منطقی روی کل سطح مقطع تخمین‌زده شود [30].

$$U_{\mathrm{TOT}}(x,y)=\max(U_{\mathrm{TOT}}(x,y),\bar{U}_{\mathrm{RSS}}) \quad (5)$$

## 6- نتایج و بحث

نتایج بررسی‌ها نشان داد در میله‌های تولید شده به روش اکستروژن گرم با کاهش قطر زیاد، در مرکز میله تنش پسماند کششی ایجاد شده و با حرکت در راستای شعاع به تنش پسماند فشاری تغییر می‌کند. این توزیع تنش در اثر دو منبع مکانیک تغییر شکل و تغییرات حرارتی به وجود می‌آید. ازنظر مکانیک تغییر شکل، مواد خارجی در زمان عبور از میان حدیده مرکز میله را تحت فشار قرار می‌دهند که درنتیجه آن تنش فشاری در مرکز و تنش کششی در بخش خارجی میله ایجاد می‌شود. اما پس از عبور میله از میان قالب، باربرداری اتفاق می‌افتد که در اثر آن مواد مرکزی تمایل دارند که حالت اولیه خود بازگردند اما بخش‌های بیرونی میله به دلیل تغییر شکل پلاستیک مقاومت می‌کنند. این الگوی تغییر شکل سبب می‌شود تا در بخش مرکزی میله تنش پسماند کششی و در قسمت‌ها خارجی میله تنش پسماند فشاری ایجاد گردد. از نظر تغییرات حرارتی، زمانی که میله از قالب خارج می‌شود دارای دمای 400 درجه سانتی‌گراد است. در اثر انتقال حرارت سطح میله با هوا و یا اسپری آب، بخش‌های خارجی میله تمایل به انقباض داشته درحالی‌که بخش مرکزی میله همچنان گرم است. اختلاف دما بین مرکز و سطح قطعه سبب تشکیل تنش‌های فشاری در مرکز و کششی در سطح میله می‌گردد. اما پس از سرد شدن کامل قطعه تعادل جدیدی در میدان تنشی ایجاد می‌شود و سبب ایجاد تنش‌های پسماند کششی در مرکز و فشاری در قسمت خارجی میله می‌گردد. تأثیر عامل حرارتی نسبت به عامل تغییر شکل مکانیکی بر تنش‌های پسماند بخصوص برای میله‌هایی با قطر زیاد بیشتر می‌باشد زیرا افزایش قطر سبب افزایش اختلاف دما در قطعه می‌گردد. در شکل 6 تنش پسماند قبل و بعد از عملیات حرارتی آنیل برای قطعه مورد مطالعه نمایش داده شده است.

عملیات حرارتی آنیل با گرم کردن و نگه‌داشتن قطعه در دمای مشخص سبب می‌شود تا تنش‌های پسماند در قطعه آزاد شده و مقدار تنش‌های پسماند در قطعه کاهش یابد. با آزاد شدن تنش‌های پسماند، تعادل جدیدی در تنش‌های باقی‌مانده ایجاد می‌شود و پایداری ابعادی قطعات افزایش می‌یابد. شکل 7 مقادیر تنش پسماند را قبل و بعد از عملیات حرارتی روی قطر قطعه در $y$=0 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تنش‌های پسماند پس از عملیات حرارتی آنیل به‌شدت کاهش یافته است. ماکزیمم تنش پسماند قبل از عملیات حرارتی برابر 84.1 MPa بوده که بعد از عملیات

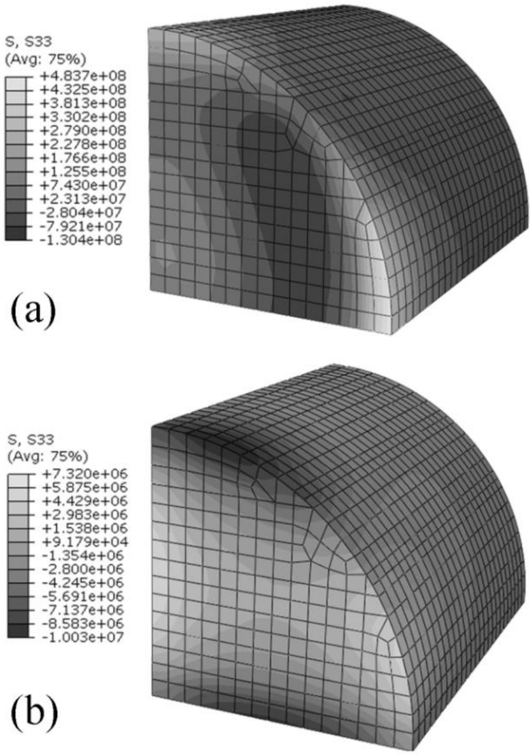


**Fig. 6** Contour of residual stress (according to Pascal), (a) before annealing heat treatment, (b) after annealing heat treatment

**شکل 6** کانتور تنش پسماند (بر حسب پاسکال)، (a) قبل از عملیات حرارتی آنیل، (b) بعد از عملیات حرارتی آنیل

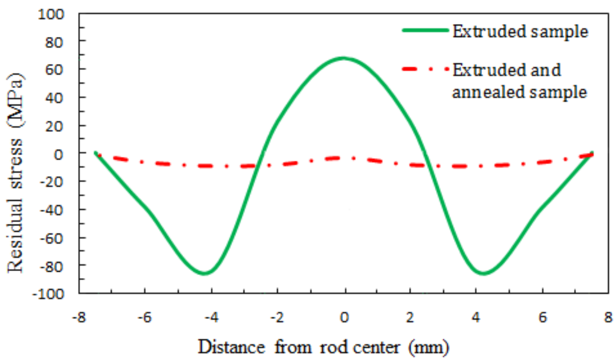


**Fig. 7** Residual stress distribution along rod diameter at $y$=0

**شکل 7** توزیع تنش پسماند روی قطر نمونه در $y$=0

حرارتی آنیل به 9 MPa کاهش یافته است که نشان می‌دهد با انجام عملیات حرارتی تنش پسماند در این قطعه 89.3% کاهش یافته است.

همان‌طور که قبلاً بیان شد منابع عدم قطعیت در روش کانتور خطای جابجایی و خطای مدل می‌باشد. بررسی نتایج عدم قطعیت نشان می‌دهد، در این مطالعه، هر دو منبع خطای مدل و جابجایی به‌طور مشابه بر خطای کل سطح مؤثر هستند و هیچ‌کدام از آنها قابل صرف‌نظر نمی‌باشد. در شکل 8 کانتورهای خطای مدل، خطای جابجایی و مقدار خطای کل روی سطح نمونه برای قطعه عملیات حرارتی نشده، نشان داده‌شده است. جهت محاسبه خطای مدل به دلیل عدم انطباق و هموارسازی صحیح از تابع درجه سه برای هموارسازی در راستای x استفاده نشده است.

در شکل 9 خطای جابجایی، خطای مدل و عدم قطعیت کل برای محور قطری y=0 نشان داده‌شده است. بررسی نتایج عدم قطعیت روی قطر نمونه

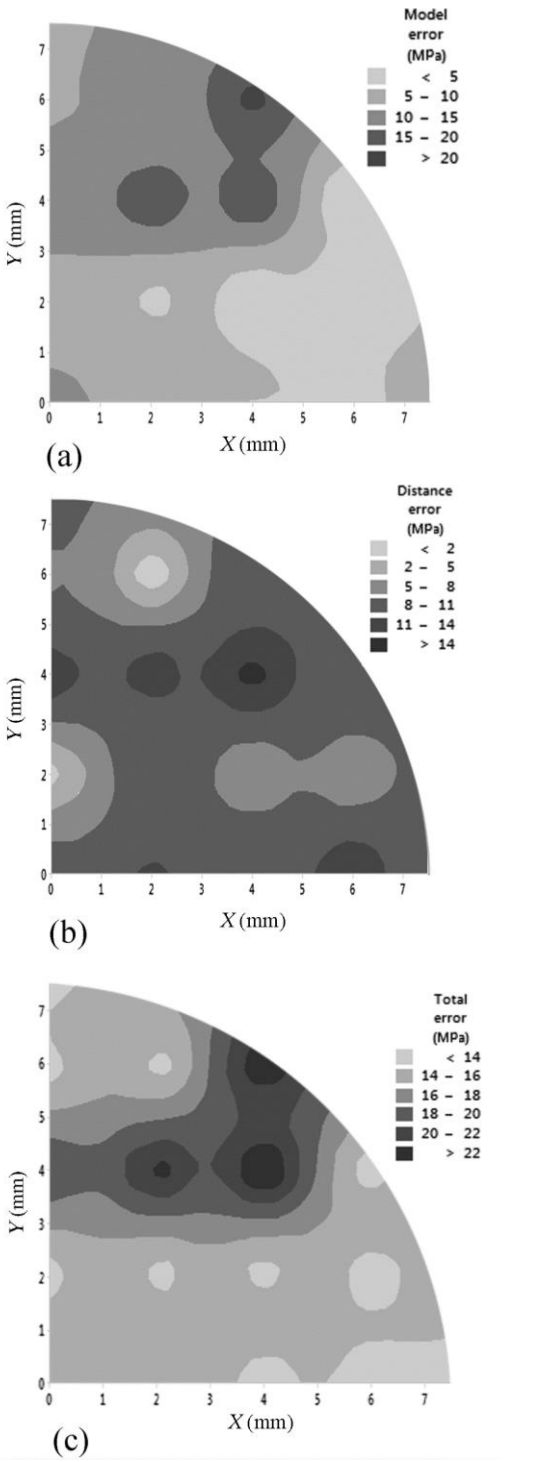


**Fig. 8** Uncertainty of contour method: (a) model error, (b) displacement error, and (c) total uncertainty

**شکل 8** عدم قطعیت روش کانتور: (a) خطای مدل، (b) خطای جابجایی و (c) عدم قطعیت کل

نشان داد، بیشینه خطای مدل در مرکز قطعه بوده و مقدار آن 11.6 MPa می باشد که معادل 13.7% بیشینه تنش پسماند است همچنین بیشینه خطای جابجایی 13.1 MPa بوده که 15.5% بیشینه تنش پسماند می‌باشد.

بررسی عدم قطعیت کل روی قطر نمونه عملیات حرارتی نشده نشان داد، بیشینه عدم قطعیت کل روی قطر $y$=0، 14.9 MPa بوده که برابر 17.7% ماکزیمم تنش می‌باشد. شکل 10 مقادیر تنش پسماند را با در نظر گرفتن

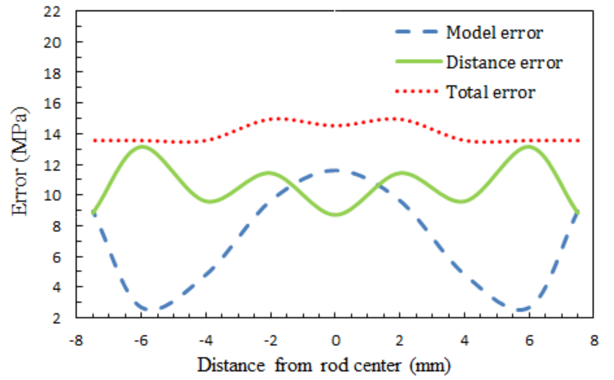


**Fig. 9** Line plot of displacement error, model error and total uncertainty at $y$=0

**شکل 9** نمودار خطی خطای جابجایی، خطای مدل و عدم قطعیت کل روی محور $y$=0

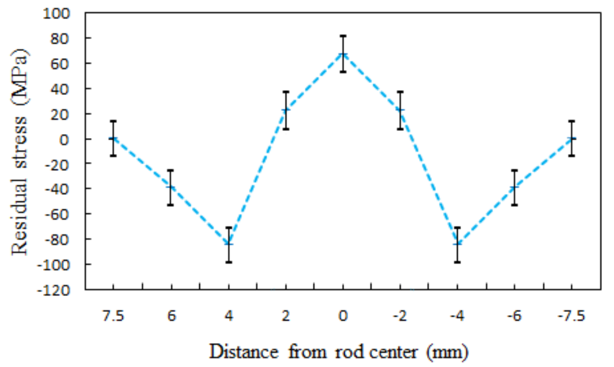


**Fig. 10** The mount of residual stress with uncertainty consideration at $y$=0

**شکل 10** مقادیر تنش پسماند با در نظر گرفتن عدم قطعیت روی محور $y$=0

مقادیر عدم قطعیت کل (تنش پسماند± عدم قطعیت کل) برای محور $y$=0 نمایش می‌دهد.

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، استفاده از پارامترهای مناسب ماشین‌کاری جهت افزایش صافی سطح و به کار بردن سیم‌هایی با قطر کوچک می‌تواند، ناهمواری‌های ناشی از فرایند ماشین‌کاری را کاهش داده و سبب کاهش خطا گردد [27,12]. همچنین مقایسه داده‌برداری با استفاده از دستگاه اسکنر نوری و دستگاه تماسی نشان داده که دستگاه‌های تماسی دقت بهتر و پارازیت‌های کمتری دارند که سبب کاهش خطا در زمان هموارسازی می‌گردد اما اسکنرهای نوری برای قطعات کوچک مناسب‌تر می‌باشند [27]. پرایم و همکارانش [28] نیز بیان کردند جهت کاهش خطا و اطمینان از یکنواختی ساختار بهتر است اطراف ناحیه برش تا دو برابر بزرگ‌ترین اندازه سطح مقطع یکنواخت باشد.

## 7- نتیجه گیری

در این مطالعه تنش پسماند در میله‌های اکسترود گرم شده با کاهش سطح مقطع زیاد مورد مطالعه قرار گرفت و مقادیر تنش پسماند قبل و بعد از عملیات حرارتی بررسی گردید که نتایج آن به شرح زیر است:

- بررسی‌ها نشان داد که مقادیر تنش در مرکز قطعه کششی بوده و در راستای شعاع به تنش پسماند فشاری تبدیل می‌شود و بیشترین تنش پسماند در فاصله 4 mm از مرکز قطعه اتفاق می‌افتد.
- عملیات حرارتی آنیل، تنش‌های پسماند را به‌شدت کاهش داده و سبب تعدیل 89 درصدی تنش‌های پسماند می‌گردد.

- مطالعه عدم قطعیت نشان داد، عدم قطعیت روی سطح نمونه تقریباً یکنواخت بوده و منابع خطای جابجایی و خطای مدل تأثیر مشابهی بر عدم قطعیت در روش کانتور دارند.

## 8- منابع


[1] M. Zohoor, A. Kazeminasab, M. Shahabizadeh, Influence of extrusion die geometry in the manufacturing of an axisymmetric aluminium part with different wall thickness, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 283-292, 2016. (in Persian فارسی)

[2] A. Jäger, M. Heilmann, W. Z. Misiolek, M. Schikorra, A. Erman Tekkaya, Influence of cooling rate on distortion and microstructure in extrusion of Al-Mg-Si alloys, *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, No. 1, pp. 81–84, 2009.

[3] F. Akbaripanah, M. A. Salavati, R. Mahmudi, The influences of extrusion and Multi-Directional Forging (MDF) Processes on microstructure, shear strength and microhardness of AM60 Magnesium Alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 409-416, 2017. (in Persian فارسی)

[4] R. M. McMeeking, E. H. Lee, The generation of residual stresses in metal-forming processes, *28th Residual Stress and Stress Relaxation conference*, Lake Placid, NewYork, pp. 315-330, 1981.

[5] A. Pyzalla, W. Reimers, Residual stress and texture due to cold and hot extrusion processes, *Textures and Microstructures*, Vol. 33, No. 1, pp. 291-301, 1999.

[6] C. Liu, C. L. Dong, Internal residual stress measurement on linear friction welding of titanium alloy plates with contour method, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, No. 5, pp. 1387−1392, 2014.

[7] M. Prime, Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut, *Transactions-American society of mechanical engineers journal of engineering materials and technology*, Vol. 123, No. 2, pp. 162–168, 2001.

[8] Y. Zhang, S. Ganguly, L. Edwards, M. E. Fitzpatrick, Cross-sectional mapping of residual stresses in a VPPA weld using the contour method, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 17, pp. 5225–5232, 2004.

[9] M. E. Kartal, Y. H. Kang, A. M. Korsunsky, A. C. F. Cocks, J. P. Bouchard, The influence of welding procedure and plate geometry on residual stresses in thick components, *International Journal of Solids and Structure*, Vol. 80, pp. 420-429, 2016.

[10] N. Murugan, R. Narayanan, Finite element simulation of residual stresses and their measurement by contour method, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 2067–2071, 2009.

[11] M. Turski, L. Edwards, Residual stress measurement of a 316l stainless steel bead-on-plate specimen utilising the contour method, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, No. 1, pp. 126–131, 2009.

[12] F. Hosseinzadeh, P. Ledgard, P. J. Bouchard, Controlling the cut in contour residual stress measurements of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy plates, *Experimental Mechanics*, Vol. 53, No. 5, pp. 829–839, 2013.

[13] D. F. O. Braga, H. E. Coules, T. Pirling, V. Richter-Trummer, P. Colegrove, P. M. S. T. de Castro, Assessment of residual stress of welded structural steel plates with or without post weld rolling using the contour method and neutron diffraction, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 12, pp. 2323–2328, 2013.

[14] V. Richter-Trummer, P. M. S. T. de Castro, The through-the-thickness measurement of residual stress in a thick welded steel compact tension specimen by the contour method, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 46, No. 4, pp. 315-322, 2011.

[15] C. Liu, C. L. Dong, Internal residual stress measurement on linear friction welding of titanium alloy plates with contour method, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, No. 5, pp.1387−1392, 2014.

[16] T. Sun, M. J. Roy, D. Strong, P. J. Withers, Philip B. Prangnell, Comparison of residual stress distributions in conventional and stationary shoulder high-strength aluminum alloy friction stir welds, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 242, pp. 92–100, 2017.

[17] W. Woo, G. B. An, V. T. Em, A. T. De Wald, M. R. Hill, Through-thickness distributions of residual stresses in an 80 mm thick weld using neutron diffraction and contour method, *Journal of Materials Science*, Vol. 50, No. 2, pp. 784–793, 2015.

[18] P. G. Frankel, P. J. Withers, M. Preuss, H. T. Wang, J. Tong, D. Rugg, Residual stress fields after FOD impact on flat and aerofoil-shaped leading edges, *Mechanics of Materials*, Vol. 55, pp. 130–145, 2012.

[19] M. B. Toparli, M. E. Fitzpatrick, Development and Application of the Contour Method to Determine the Residual Stresses in Thin Laser-Peened Aluminium Alloy Plates, *Experimental Mechanics*, Vol. 56, No. 52, pp. 323–330, 2016.

[20] B. Ahmad, M. E. Fitzpatrick, Effect of ultrasonic peening and accelerated corrosion exposure on the residual stress distribution in welded marine steel, *Metallurgical And Materials Transactions A*, Vol. 46, No. 3, pp. 1214-1226, 2015.

[21] Z. Zhang, L. Li, Y. Yang, N. He, Machining distortion minimization for the manufacturing of aeronautical structure, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 73, pp. 1765–1773, 2014.

[22] M. Achintha, B. A. Balan, An experimentally validated contour method/eigenstrains hybrid model to incorporate residual stresses in glass structural designs, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 50, No. 8, pp. 614–627, 2015.

[23] P. Rangaswamy, M. L. Griffith, M. B. Prime, T. H. Holden, R. B. Rogge, J. M. Edward, R. J. Sebring, Residual stresses in LENS components using neutron diffraction and contour method, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 399, No. 1-2, pp.72–83, 2005.

[24] Z. Zhang, Y. Yang, L. Li, B. Chen, H. Tian, Assessment of residual stress of 7050-T7452 aluminum alloy forging using the contour method, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 644, pp. 61–68, 2015.

[25] R. Kaiser, M. Stefenelli, T. Hatzenbichler, T. Antretter, M. Hofmann, J. Keckes, B. Buchmayr, Experimental characterization and modelling of triaxial residual stresses in straightened railway rails, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 50, No. 3, pp. 190-198, 2015.

[26] M. Kotobi, M. Honarpisheh, Uncertainty analysis of residual stresses measured by slitting method in equal-channel angular rolled Al-1060 strips. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 52, No. 2, pp. 83-92, 2017.

[27] M. B. Prime, R. J. Sebring, J. M. Edwards, D. J. Hughes, P. J. Webster, Laser surface-contouring and spline data-smoothing for residual stress measurement, *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 176–184, 2004.

[28] M. B. Prime, T. Gnäupel-Herold, J. A. Baumann, R. J. Lederich, D. M. Bowden, R. J. Sebring, Residual stress measurements in a thick, dissimilar aluminum-alloy friction stir weld, *Acta Materials*, Vol. 54, No. 15, pp. 4013–4021, 2006.

[29] F. Hosseinzadeh, P. J. Bouchard, Mapping multiple components of the residual stress tensor in a large P91 steel pipe girth weld using a single contour cut, *Experimental Mechanics*, Vol. 53, No. 2, pp. 171–181, 2013.

[30] D. Olson, A. T. DeWald, M. B. Prime, M. R. Hill, Estimation of uncertainty for contour method residual stress measurements, *Experimental Mechanics*, Vol. 55, No. 3, pp. 577–585, 2015.

[31] P. Pagliaro, M. B. Prime, H. Swenson, B. Zuccarello, Measuring multiple residual-stress components using the contour method and multiple cuts, *Experimental Mechanics*, Vol. 50, No. 2, pp. 187–194, 2010.

[32] M. B. Prime, A. T. DeWald, *Practical Residual Stress Measurement Methods: The Contour Method*, G. S. Schajer (Eds.), pp. 109-135, New York: Wiley, 2013.

[33] ASTM B918 / B918M-09, *Standard Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.