

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Simulation of Friction Stir Processing Of Aluminum Alloy 6061

Abstract

A Finite Element Method (FEM) simulation of the Friction Stir Processing (FSP), using Deform 3D software based on Lagrangian implicit, was developed and verified by the experimental results. Simulation can successfully predict the temperature and effective strain. For experimental process, a non-consumable, without pin tool was used. Process parameters were: 2000 RPM rotational speed, 50 mm/min traveling speed and 1 mm plunge depth. Simulation results showed that the temperature distribution is not symmetric around the tool and the highest temperature is in the tool shoulder/workpiece interface. A good agreement between simulation and experimental calculated temperatures was seen. Also, simulation results showed more effective strain at the advancing side respect for retreating side.

Keywords: Friction stir processing, Finite Element Method, Temperature, Strain.

Conference 2014

شبیه‌سازی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

چکیده

شبیه‌سازی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار Deform 3D، بر پایه روش لاگرانژی، انجام شد و با نتایج تجربی مقایسه شد. شبیه‌سازی می‌تواند دما و کرنش موثر را با موفقیت پیش‌بینی کند. برای انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی از یک ابزار مصرف‌نشده بدون پین استفاده شد. پارامترهای فرآیند: سرعت چرخشی ۲۰۰۰ RPM، سرعت پیشروی ۵۰ mm/min و عمق نفوذ ۱ mm بود نتایج شبیه‌سازی نشان داد که توزیع دمای اطراف ابزار به صورت متقارن نیست و بیشینه دما در فصل مشترک ابزار/قطعه است. هماهنگی خوبی بین دماهای اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی دیده شد. همچنین، نتایج شبیه‌سازی، نشان‌دهنده کرنش بیشتری در جهت پیش‌رونده نسبت به جهت پس‌رونده بود.

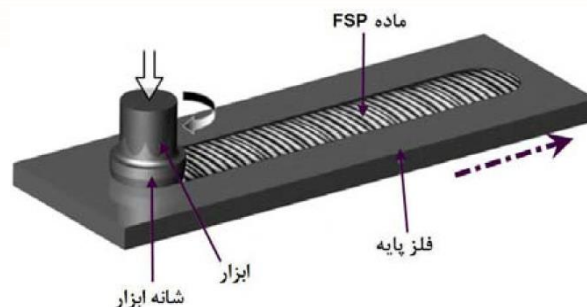
واژه‌های کلیدی: فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، روش اجزای محدود، دما، کرنش.

مقدمه

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ یک آلیاژ رسوب‌سختی شده است که حاوی مقادیر زیادی منیزیم و سیلیسیم به عنوان عناصر آلیاژی است. منیزیم و سیلیسیم تشکیل Mg_2Si می‌دهند که یک سیستم یوتکتیکی ساده با آلومینیوم ایجاد می‌کند. رسوب کردن Mg_2Si بعد از پیرسازی مصنوعی در دمای ۲۶ است که اجازه می‌دهد این آلیاژها به استحکام بالایی برسند. این آلیاژها خواص مکانیکی خوب همراه با جوش‌پذیری و مقاومت به خوردگی عالی از خود نشان می‌دهند. کاربرد آنها در قطعات هواپیما، اتومبیل، پیستون‌های هیدرولیک، سوپاپ‌ها، بدنه دوچرخه و غیره است.

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (FSP)^۱ توسعه‌یافته روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)^۲ است که به وسیله انجمن جوشکاری بریتانیا در سال ۱۹۹۱ به منظور بهبود خواص موضعی و سطحی، در مکانی انتخابی، ابداع شده است. FSP یک روش حرارتی مکانیکی جدید و منحصر بفرد است که ریز ساختار و خواص مکانیکی ماده را طی یک مرحله، برای دستیابی به بیشترین کارایی با هزینه کم در کمترین زمان ممکن، تغییر می‌دهد. برای انجام این فرآیند روی یک ورق فلزی، از یک ابزار استوانه‌ای با طراحی مخصوص استفاده می‌شود. این ابزار در حالی که به دور خود می‌چرخد، وارد منطقه مورد نظر از ورق می‌شود. ابزار در حال چرخش با سطح ورق تماس پیدا می‌کند و اصطکاک بین سطح ورق و شانه ابزار به‌طور مرتب ایجاد حرارت می‌کند که ستون کوچکی از فلز را نرم و امکان پیشروی ابزار را درون ماده فراهم می‌کند (شکل ۱). منطقه FSP شده پس از عبور ابزار خنک می‌شود و یک منطقه تبلور مجدد یافته دینامیکی در آن ایجاد می‌شود. نتیجه فرآیند بدست آمدن ریزساختاری همگن با دانه‌های ریز هم‌محور در ناحیه FSP است که سبب بهبود داکتیلیتی و استحکام می‌شود.

تغییر شکل پلاستیک موضعی شدید حین FSP منجر به شکسته شدن ذرات فاز ثانویه و توزیع یکنواخت رسوباتی مثل Mg_2Si می‌شود. (Karthikeyan, Senthilkumar, Balasubramaniam, Natarajan, 2008). این توزیع یکنواخت شانس تشکیل مناطق آندی را کاهش می‌دهد، بنابراین مقاومت به خوردگی را بهبود می‌بخشد (Surekha, Murthy, Prasad Rao, 2009). FSP مناسب‌ترین فرآیند برای آلیاژهای آلومینیوم است. آلومینیوم یک فلز با نقطه ذوب پایین است که استفاده از فرآورده‌های حالت جامد می‌تواند یک پیشرفت برای بکار بردن این فلز در صنایع محسوب شود. همچنین، سختی و استحکام پایین آلومینیوم، ساخت ابزار مصرف‌نشده را ساده‌تر می‌کند.



شکل ۱- شماتیک فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

- 1- Friction Stir Processing
- 2- Friction Stir Welding

در این پژوهش، شبیه‌سازی FSP، به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار Deform 3D، بر پایه روش لاگرانژی انجام شد و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه شد.

روش تحقیق

ماده مورد استفاده در این پژوهش آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بود که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. آلیاژ مورد استفاده به مدت ۳ ساعت در دمای ۴۵۰°C، درون کوره مافیلی، آنیل کامل شد. ضخامت ورق‌های مورد استفاده ۶ mm بود و نمونه‌های آزمایش در ابعاد ۶۰×۱۲۰ mm برش داده شدند. ابزار از جنس فولاد H۱۳، با قطر شانه ۱۸ mm و بدون پین ساخته شد. سرعت چرخشی ابزار ۲۰۰۰ RPM و سرعت پیشروی ۵۰ mm/min انتخاب شد. برای ثبت تغییرات دما در قطعه کار، از ترموکوپل نوع K استفاده شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ ۶۰۶۱

عنصر	منیزیم	سیلیسیم	مس	منگنز	آهن	کبالت	روی	کروم	Al
درصد وزنی	۰٫۸۰	۰٫۶۳	۰٫۲۱	۰٫۰۸	۰٫۳۸	۰٫۱۷	۰٫۰۳	۰٫۱۹	باقیمانده

جزئیات شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی FSP فرض شد که:

- ۱- قطعه کار یک ماده ویسکوپلاستیک صلب است.
- ۲- ابزار کار صلب است.
- ۳- ضریب اصطکاک بین قطعه کار و ابزار ثابت است.
- ۴- ویژگیهای حرارتی قطعه کار و ابزار ثابت است.

۵- تمام سطوح آزاد قطعه کار و ابزار در اتمسفری با دمای محیط قرار دارند.

مدل ویسکوپلاستیک صلب به طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی شکل دادن فلزات مورد استفاده قرار گرفته است. مدل ویسکوپلاستیک مرسوم از یک قاعده تفاضلی به دست می‌آید که تشکیل یک معادله غیر خطی می‌دهد. این معادلات را می‌توان از روشهای تکراری مانند روش نیوتن-رافسون حل کرد. معادله زیر معادله پایه حاکم بر فلزات ویسکوپلاستیک صلب را نشان می‌دهد (Asadi, Mahdavinejad, 2011):

$$\sigma'_{ij} = \left(\frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\epsilon}} \right) \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

فرض شده است که ماده از معیار تسلیم وون-میزز پیروی میکند و معادله سیلان مرتبط با آن به صورت زیر است:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}} \{ \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{3}{2}} \left\{ \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

که $\bar{\sigma}$ ، $\dot{\epsilon}$ ، σ'_{ij} و $\dot{\epsilon}_{ij}$ به ترتیب تنش موثر، نرخ کرنش موثر، مولف تنش به کاهش یافته و نرخ کرنش هستند. تنش موثر $\bar{\sigma}$ تابعی از کرنش موثر، نرخ کرنش موثر و دما است.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}, T) \quad (4)$$

روش تفاضلی بر پایه یک قاعده تفاضلی است. این روش به سرعت های قابل قبول u_i نیاز دارد تا شرایط سازگاری و تراکم ناپذیری و شرایط مرزی سرعت را ارضا کند. حل واقعی، یک مقدار ثابت است که به صورت تابع زیر نشان داده میشود:

$$\pi = \int_V E(\dot{\epsilon}_{ij}) dV - \int_{S_F} F_i u_i ds \quad (5)$$

که F_i کشش سطحی، u_i مولفه سرعت، V حجم قطعه کار، S_F سطحی که به آن نیرو وارد می شود و $E(\dot{\epsilon}_{ij})$ تابع کار است که معادله زیر را می دهد:

$$\sigma'_{ij} = \frac{\partial E}{\partial \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (6)$$

حل مسئله در شرایط مرزی اولیه با استفاده از حل معادله دو متغیره به دست می آید:

$$\delta \pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV - \int_{S_F} \delta u_i ds = 0 \quad (7)$$

برای رفع محدودیت تراکم ناپذیری از معادله زیر استفاده می شود:

$$\delta \pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V K \dot{\epsilon}_V \delta \dot{\epsilon}_V dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i ds = 0 \quad (8)$$

که ثابت خطای K یک ثابت مثبت بزرگ برای تغییر حجم است و $\dot{\epsilon}_V = \dot{\epsilon}_{ij}$ نرخ کرنش حجمی است.

در معادله (۸)، δu_i متغیر دلخواه و $\delta \dot{\epsilon}$ و $\partial \dot{\epsilon}_V$ تغییرات نرخ کرنش حاصل از ∂u_i هستند. معادله (۸)، معادله پایه برای فرمول نویسی لاگرانژی اجزای محدود است.

این مدل ماده ویسکوپلاستیک صلب، با یک مدل انتقال حرارت جفت می شود که به صورت زیر نشان داده می شود:

$$(KT_{,i})_{,i} + r - (\rho c_p T) = 0 \quad (9)$$

که k ، هدایت حرارتی، r ، نرخ تولید حرارت T ، دما، چگالی ویژه ρ ظرفیت حرارتی ویژه را نشان می دهد. اولین جمله و سومین جمله به ترتیب نرخ انتقال حرارت و نرخ تولید انرژی حرارتی داخلی را نشان می دهند. نرخ تولید حرارت در قطعه کار بر اثر تغییر شکل پلاستیک به صورت رابطه زیر نشان داده میشود:

$$\dot{r} = k \rho \dot{\epsilon} \quad (10)$$

k کسر انرژی مکانیکی تبدیل شده به حرارت را نشان میدهد که برابر ۰٫۹ فرض می شود. کسر باقیمانده از انرژی تغییر شکل پلاستیک باعث تغییر در چگالی نابیای ها، تولید مرز دانه و مهاجرت آنها، استحاله های فازی و کامل شدن آنها می شود. معادله تعادل انرژی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\int_V K T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c_p T dT - \int_V K \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T ds = 0 \quad (11)$$

q_n شار حرارتی عمود بر سطح فصل مشترک است. به طور کلی q شامل از دست رفتن حرارت به صورت همرفتی و تشعشع و دریافت حرارت به علت حرکت ابزار روی قطعه کار است. توزیع حرارتی در قطعه کار و ابزار می‌تواند با حل معادله بالا به دست آید. در مدل‌سازی قطعه کار و ابزار، ورق فلزی با حدود ۷۰۰۰۰ چهار وجهی و میانگین اندازه ضلع ۰/۷۵ mm مش‌بندی شد. جدول ۲ ویژگی‌های حرارتی قطعه کار و ابزار را نشان می‌دهد:

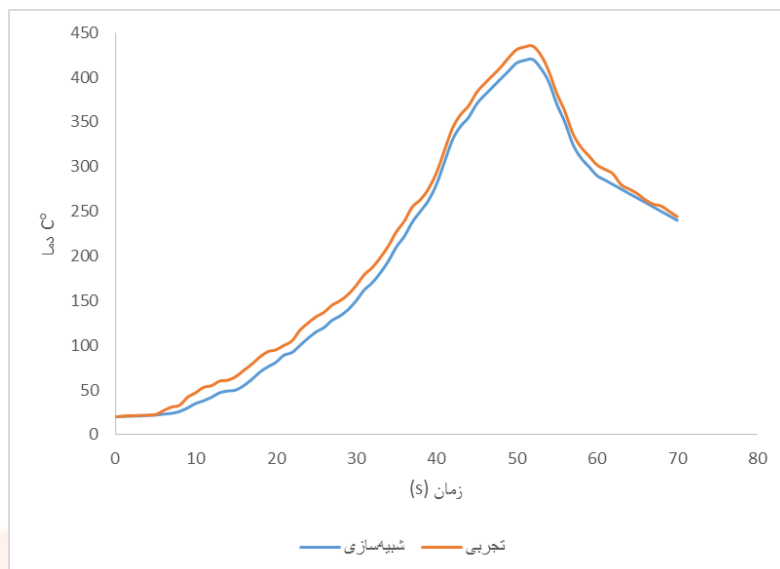
جدول ۲- ویژگی‌های حرارتی قطعه کار و ابزار

کمیت (واحد)	آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱	فولاد H۱۳
ظرفیت حرارتی (N/mm ² °C)	۲/۴	۴/۵
رسانایی حرارتی (W/m°C)	۱۸۰	۲۴/۵
ضریب انتقال حرارت بین ابزار و قطعه کار (N/°C s mm ²)	۱۱	۲۲
ضریب انتقال حرارت بین ابزار/قطعه کار و هوا	۰/۰۲	۰/۰۲
تشعشع	۰/۲۵	۰/۷

نتایج و بحث

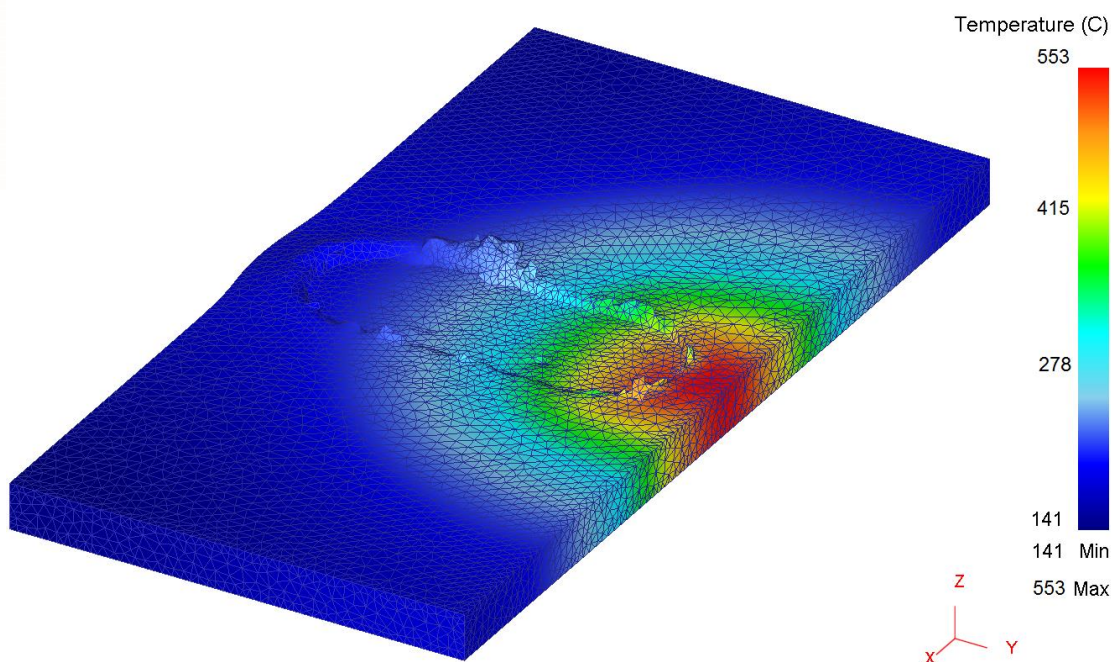
حین انجام فرآیند FSP، در اثر چرخش ابزار، ماده موجود در پشت آن دچار تغییر شکل پلاستیک، اغتشاش، اختلاط و فرج می‌شود. این اعمال به مقدار حرارت ایجاد شده توسط اصطکاک بین ابزار و ورق وابسته‌اند. بنابراین، نیاز اولیه فرآیند FSP، تولید مقدار مشخصی حرارت اصطکاکی برای بالا بردن دمای قطعه و نرم کردن آن جهت تغییر شکل پلاستیک شدید است. پذیرفته شده است که انرژی تغییر شکل پلاستیکی و انرژی اصطکاکی، دو منبع تولید کننده حرارت مورد نیاز برای فرآیند FSP هستند. انرژی اصطکاکی به ضریب اصطکاک، مساحت سطح اصطکاکی بین ابزار و ورق، سرعت چرخش ابزار و نیروی وارد شده از طرف شانه ابزار وابسته است (Buffa, Hua, Shivpuri, Fratini, 2006).

شکل ۲، تاریخچه دمایی بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی را برای نقطه‌ای در فاصله ۱۰ mm از مرکز ناحیه اغتشاشی نشان می‌دهد. نتایج، هماهنگی خوبی بین دماهای پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده با ترموکوپل نشان می‌دهد.



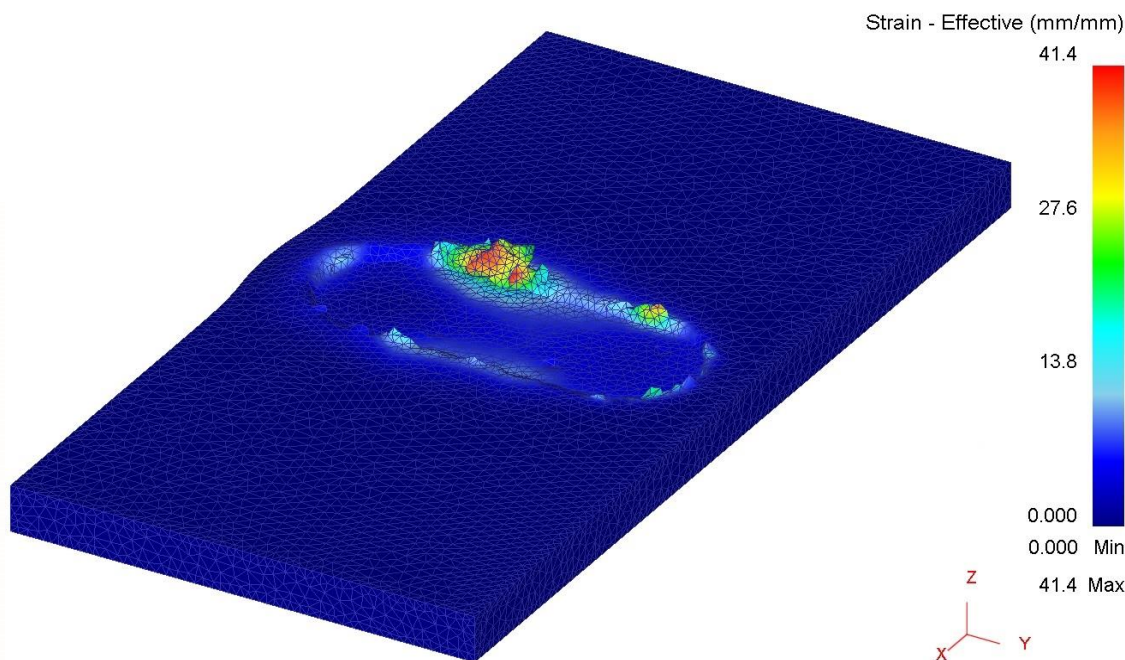
شکل ۲- تاریخچه دمایی بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی را برای نقطه‌ای در فاصله ۱۰ mm از مرکز ناحیه اغتشاشی

شکل ۳ توزیع دما را حین انجام فرآیند روی سطح ورق نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع دمای اطراف ابزار به صورت متقارن نیست و دمای بیشتری در جلوی ابزار ظاهر می‌شود. بیشترین دما در فصل مشترک ابزار و ورق ظاهر می‌شود و مقدار آن 553°C است. در حالیکه دما در فصل مشترک ابزار و ورق در فاصله ۵ mm از مرکز منطقه اغتشاشی 475°C است، دما در فاصله ۵ mm در جلوی ابزار 543°C است.



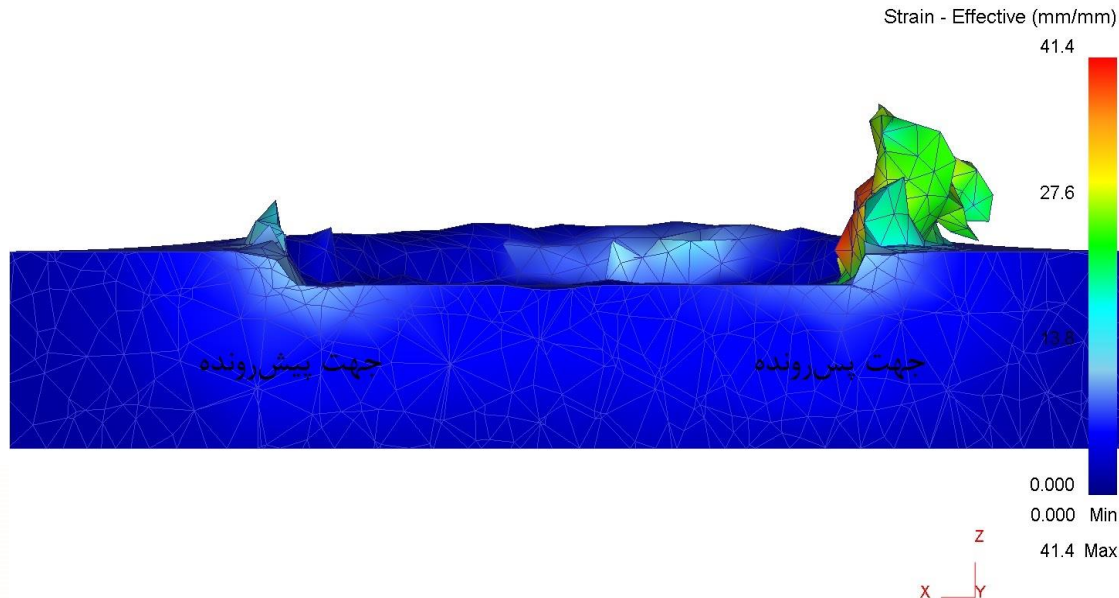
شکل ۳- توزیع دما در سطح ورق

شکل ۴ توزیع کرنش را روی سطح ورق نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، زائده‌های جدا شده از سطح ورق، تحت کرنش شدیدی قرار گرفته و کانتور کرنش را تحت تاثیر قرار داده‌اند. بیشینه کرنش ایجاد شده در منطقه FSP، ۹/۹۸ است. که در لبه منطقه FSP شده و در جهت پیش‌رونده اتفاق می‌افتد که این با نتایج بدست آمده در تحقیقات قبلی سازگار است (Dawson, He, Boyce, 2007).



شکل ۴- توزیع کرنش موثر در سطح ورق

شکل ۵، مقطع عرضی ورق را بعد از گذشت ۲۴ ثانیه از شروع پیشروی ابزار نشان می‌دهد. مواد موجود در جهت پیش‌رونده به شانه ابزار چسبیده و وارد منطقه اغتشاشی می‌شوند. به همین دلیل بیشترین میزان کرنش مربوط به این منطقه است. مواد موجود در منطقه پس‌رونده، حرکت کوچکی به سمت عقب دارند، لذا کرنش کمتری در این قسمت رخ می‌دهد و منطقه اغتشاشی در جهت پیش‌رونده کشیده‌تر می‌شود (Zhang, Zhang, 2008).



شکل ۵- توزیع کرنش موثر در سطح ورق

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار Deform 3D، بر پایه روش لاگرانژی، انجام شد. شبیه‌سازی توانست دما و کرنش موثر را با موفقیت پیش‌بینی کند. توزیع دمای اطراف ابزار به صورت متقارن نبود و بیشترین دما (۵۵۳°C) در فصل مشترک ابزار و ورق ظاهر شد. بیشینه کرنش ایجاد شده در منطقه FSP، ۹/۹۸ بود که در لبه منطقه FSP شده و در جهت پیش‌رونده اتفاق افتاد. بخش زیادی از تغییر شکل پلاستیک در جهت پیش‌رونده اتفاق می‌افتد و باعث کشیده‌تر شدن منطقه اصطکاکی در این قسمت می‌شود.

مراجع:

- Karthikeyan, L., Senthilkumar, V. S., Balasubramaniam, V., Natarajan S. (2008). "Mechanical property and microstructural changes during FSP of cast Al2285". *Materials and Design*, Vol. 30, Pp. 2237-2242.
- Surekha, K., Murthy, B. S., Prasad Rao, K. (2009) "Effect of processing parameters on the corrosion behaviour of friction stir processed AA2219 aluminium alloy". *Solid State Sciences*, Vol.11 Pp. 907-917.
- Asadi, P., Mahdavinnejad, R. A. and Tutunchilar, S. (2011). "Simulation and experimental investigation of FSP of AZ91 magnesium alloy". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, Pp. 6469-6477.
- Buffa, G., Hua, J., Shivpuri, R., Fratini, L. (2006). "Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 419, Pp. 381-388.
- He, Y., Boyce, D., Dawson, P. (2007). *Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications*, College Park, MD: American Institute of Physics.
- Zhang H. W., Zhang, Z., Chen, J. T. (2006). "Effect of angular velocity of the pin on material flow during friction stir welding". *Acta Metallurgica Sinica*, Vol. 41, Pp. 853-859.