

Numerical simulation and experimental validation of thermal evolutions and welding-induced distortion of EBW in a plate of Ti-6Al-4V

#### \*Masoud Mehrabi-Mehdiabad<sup>1</sup>, Mehdi Talebipour<sup>2</sup>

1- Expert of R & D department of Mahan Sanat Navid Company of Tehran, Tehran, Iran

2- Expert of Advanced Materials and Nanotechnology Laboratory, Faculty of Materials Science and Engineering, Khaje Nasir Al-Din Tusi University, Tehran, Iran

**Citation:** Mehrabi Mehdiabadi M, Talebipour M. Numerical simulation and experimental validation of thermal evolutions and welding-induced distortion of EBW in a plate of Ti-6Al-4V. Metallurgical Engineering 2019: 22(2): 124-134 http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.100621.1227

doj) : http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.100621.1227

### ABSTRACT

Electron Beam Welding (EBW) is a high-efficiency, high-precision welding method that its application is increasing rapidly in various industries, including car manufacturing, aviation and aerospace. The simulation of the electron beam welding process with the aim of predicting the residual stress in the work piece and analyzing the temperature and stress profiles during the welding process has always been of interest to the researchers for the purpose of welding engineering and prediction of optimal conditions. In this research, the Finite Element Method (FEM) model of electron beam welding was prepared in 3D and loaded on the Abaqus software. This model includes thermal and mechanical interaction, and metallurgical phenomena. The thermal analysis is unilaterally coupled with mechanical analysis. The heat source that is used is a combined heat source that is attached to Abaqus using the subroutine and the Fortran coding. Welding is in a vacuum environment and the thermal dissipation due to thermal conductivity and radiation is applied in different parts as boundary conditions on the model. The workpiece is made of Ti–6Al–4V alloy and has thermal and mechanical properties which are defined dependent on temperature. The temperature variations during welding and the residual stress of the base metal which is obtained from the numerical simulation are comparable to the results recorded in the practical studies and an acceptable adaptation was made that shows the accuracy of the combined heat source model used in this research for modeling of electron beam welding.

Keywords: simulation, electron beam welding (EBW), heat source modeling.

Received: 1 January 2019 Accepted: 11 June 2019

\* Corresponding Author:

Masoud Mehrabi-Mehdiabad, BSc

Address: Expert of R & D department of Mahan Sanat Navid Company of Tehran, Tehran, Iran. Tel: +98 (9197548093) E-mail: masoud\_mehrabi@ut.ac.ir

www.SID.ir

# شبیهسازی عددی و اعتبارسنجی آزمایشگاهی تحولات حرارتی و اعوجاج ایجاد شده در حین جوشکاری پرتو الکترونی روی ورق از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V

<sup>\*</sup>مسعود مهرابی مهدی آبادی<sup>۱</sup>، مهدی طالبی پور<sup>۲</sup>

۱- کارشناس بخش تحقیق و توسعه شرکت ماهان صنعت نوید تهران، تهران، ایران. ۲- کارشناس آزمایشگاه مواد پیشرفته و نانوتکنولوژی، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجهنصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

# چکیدہ

جوشکاری پرتو الکترونی (EBW) یک روش جوشکاری با بازدهی و دقت بالا است که کاربرد آن در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هواپیمایی و هوافضا به شدت رو به افزایش است. شبیه سازی فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی با هدف پیش بینی تنش باقی مانده در قطعه کار و آنالیز پروفیل های دمایی و تنشی حین فرآیند جوشکاری، به جهت امکان مهندسی جوش و پیش بینی شرایط بهینه، همواره مورد توجه محققین بوده است. در این پژوهش مدل المان محدود جوشکاری پرتو الکترونی به صورت سه بعدی آماده شده و بر روی نرمافزار Abaqus بارگذاری شده است. این مدل شامل برهمکنش های حرارتی، مکانیکی و پدیده های متالورژیکی است. آنالیز حرارتی به صورت یکطرفه با آنالیز مکانیکی کوپل شده است. منبع حرارتی مورد استفاده، منبع حرارتی ترکیبی است که با استفاده از زیر برنامه و کدنویسی به زبان فورترن به آبکوس متصل شده است. جوشکاری در محیط خلاء بوده و اتلاف حرارت ناشی از هدایت حرارتی و ترکیبی است که با استفاده از زیر برنامه و کدنویسی به زبان فورترن به آبکوس متصل شده است. آلیاژ 40–416 بار کوپل شده است. منبع حرارتی مورد استفاده، منبع حرارتی و ترکیبی است که با استفاده از زیر برانمه و کدنویسی به زبان فورترن به آبکوس متصل شده است. آلیاز 40–418 مرزی بر محیط خلاء بوده و اتلاف حرارتی ناشی از هدایت حرارتی و تابش، در قسمتهای مختلون شرایط مرزی بر مدل اعمال شده است. آلیاژ 40–414 مرزی بر محیط خلاء بوده و اتلاف حرارتی ناهی این می در قسمتهای مختلف بعنوان شرایط مرزی بر مدل اعمال شده است. آلیاژ 40–414 میده و خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دما تعریف شده است. تغییرات دمایی حین جوشکاری و تنش باقی مانده فلز پایه که از شبیه سازی عددی بدست آلیاژ 40–414 میزی بر مدور سریهای عملی قابل مقایسه بوده و تطابق قابل قبول حاصل شده که دقت مدل منبع حرارتی ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش جهت مدل سازی جوش کرای یر تو الکترونی را نشان می هو دو اعل قابل قبول حاصل شده که دقت مدل منبع حرارتی ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش جه مدل سازی جوشکاری پر تو الکترونی را نشان می دهد.

واژههای کلیدی: شبیه سازی، جوشکاری پرتو الکترونی (EBW)، مدل سازی منبع حرارتی.

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۱

### ۱. مقدمه

جوشکاری پرتو الکترونی<sup>۱</sup> یکی از روشهای جوشکاری دقیق و با کیفیت بالا است که اخیرا در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا و اتوموبیلسازی اهمیت ویژهای پیدا کرده است (۱). این روش از فرآیندهای جوشکاری نفوذی عمیق پر انرژی است که در آن نسبت عرض به عمق جوش خیلی کوچک است. در مقایسه با سایر روشهای متداول جوشکاری، در جوشکاری پرتو الکترونی به دلیل حرارت ورودی کمتر، اعوجاج ایجاد شده در قطعه کار نیز بسیار کمتر است (۲). ناحیه جوش در این روش بسیار باریک است و چگالی بالای انرژی، سرعت بالای حرکت بر روی خط جوش را ممکن می سازد. بنابراین فرآیند جوشکاری بسیار سریع اتفاق میافتد و فلزپایه در ناحیه اطراف محدودهی جوش، انرژی حرارتی

1. Electron Beam Welding (EBW)

www.SID.ir

اضافی دریافت نمی کند که همین امر باعث می شود محدوده ی متاثر از حرارت<sup>۲</sup> تا حد ممکن کاهش یابد (۳).

در یک مجموعه بیم الکترونی، الکترونهای ساطع شده از یک فیلامان با بار الکتریکی منفی بوجود میآیند که به آن کاتد گفته میشود. با افزایش جریان الکتریکی در فیلامان، دما افزایش پیدا کرده و زمانی که به دمای تابش<sup>۳</sup> برسد، فیلامان از خود الکترون ساطع میکند. این الکترونها با قرارگیری در میدان الکتریکی با بار مخالف (آند با بار مثبت) که دقیقا زیر کاتد قرار گرفته است، شتاب میگیرند. پس از عبور الکترونهای شتاب گرفته از خفرهی وسط آند، الکترونها توسط کویلهای الکترومغناطیسی در نقطهای روی سطح قطعه کار متمرکز میشوند (شکل۱-الف)(۴). جریان بیم

<sup>\*</sup> نویسنده مسئول: مهندس مسعود مهرابی مهدیآبادی نشانی: تهران، بخش تحقیق و توسعه شرکت ماهان صنعت نوید تهران. تلفن: (۹۱۹۷۵۴۸۰۹۳) ۹۸+

س پست الکترونیکی: masoud\_mehrabi@ut.ac.ir

<sup>2.</sup> Heat Affected Zone (HAZ)

<sup>3.</sup> Emission Temperature

تابستان ۱۳۹۸ . دوره ۲۲ . شماره ۲ 🦳 شبیه سازی عددی و اعتبار سنجی آزمایشگاهی تحولات حرارتی و اعوجاج ایجاد شده در حین جوشکاری پرتو الک ورق از جنس آلياژ Ti-۶Al-۴V



شکل ۱. (الف) دستگاه جوشکاری پرتو الکترونی (ب) حوضچه مذاب (۴).

الکترونی و ولتاژ شتاب دهنده که به طور معمول در فرآیندهای جوشكارى پرتو الكترونى مورد استفاده قرار مى گيرند، به ترتیب در محدودهی mA ۱۰۰۰–۵۰ و ۳۷–۳۰ تغيير مي کند (۵).

به طور معمول سیستمهای جوشکاری پرتو الکترونی در محيط خلاء مورد استفاده قرار مي گيرند (۶). اين امر علاوه بر مقاومسازی قطعه کار در برابر اکسیداسیون، پایداری ستون الکترونی در حین جوشکاری را نیز تضمین می کند. به عبارتی با کاهش فشار هوای محیط، میزان پراکندگی الکترونها در اثر برخورد با مولکولهای هوا نیز کاهش می یابد. در نتیجه با كاهش فشار اتمسفر محيط، ميتوان قطر بيم الكتروني را کاهش داد و پرتوهای الکترونی را در یک محدودهی خیلی کوچک در حدود mm ۰/۸-۳/۰، متمرکز کرد. چگالی انرژی ورودی نیز تا مقادیر بسیار بالای ۱۰۰۰ W/m<sup>۲</sup> افزایش می یابد (۷).

شبیهسازی عددی فرآیندهای جوشکاری در بحث مهندسی و تولید بسیار حائز اهمیت است (۸–۱۱). در مقایسه با مطالعات عملی، شبیهسازی عددی میتواند با تمرکز بر مشخصهیابی حوضچه جوش، ابعاد منطقهی متاثر از حرارت، اعوجاج نهایی ایجاد شده در قطعه کار و تنش باقی مانده، جزئیات بیشتری در اختیار محققین قرار دهد (۱۲–۱۳). به این دلیل شبیهسازی می تواند باعث کاهش حجم یژوهش های عملی و هزینههای آزمون-خطا، جهت دستیابی به شرایط بهینه تولید شود (۱۴).

www.SID.ir

در این یژوهش ابتدا چهارچوب آنالیز حرارتی-مکانیکی جوشكارى پرتو الكترونى انجام شده به روش المان محدود شامل مدل المان محدود مورد استفاده، منبع حرارتی مورد استفاده و نیز رفتار مکانیکی-حرارتی ماده از دمای محیط تا دمای ذوب ماده تشریح می شود. سپس نتایج مدل سازی عددی انجام شده با نتایج تجربی مقایسه می شود تا میزان موفقیت در شبیهسازی پروفیلهای حرارتی و تنشی ایجاد شده در اثر جوشکاری مورد سنجش قرار گیرد.

# ۲. مواد و روش تحقیق

مدل المان محدود

در این پژوهش، مدل سه بعدی جوشکاری پرتو الکترونی هم جنس در وسط ورق از جنس آلياژ 4V–Ti–6Al با طول و عرض و ضخامت به ترتیب ۲۹۰، ۱۰۴و ۱۰/۵ میلیمتر به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل شرایط متقارن قطعه کار حول خط جوش و با هدف کاهش مدت زمان شبیهسازی، این مدل به صورت متقارن، با صفحه تقارن x-z مدلسازی شده است. بدین ترتیب میتوان با استفاده از مشهای ریزتر، دقت محاسبات را افزایش داد و گرادیانهای حرارتی و تنشی دقیقتری بدست آورد بدون آنکه هزینههای محاسباتی افزایش پیدا کند (۱۵).

در بخشهای مختلف از قطعه کار، المانها با ابعاد و اندازهی مختلف استفاده شده است تا هم دقت کافی در شبیهسازی وجود داشته باشد و هم زمان محاسبات بسیار

ArchivelofSHD

Y AUCHING. OF SLLD

찬 مهندسي مآلور ژي



شکل ۲. نحوه توزیع و ابعاد المان های مدل سه بعدی.

طولانی و غیر منطقی نشود. طبیعتا در نزدیکی خط جوش ریزترین مش بندی مدل انجام شده است و با فاصله گرفتن از آن اندازه مشها درشت تر می شوند. ابعاد کوچکترین المان، mm ۲/۰۵×۰/۲۵×۱/۴۵۸ است که در شکل ۲ نشان داده شده است. در مدل سه بعدی ۱۳۲۰۰ المان هشت وجهی شده است. در مدل سه بعدی ۱۳۲۰۰ المان هشت (۶ و ۲۶۵۸۳ گره ایجاد شده است. نوع المانها برای آنالیز حرارتی DC3D8 و برای آنالیز مکانیکی SBR است (۶۶). همانطور که پیشتر اشاره شد، به دلیل تقارن حول صفحهی میانی جوش، فقط نیمی از مدل مش بندی شده است.

مدل منبع حرارتی ترکیبی یکی از مدلهای متداول در مدل منبع حرارتی ترکیبی یکی از مدلهای متداول در شبیهسازی روشهای جوشکاری با عمق نفوذ بالا و شدت بیم زیاد است (۱۷). جهت شبیهسازی حفرهی کلیدی در جوشکاری پرتو الکترونی، از مدل منبع حرارتی ترکیبی حاصل از اضافه شدن منبع حرارتی مخروطی حجمی به یک منبع حرارتی سطحی یکنواخت دایرهای استفاده شده است. این منبع حرارتی در پژوهشهای سایر محققین نیز مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج قابل قبول حاصل شده است (۱۸). در منبع حرارتی مخروطی حجمی، توان به صورت تابع گاوسی<sup>†</sup> در صفحهی ۷–x و توزیع خطی در راستای عمق نفوذ (راستای z)، توزیع شده است. این تابع با رابطه ۱ بیان می شود:

(۱) رابطه (۱)
$$q_{v}(x.y.z) = \frac{2\eta\beta P}{\pi r_{0}^{2}d_{0}} exp\left[1 - \left(\frac{x^{2} + y^{2}}{r_{0}^{2}}\right)\right]\left(\frac{z}{d_{0}}\right)$$

4. Gaussian

که در آن  $\beta$  نسبت جدایش است که نسبت توان منبع حجمی به مجموع توان بیم الکترونی را بیان میکند. P مجموع توان بیم الکترونی است که برابر حاصلضرب ولتاژ مجموع توان بیم الکترونی است که برابر حاصلضرب ولتاژ مجموع توان بیم الکترونی است  $\gamma$  بازدهی جذب انرژی توسط قطعه کار است.  $r_0$  شعاع منبع حرارتی در سطح قطعه کار و  $d_0$  عمق نفوذ جوش پرتو الکترونی است (۱۹).

منبع حرارتی سطحی توسط رابطه زیر تعریف میشود:

رابطه (۲)

$$q_{i}(x.y.z)_{0} = \frac{(1 - \beta)P}{\pi(r_{a} - r_{0})^{2}}r_{0}^{2} \le x^{2} + y^{2} \le r^{2} . z = d$$

که در آن  $_{i}^{r}$  شعاع منبع حرارتی سطحی است (۱۹). معادله ۲ نشان می دهد که منبع حرارتی سطحی فقط می تواند در محدودهی  $_{0}^{r}$  تا  $_{i}^{r}$  در سطح اعمال شود. پارامترهای نامشخص در مدل ترکیبی منبع حرارتی، بازدهی جوشکاری و ضریب جدایش هستند که تعیین می کنند چه مقداری از توان ورودی به منبع حجمی و چه مقدار به منبع سطحی اختصاص دارد. انتخاب مقادیر β و  $\eta$  بسیار پر اهمیت است تا بتوان پروفیل های مذاب را مطابق با نتایج آزمایش های تجربی بدست آورد. جهت استخراج این مقادیر، شبیه سازی هایی همراه با آزمون و خطا بر روی مدل انجام شده است. مقادیر بهینه شدهی مورد نیاز برای مدل سازی منبع حرارتی، در جدول ۱ آورده شده است.

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، شعاع منبع حرارتی حجمی برابر mm ۲/۵ است. ابعاد المانها در طول خط جوش باید کمتر از mm ۲/۵ میلیمتر باشد تا حرارت بتواند بر المانها به درستی اعمال شود (۲۰). جدول ۲ پارامترهای جوشکاری تنظیم شده جهت انجام آزمایشهای تابستان ۱۳۹۸ . دوره ۲۲ . شماره ۲ 🦷 شبیه سازی عددی و اعتبار سنجی آزمایشگاهی تحولات حرارتی و اعوجاج ایجاد شده در حین جوشکاری پرتو الکترونی ورق از جنس آلياژ Ti-۶Al-۴۷



جدول ۱. مقادیر عددی پارامترهای منبع حرارتی ترکیبی

عملی را نشان میدهد. مقادیر مشابه برای مدلسازی منبع حرارتی استفاده شده است و با استفاده از زیربرنامه و به زبان برنامهنویسی فورترن به نرمافزار Abaqus 6-13 اعمال شده است.

# مدلسازی ماده

در آنالیز حرارتی، ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی و دانسیته به صورت توابعی از دما تا نقطه ذوب، مورد استفاده قرار گرفته است. این خواص تا دمای C° ۱۶۵۵ تعریف شده است. همانگونه که در پژوهشهای Michaleris (۲۱) و Goldak (۲۲) گزارش شده است، مقدار عددی ضریب هدایت حرارتی در دماهای بالاتر از نقطه ذوب بسیار زیاد تعریف شده است که علت آن سیالیت بالای مذاب در داخل حوضیهی مذاب جوشکاری است. گرمای نهان ذوب در حوضچهی مذاب نیز ناچیز در نظر گرفته شده است تا یکنواختی عددی در آنالیز حرارتی از بین نرود. گزارش شده است، ناچیز در نظر گرفتن گرمای نهان انجماد، تاثیر چندانی بر دمای بدستآمده از شبیهسازی ندارد (۱۹).

در آنالیز مکانیکی، مدول یانگ، تنش تسلیم و ضریب انبساط حرارتی به صورت توابعی از دما تا نقطه ذوب، تعریف شدهاند. ضریب پواسون در تمامی دماها برابر مقدار ثابت ۰/۳۴۲ تعریف شده است. همچنین جهت مدلسازی رفتار سیلان ماده، از مدل وان-میسز<sup>۵</sup> استفاده شده است. خواص مکانیکی-حرارتی مورد استفاده، به صورت تابعی از دما برای آلیاژ Ti–6Al–4V در شکل ۳ نشان داده شده است.

روش محاسباتی و شرایط مرزی

شبیهسازی مدل سه بعدی، به صورت کوپل یک طرفه، بر روی نرم افزار Abaqus 6-13 بار گذاری شده است. شبیهسازی شامل دو مرحله است. در مرحله نخست آنالیز حرارتی گذرا خطی انجام شده است تا تاریخچه دمایی در سیکل گرمایش و سرمایش ماده حاصل شود. در بخش دوم، تحلیل خطی الاستیک-پلاستیک ایستایی بر روی سازه انجام گرفته است

5. Von-Mises

تا مقادیر تنش باقیمانده و اعوجاج نهایی در المانها بدست آید. تغییرات دمایی المانها در بخش اول بعنوان نیرومحرکه برای تغییرات تنشی در بخش دوم مورد استفاده قرار گرفته است. Increment time در هر تحلیل تنشی برابر مقدار آن در تحلیل حرارتی قرار داده شده است و ابعاد و اندازه مشها نیز در تحلیل دوم تغییر نکرده است.

Archivelogsid

در تحلیل حرارتی، به دلیل آنکه فرآیند جوشکاری در محيط خلاء انجام مي شود اتلاف حرارتي ناشي از همرفتي صفر در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت بین قطعه کار و گیرههای جوشکاری که محل قرار گیری آنها در شکل ۴ نشان داده شده است، برابر ۵۰۰ W/m.K قرار داده شده است و ضریب تابش در تمام قطعه برابر ۰/۸ است (۲۴). شبیهسازی مدل سه بعدی با منبع حرارتی ترکیبی در این پژوهش، با آنالیز خطی بر روی سیستم HP-PAVILION-dv6 به مدت ۷۴ ساعت به طول انجامید.

# ۳. نتایج و بحث

شکل ۵ محل دقیقتر ترموکوپلهای مورد استفاده جهت اندازهگیری تغییرات دمایی را نشان میدهد. ترموکوپلها به ترتیب در ۳ mm، ۳، ۲/۵، ۲/۵ از خط جوش قرار گرفتهاند. تغییرات دمایی ثبت شده توسط ترموکوپلها از پژوهش Chiumenti (۲۵) استخراج شده است و نتایج آن با نتایج حاصل از شبیهسازی انجام شده در این پژوهش مقایسه شده است. جهت دستيابي به مقدار بهينه تعداد المانها، كاهش هزینههای محاسباتی و جلوگیری از گسستگی نتایج همچون سایر پژوهشهای شبیهسازی آنالیز حساسیت به مشبندی انجام شده است که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده می شود. تعداد المانها در این پژوهش که در بخش مدل المان محدود گزارش شد، حاصل نتایج همین آنالیز حساسیت به مشبندی است. براي اين آناليز تابعيت حداكثر دما از تعداد المانها مورد بررسی قرار گرفته است و مشاهده می شود تغییرات حداکثر دما از تعداد المان ۱۲۰۰۰ به بالا بسیار ناچیز می شود.

شکل ۷-الف تا د، نتایج ثبت شده توسط ترموکوپلهای ۱ تا ۴ را با نتایج حاصل از شبیهسازی مقایسه میکند. تطابق

www.SID.ir





شکل ۳. خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V).

مناسبی بین نمودارهای تغییرات دمایی حاصل از شبیهسازی و نمودارهای حاصل از آزمایشهای عملی در ترموکوپلهای قرار گرفته در موقعیتهای مختلف، مشاهده میشود.

فقط در مقادیر ماکزیمم پیک دمایی، اختلاف قابل توجهی مشاهده میشود. به نظر میرسد این اختلاف، به اختلال در معادلات انتقال حرارت، در نتیجه وجود ترموکوپلهای حرارتی در آن بخش از قطعه کار مرتبط است که بخصوص www.SID.ir

در دمای بالا خود را نشان می دهد (۱۷). با افزایش فاصله از خط جوش مشاهده می شود اختلاف در پیک کاهش می یابد. ترموکوپل ها به دلیل ابعاد کوچکتر و هدایت حرارتی سریع تر نسبت به قطعه کار به دلیل جنس متفاوتشان، باعث می شوند حداکثر دما ثبت شده توسط ترموکوپل ها بیشتر از دمای حاصل از شبیه سازی باشد.



**Arcy مرافع المعارم ۲** شماره ۲ شماره ۲ شمیه سازی عددی و اعتبار سنجی آزمایشگاهی تحولات حرارتی و اعوجاج ایجاد شده در حین جوشکاری پر تو الکترونی روی آر منبه سازی که Ti-۶Al-۴۷ ورق از جنس آلیاژ ۲۰-۲۱-۶۹۱



شکل ۴. محل قرار گیری گیرههای قطعه کار.



شکل ۵. محل قرار گیری ترموکوپلها جهت مقایسه نتایج عملی با شبیهسازی.



**شکل ۶**. تابعیت حداکثر دما در شبیهسازی از تعداد المانها.



شکل ۷. مقایسه تغییرات دمایی ترموکوپلها در موقعیتهای مختلف(۲۵) با نتایج حاصل از شبیهسازی انجام شده در این پژوهش الف) ترموکوپل اول ب) ترموکوپل دوم ج) ترموکوپل سوم د) ترموکوپل چهارم.



شكل ٨. گراف توزيع دما حين فرآيند جوشكارى پرتو الكترونى.

شکل ۸ گراف توزیع دمایی در حین فرآیند EBW را نشان متاثر از جوشکاری، اطراف خط جوش کوچک باشد در این میدهد. تمرکز بالای منبع حرارتی که باعث میشود منطقه ی 💦 شکل به خوبی نشان داده می شود.

www.SID.ir

http:metalleng.ir/



تابستان ۱۳۹۸ . دوره ۲۲ . شماره ۲ شبیه سازی عددی و اعتبار سنجی آزمایشگاهی تحولات حرارتی و اعوجاج ایجاد شده در حین جوشکاری پرتو الکترونی روی ورق از جنس آلیاژ ۲۷-Ti-۶Al



شکل ۹. مقایسه ناحیه متاثر از حرارت الف) بدست آمده از بررسی ریزساختاری(۲۵) ب) بدست آمده از شبیه سازی انجام شده در این پژوهش.



**شکل ۱۰**. اعوجاج ایجاد شده در صفحهی Z به صورت کیفی و کمی الف) بدست آمده از اسکنر سه بعدی (۲۵) ب) بدست آمده از شبیهسازی انجام شده در این پژوهش.

شکل ۹-الف ریزساختار آلیاژ بعد از جوشکاری را نشان میدهد (۲۵). پیش بینی ناحیه HAZ با استفاده از مدل سازی منبع حرارتی، یکی از مزایا و پر اهمیت ترین دستآوردهای شبیه سازی است. شکل ۹-ب نشان میدهد ناحیه HAZ پیش بینی شده از شبیه سازی، مطابقت قابل قبولی با ناحیه HAZ حاصل از بررسی ریز ساختار آلیاژ پایه بعد از جوشکاری، دارد. همچنین عمق نفوذ نیز در این مدل به درستی مدل سازی شده است.

شکل ۱۰-الف اعوجاج نهایی بدستآمده را در غالب گراف توزیع جابجایی، بعد از مرحلهی خنک شدن نشان میدهد. گراف توزیع اعوجاج توسط سیستم اسکنر<sup>۶</sup> سه بعدی ثبت شده است. شکل ۱۰-ب نتایج اعوجاج متناظر از شبیهسازی عددی را در صفحه با بردار نرمال z نشان میدهد. از هر دو منظر کیفی و کمی، تطابق بسیار مناسبی بین نتایج حاصل

6. Scanner

References

- Aburuga TKS, Sedmak AS, Radakovic ZJ. Numerical aspects for efficient welding computational mechanics. Therm Sci. 2013;17(1)139–148.
- [2] Schultz H. Electron beam welding. Cambridge: Abington Publishing, 2005; 198-228.
- [3] Luo Y, Liu J, Ye H. An analytical model and tomographic calculation of vacuum electron beam welding heat source. Vacuum. 2010;84(6)857–863.
- [4] Lacki P, Adamus K. Numerical simulation of the electron beam welding process. Comput Struct. 2011;89(11–12) 977–985.
- [5] Roberts J. ASM handbook of Welding brazing and soldering. ASM International. 1993; 2873.
- [6] Cottrell CLM. Electron beam welding a critical review. Mater Des. 1985;6 (6) 285–291.
- [7] Tian Y, Wang C, Zhu D, Zhou Y. Finite element modeling of electron beam welding of a large complex Al alloy structure by parallel computations. J Mater Process Technol. 2008;199(1)41– 48.
- [8] Darmadi DB. Validating the accuracy of heat source model via temperature histories and temperature field in bead-on-plate welding. Int J Eng Technol. 2011;11 (5) 12–20.
- [9] Lindgren LE. Finite element modeling and simulation of welding Part 1: Increased complexity. J Therm Stress. 2006;24 (11) 37–41.
- [10] Lindgren LE. Finite element modeling and simulation of welding. part 2: Improved material modeling. J Therm Stress. 2001;24(3)195–231.
- [11] Lindgren LE. Finite element modeling and simulation of welding. Part 3: Efficiency and integration. J Therm Stress. 2001;24(4)305–334.
- [12] Deng D, Murakawa H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements. Comput Mater Sci. 2006;37(3)269–277.
- [13] Deng D, Murakawa H, Liang W. Numerical simulation of welding distortion in large structures. Comput Methods Appl Mech Eng. 2007;196(45–48)4613–4627.
- [14] Tadano S, Hino T, Nakatani Y. A modeling study of stress and strain formation induced during melting process in powderbed electron beam melting for Ni superalloy. J Mater Process Technol. 2018;257 (2) 163–169.
- [15] Liu C, Zhang J, Wu B, Gong S. Numerical investigation on the variation of welding stresses after material removal from a thick titanium alloy plate joined by electron beam welding. Mater Des. 2012;34 (1) 609–617.
- [16] Karlsson K, Sorensen H. Abaqus Theory Manual Version 5. Simulia. 2016; 414.
- [17] Tsirkasa S, Papanikos P, Kermanidis T. Numerical Simulation of the Laser Welding. J Mater Process Technol. 2013;134 (3) 59–69.
- [18] Babalová E, Behúlová M. Numerical simulation of temperature fields by welding of Ti-Al alloys applying volumetric heat source. Adv Mater Res. 2014;887–888 (1) 1280–1283.

از شبیهسازی با نتایج حاصل از اندازه گیری اعوجاج با استفاده از دستگاه اسکنر سه بعدی بدست آمده است که نشان از دقت قابل قبول منبع حرارتی ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش و بهطور کلی شرایط شبیهسازی دارد. اختلاف جزئی در مقادیر عددی اعوجاج ایجاد شده، به مبحث قید و بند در حین جوشکاری مرتبط است. در شبیهسازی، قیدها طوری در نظر گرفته شدهاند که حین جوشکاری، قطعه کار کاملا ثابت نظر گرفته شدهاند که حین جوشکاری، قطعه کار کاملا ثابت و بدون کوچک ترین تغییر مکان در جای خود ثابت باشند. در حالی که میدانیم در واقعیت چنین چیزی غیر ممکن است و قطعه کار در هر حالتی مقادیر جزئی حین جوشکاری حرکت خواهد کرد که علت آن به انبساط و انقباض حین تغییرات دمایی مرتبط است.

# ٤. نتيجه گيري

نتایج حاصل از شبیه سازی سه بعدی فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی با استفاده از مدل منبع حرارتی ترکیبی جهت بررسی توزیع حرارت و اعوجاج نهایی ایجاد شده در قطعه کار بر روی ورق از جنس 4V–Ti–6Al با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱ با استفاده از منبع حرارتی ترکیبی که تشکیل شده است
  از منبع حرارتی حجمی و یک منبع حرارتی سطحی،
  ناحیه میخی شکل جوش در جوشکاری پرتو الکترونی به
  صورت سه بعدی شبیهسازی شده است که از دقت خوبی
  برخوردار است.
- ۲- پارامترهای منبع حرارتی از طریق بهینهسازی با مشهای ریزتر بدست آمده است و برای مدل منبع حرارتی ترکیبی در مدل سه بعدی استفاده شده است. بنابراین بدون آزمون و خطا در شبیهسازی پروفیل ناحیه مذاب با دقت خوبی پیشربینی شده است.
- ۳- در این مدل ناحیه HAZ از هر دو منظر عمق و عرض به درستی و با دقت قابل قبول شبیه سازی شده است و تطابق بسیار مناسبی با بررسی های ریز ساختاری دارد که در فرآیندهای جوشکاری بسیار مورد توجه است.

### ٥. تعهدات

این پژوهش توسط شرکت ماهان صنعت نوید تهران مورد حمایت مالی و تجهیزاتی قرار گرفته است و تیم تحقیقاتی آن شرکت حق نشر و چاپ نتایج حاصل را طی نامه به شماره ۱۵۳ /الف/۹۷ به نویسندگان این مقاله داده است.

www.SID.ir



تابستان ۱۳۹۸ . دوره ۲۲ . شماره ۲ 🧴 شبیه سازی عددی و اعتبار سنجی آزمایشگاهی تحولات حرارتی و اعوجاج ایجاد شده در حین جوشکاری پرتو الکترونی ورق از جنس آلياژ Ti-۶AI-۴V

- [19] Liu C, Wu B, Zhang JX. Numerical investigation of residual stress in thick titanium alloy plate joined with electron beam welding. Metall Mater Trans B Process Metall Mater Process Sci. 2010;41 (5)1129-1138.
- [20] Cai Z, Zhao H. Efficient finite element approach for modelling of actual welded structures. Sci Technol Weld Join. 2003;8(3)195-204.
- [21] Michaleris P, Debiccari A. Prediction of welding distortion. Am Weld Soc - Weld J. 1997;76 (April) 172-181.
- [22] Eisazadeh H, Bunn J, Achuthan A, Goldak J, Aidun DK. A Residual Stress Study in Similar and Dissimilar Welds. Weld J Res Suppl. 2016; 95 (April):111-119.
- [23] Bermingham MJ, McDonald SD, Nogita K, St. John DH, Dargusch MS. Effects of boron on microstructure in cast titanium alloys. Scr Mater. 2008;59 (5) 538-541.
- [24] Rai R, Burgard P, Milewski JO, Lienert TJ, DebRoy T. Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 21Cr - 6Ni - 9Mn steel and Ti - 6Al - 4V alloy. J Phys D: Appl Phys. 2009; 42 (1) 1-12.
- [25] Chiumenti M, Cervera M, Dialami N, Wu B, Jinwei L, Agelet de Saracibar C. Numerical modeling of the electron beam welding and its experimental validation. Finite Elem Anal Des. 2016;121 (1) 118-133.