

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(8) (2022) 391-394 DOI: 10.22060/mej.2022.21197.7399

Finite Element Simulation of the Trailing Heat Sink's Effect on Welding-Induced Distortion of Al 3105

F. Jafari Vidoji, E. Ranjbarnodeh*, S. E. Mirsalehi

Department of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: There are several ways to reduce the distortion caused by welding, one of which is to use a new method called a trailing heat sink. In this research, the effect of trailing heat sinks on the reduction of distortion caused by aluminum welding has been investigated. In this study, first, 2 mm thick wrought aluminum alloy 3105 was welded by tungsten-inert gas arc welding method without a trailing cooling source. In the next step, a cooling source of argon gas was installed and used to quickly cool the welding line. Then the heat transfer and thermal stresses caused by welding were simulated using the 3D finite element method with and without considering the effect of the applied cooling source. In the next step, the effects of the diameter and flow rate of cooling gas on temperature distribution and distortion caused by welding were analyzed. It was found that the use of a trailing cooling source creates tensile stresses, and tensile plastic strains and compensates for the compressive strains of the heated area. The trailing cooling source reduced the amount of distortion caused by welding by about 30% and increased the hardness in the heat-affected zone by 10%.

Review History:

Received: Mar. 07, 2022 Revised: Jul. 15, 2022 Accepted: Aug. 21, 2022 Available Online: Sep. 07, 2022

Keywords:

Finite element method Trailing heat sink Distortion Aluminum 3105

1-Introduction

Aluminum is a light metal with a high strength-to-weight ratio. Exceptional ductility, good corrosion resistance in chemical environments, and good welding capability have made it suitable for use in aerospace and residential industries [1, 2]. The use of arc welding causes distortion and loss of hardness and local strength in aluminum parts. Therefore, it is important to predict and reduce the amount of distortion in the design stage. In recent years, a new method called welding with a trailing heat sink has been developed. In this method, a cooling source such as water, argon gas, or liquid nitrogen is used, and the welding site is cooled immediately after the connection, which reduces the distortion in the part [3-6]. This study explored the effects of using a trailing cooling source on welding distortion and its variables on welding distortion.

2- Methodology

Experiments were performed on 3105 aluminum alloy specimens. The reference specimens were prepared with a length of 250, a width of 40 mm, and a thickness of 2 mm. Before welding, they were cleaned with acetone and sandpaper. The process used was autogenous Tungsten Inert Gas (TIG) welding, and the specimens were welded in a

single pass without beveling and using a designed fixture. The study employed a tungsten electrode with a diameter of 2.4 mm. Behind the welding heat source, a trailing cooling source of argon gas with a temperature of 10°C was used at a certain distance behind the arc. The information and variables used in the experiment are given in Table 1. Voltage, current, welding speed, and nozzle-to-sample distance were 40 volts, 70 amps, 6 mm/s, and 5 mm in all tests, respectively. Welding specimens were cut from the middle and perpendicular to the welding line, and after mounting and sanding, macro metallography was done to obtain the size of the weld pool. After measuring the weld pool width of the metallographic specimens, hardness was measured with a force of 50g and a load duration of 20s. Fig. 1 shows how the trailing heat sink was applied. Three-dimensional finite modeling was performed in two thermal and mechanical stages. Solid70 and Surf152 elements were used for heat transfer solution and Solid45 and Contac52 elements for mechanical analysis. Three heat transfer coefficients were used in the research. It was 1100 W/m². K for the part below the fixture, 30 W/m². K for the upper surface, 15 W/m². K for the lower surface of the part, which had less open airflow. The ambient temperature of the part was also considered to be 27°C.

*Corresponding author's email: islam ranjbar@aut.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Experimental variables used in the welding operation.

Welding sample	1	2	3	4
Effective diameter of cooling source (mm)	-	29	20	29
Volumetric flow rate (l/m)	-	12	12	8



Fig. 1. The training heat sink applied



Fig. 2. Temperature distribution across the specimen (a) without and (b) with a trailing heat sink

3- Results and Discussion

In this study, the width of the weld pool was used as a criterion for simulation validation. The results as depicted in Fig. 2 show that the application of a sequential cooling source reduced the temperature by 20°C so that 974°C in conventional welding was reduced to 954°C in welding with a cooling source. Fig. 3 shows the distortion created by the welding temperature gradient in the *y* direction of the part. The greatest distortion was in this direction, and the application of a cooling source behind the arc remarkably reduced distortion from 17.5 mm to 11.8 mm, which can be



Fig. 3. Distortion of the specimen (a) without and (b) with a trailing heat sink

ascribed to the sudden and sharp drop in temperature. Due to the restraint applied in this regard, there was little distortion before the restraint was removed. But, as soon as the fixture was removed, plastic deformation began to form in this direction.

4- Conclusions

This study used the finite element method to estimate distortion due to welding of 3105 aluminum alloy with and without using a trailing heat sink. The results showed that the use of a cooling source of argon gas behind the moving arc reduced the maximum temperature and distortion.

References

- [1] A.H. Kokabi, M.M.Ghaznavi, Welding Technology (Processes), First ed., Sharif University, 2005(in Persian).
- [2] M. Moeinian, The Key to Welding, Second Edi, Azadeh 2012(in Persian).
- [3] L.C. J. Xu, and C. Ni, Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes, Int. J. Press. Vessel. Pip., 84(5) (2007) 298–303.
- [4] G.L. G.Luan, C.Li, C. Dong, DC-LSND friction stir

welding, China FSW Center Beijing FSW Technol. Co, 2005.

- [5] X. Huang, Residual stress reduction by combined treatment of pulsed magnetic field and pulsed current, Mater. Sci. Eng. A, 528(19) (2011) 6287–6292.
- [6] L.P.C. J. A. Martins, J. A. Fraymann, and S. T. Button, Analyses of residual stresses on stamped valves by X-ray diffraction and finite elements method, J. Mater. Process. Technol., 179 (2006) 30-35.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Jafari Vidoji, E. Ranjbarnodeh, S. E. Mirsalehi, Finite Element Simulation of the Trailing Heat Sink's Effect on Welding-Induced Distortion of Al 3105, Amirkabir J. Mech Eng., 54(8) (2022) 391-394.

DOI: 10.22060/mej.2022.21197.7399



This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۸، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۹۴۵ تا ۱۹۶۸ DOI: 10.22060/mej.2022.21197.7399

شبیهسازی اجزاء محدود تأثیر منبع سردکننده دنبالهرو بر اعوجاج ناشی از جوشکاری آلومینیوم ۳۱۰۵

فرشاد جعفري ويدوجي، اسلام رنجبر نوده ، سيد احسان ميرصالحي

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰ ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

کلمات کلیدی: روش اجزاء محدود منبع سردکننده دنبالهرو اعوجاج آلومینیم ۳۱۰۵ **خلاصه:** راههای مختلفی برای کاهش اعوجاج ناشی از جوشکاری وجود دارد که یکی از آنها استفاده از روش جدیدی به نام منبع سردکننده دنبالهرو است. در این پژوهش به بررسی تأثیر منبع سردکننده دنبالهرو بر کاهش اعوجاج ناشی از جوشکاری پرداخته شده است. در این بررسی، ابتدا آلیاژ آلومینیوم کار شده ۳۱۰۵ به ضخامت ۲ میلیمتر، با روش جوشکاری قوسی تنگستن – گاز محافظ بدون منبع سردکننده دنبالهرو، جوشکاری شد. در گام بعد، یک منبع سردکننده از گاز آرگون برای سردکردن سریع خط جوش تعبیه و مورداستفاده قرار گرفت. سپس انتقال حرارت و تنشهای حرارتی ناشی از جوشکاری با استفاده از روش المان محدود سهبعدی با و بناشی از جوشکاری، تحلیل شد. مشخص شد که استفاده از منبع سردکننده و جائیر قطر و دبی گاز سردکردن سریع خط او عوجاج پلاستیکی کششی ایجاد کرده و کرنشهای فشاری منطقه تحت گرمایش را جبران می میایند. منبع سردکننده بر توزیع دما و اعوجاج پلاستیکی کششی ایجاد کرده و کرنشهای فشاری منطقه تحت گرمایش را جبران می میایند. منبع سردکننده دنبالهرو مقدار اعوجاج

۱ – مقدمه

آلومینیم فلز سبکی است که نسبت استحکام به وزن بالایی دارد. قابلیت شکلپذیری استثنایی، مقاومت به خوردگی مطلوب در محیطهای شیمیایی و قابلیت جوشکاری عالی تا ضعیف (بسته به سری آلیاژ) باعث شده است تا کاربرد آن در صنایع هوافضا و مسکونی روند روبهرشد و روزافزونی به خود بگیرد. استحکام نهایی این فلز در حالت خالص حدوداً ۹۰ مگاپاسکال است که با آلیاژسازی، کرنش سختی یا عملیات حرارتی تا حدود هشت برابر یعنی حدوداً ۹۰۰ مگاپاسکال قابل ارتقا است [۱]. تنها سه خانواده ۲XXX (۲]. چالشهای عمده در جوشکاری قوسی این سه سری عبارتند از: نیاز به قوسی با تمرکز حرارتی بالا، اعوجاج زیاد و نیز افت سختی و استحکام بهصورت موضعی در نواحی در معرض حرارت قوس [۳]. از اینرو، لازم است تا در مرحله طراحی، مقدار اعوجاج و همچنین تنشهای پسماند را پیشبینی کرده و آنها را تا حد امکان کاهش داد. محققین در سالهای اخیر مطالعات

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: islam_ranjbar@aut.ac.ir

استفاده از قیدوبند در مرحله ساخت است [۴]. روش های از قبیل عملیات حرارتی، عملیات مغناطیس پالسی، عملیات ساچمهزنی و... برای کاهش تنش و یا تبدیل تنش به تنش فشاری رایج است. بهعنوان مثال، ژانگ^۲ و همکاران اثر ارتعاش حین جوشکاری را بر تنش پسماند و اعوجاج در جوش سربه سر چند پاسه بررسی کردند [۵]. در سالهای اخیر روشی جدید با نام مربع سردکننده مثل آب، گاز آرگون، نیتروژن مایع و غیره استفاده می شود و محل جوش بلافاصله پس از اتصال، خنک می شود که این امر باعث کاهش تنش پسماند در قطعه می شود [۸–۵]. این تکنیک جهت کاهش تنش و جدید بر اساس تأثیر فروکش حرارتی موضعی بوده و می تواند میدان حرارتی شبه ایستا قابل کنترل و تنش الاستیک– پلاستیک در منطقه جوش ایجاد کند که سبب کاهش تنش باقیمانده و حذف اعوجاج در منطقه جوش ایجاد کند که سبب کاهش تنش باقیمانده و حذف اعوجاج در منطقه جوش شود [۶]. لی^۳ و همکاران اختراع شد. این تکنیو خون در ارتی

¹ Xuang

² Luan

³ Li

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۳۱۰۵۸A

Table 1. Chemical composition of 3105 AA alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other
< • /۶	< • /٧	< • /٣	•/•_Y/A	•/•-Y/A	< • /٢	<٠/۴	< • / ۱	<٠/١۵

جوشکاری، از روش منبع سردکننده دنبالهرو استفاده نموده و نشان دادند که توزيع دمايي در اين حالت، با حالت جوشكاري عادي بسيار متفاوت است. در پژوهشی دیگر، جیانگ و همکاران [۱۰] همین تکنیک را جهت کاهش تنش پسماند ۱۳۱۶ مورد استفاده قرار دادند. تیان و شی [۱۱] تأثیر منبع سردکننده دنباله رو را بر ترک گرم در جوشکاری مورد بررسی قرار دادند. گو⁷ و همکاران [۱۲] یک مدل سهبعدی المان محدود ساختند تا اثر منبع سردكننده دنبالهرو را بر خواص مكانيكي جوش ليزر پالسي و اعوجاج ناشي از آن بررسی کنند. کالا [†]و همکاران [۱۳] نیز اثر روش یاد شده بر تغییرات فازی ایجاد شده در فولاد کم کربن را مطالعه کردند. باجیب⁶ و همکاران [۱۴] سعى كردند تا با استفاده از شبيهسازي المان محدود چندين مدل منبع سرد دنبالهرو را مدلسازی کرده و تنش پسماند ایجاد شده در جوش سربهسر آلیاژ آلومینیوم را به حداقل برسانند. از آنجاکه در پژوهش های صورت گرفته پژوهش جامعی در مورد تأثیر متغیرهای منبع سردکننده در جوشکاری آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ صورت نگرفته است، بنابراین در این پژوهش تأثیر استفاده از منبع سردکننده دنبالهرو بر اعوجاج حاصل از جوشکاری و بهدنبال آن تأثیر متغیرهای شعاع مؤثر منبع سردکننده، دبی سیال سردکننده بر اعوجاج ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت و سپس تأثیر منبع سردکننده دنبالهرو بر افت سختی حاصل از جوشکاری مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- آزمایشهای تجربی

آزمایش تجربی روی نمونههای یکسانی از آلیاژ ۳۱۰۵ آلومینیم صورت گرفت. آلومینیم ۸۹۰۵ AA دارای تقریباً ۹۸٪ آلومینیوم است و آلیاژی غیر قابل سختکاری بهوسیله عملیات حرارتی به حساب می آید که دارای قابلیت شکل پذیری، مقاومت به خوردگی و جوش پذیری عالی است [۱۵ و ۱۶].

ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ آمده است. نمونههایی به ابعاد به طول ۲۵۰، عرض ۴۰ و ضخامت ۲ میلی متر آماده و قبل از جوشکاری نمونهها تمیزکاری و سمباده زنی شدند تا آلودگیهای سطحی رفع شوند. فرآیند مورد استفاده روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز محافظ بدون فلز پرکننده بود و نمونهها بدون پخزنی و با استفاده از قیدوبند طراحی شده، بهصورت تک پاسه با جریان متناوب و به صورت یک جهته و بدون اعمال توالی خاص برای جوشکاری، ایجاد شدند. شمایی از آزمایش عملی در شکل ۱ نشان داده شده است. الکترود تنگستن با قطر ۲/۴ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. یک منبع سردکننده دنبالهرو از گاز آرگون با دمای ۱۰ درجه سانتی گراد در فاصله معینی در پشت قوس جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که این منبع سردکننده توسط یک شلنگ گاز متصل به کپسول گاز آرگون اعمال شد. اطلاعات و متغیرهای مورد استفاده آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. روش کلی کار به این صورت است که ابتدا نمونهای بدون استفاده از منبع سردکننده جوشکاری شد و اطلاعات بدست آمده، به عنوان مرجع مقایسه مورد استفاده قرار گرفتند. سپس نمونههای بعدی با اعمال منبع سردکننده و تغییر متغیرهای مربوطه جوشکاری و میزان اعوجاج ایجاد شده اندازهگیری و با نمونه مرجع، مقایسه شدند. لازم به ذکر است که برای همه آزمایش ها ولتاژ، جریان، سرعت جوشکاری و فاصله نازل تا نمونه بهترتیب ۴۰ ولت، ۷۰ آمپر، ۶ میلیمتر بر ثانیه و ۵ میلیمتر است. برای اندازهگیری اعوجاج، ابتدا یک سمت قطعه روی یک سطح صاف، ثابت و حداکثر اعوجاج در لبه آزاد مورد سنجش قرار گرفت.

نمونههای جوشکاری از وسط و عمود بر خط جوش برش داده شده و پس از مانت کردن، توسط سمباده شماره ۸۰ تا ۲۵۰۰، متالوگرافی ماکرو شد تا اندازه حوضچه به دست آید. اچ ماکرو توسط محلول سوب و به مدت ۲۰ الی ۲۵ ثانیه انجام شد [۱۷]. ترکیب محلول اچ در جدول ۳ ارائه شده است. پس از اندازه گیری پهنای حوضچه نمونههای متالوگرافی شده، سه نمونه

Jiang

² Tian

³ Guo

⁴ Kala

⁵ Bajpei

⁶ GTAW-AC



شکل ۱. شمایی از آزمون های عملی

Fig. 1. Schematic of experimental tests

جدول ۲. متغیرهای تجربی مورداستفاده شده در جوشکاری نمونهها

Table 2. Experimenta	l variables used	in welding	of samples
----------------------	------------------	------------	------------

۴	٣	٢	١	شماره آزمایش
۲۹	۲۰	۲۹		شعاع مؤثر منبع سردكننده (میلیمتر)
۳۵	۳۵	۳۵		فاصله قوس و منبع سردکننده (میلیمتر)
۴	۴	۴		قطر نازل سردکننده (میلیمتر)
٨	١٢	١٢		دبی دمش منبع سردکننده (لیتر بر دقیقه)

جدول ٣. ترکيب محلول اچ [١٧]

Table 3. The etchant composition [17]

HCl	HNO _r	HF	O,H	تركيب
١٠٠	۱۰۰	۲۵	1	مقدار(میلی لیتر)



شکل ۲. هندسه و مشبندی مورداستفاده در شبیهسازی



جهت سختی سنجی ویکرز آماده شدند و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. سختی سنجی با نیروی اعمالی ۵۰ گرم و مدتزمان اعمال بار برابر ۲۰ ثانیه انجام شد.

۳- شبیهسازی المان محدود

شبیه سازی اجرای محدود سه بعدی در دو مرحله حرارتی و مکانیکی انجام گرفت. تحلیل حرارتی سه بعدی از المان ۲۰ Solid و برای اعمال حرارت بر روی این المان از المان سطحی Surf ۵۲ و برای تحلیل مکانیکی نیز از المان ۴۵ Solid و ۵۲ Contac استفاده شد. چون در نزدیکی خط جوش، شیب حرارتی بالایی وجود دارد، مطابق شکل ۲ از مش بندی ریزتری در آن ناحیه استفاده شد. در مدل نهایی از ۱۶۰۶۵ گره و ۱۳۳۸ المان مورداستفاده قرار گرفت. شرایط مرزی حاکم حین جوشکاری معمولاً به صورت تابش و همرفت در نظر گرفته می شود. دمای کاتد بالاتر از اتمسفر احاطه کننده آن است، در نتیجه انتقال انرژی تابش می شود و در ضمن، عبور اتمسفر منجر به ازدست دادن انرژی از طریق تابش می شود و در ضمن، عبور جریان گاز سرد از کاتد گرم نیز باعث انتقال حرارت همرفتی می شود [۱۸].

چون در جوشکاری آلومینیم دما خیلی بالا نیست و در آلیاژهای آلومینیم، سطوح از اکسید پوشیده شده است، میتوان از تابش صرف نظر کرد و تنها همرفت را در نظر گرفت [۱۹]. در این پژوهش، سه مقدار برای ضریب انتقال حرارت در نظر گرفته شده است. برای ۵ میلی متری که قطعه در زیر قیدوبند قرار دارد، مقدار ۱۱۰۰ وات بر مترمربع بر کلوین و برای سطح بالایی که با هوای آزاد بیشتر در تماس است، مقدار ۳۰ وات بر مترمربع بر کلوین و برای سطح پایینی قطعه که جریان هوای آزاد کمتر است، مقدار ۵ وات بر مترمربع بر کلوین و دمای محیط قطعه نیز ۲۷ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد [۲۰]. نحوه توزیع قوس روی سطح قطعه کار، در واقع شیب دمایی موضعی و آهنگ خنک شدن نقاط مختلف جوش و منطقه متأثر از حرارت را تغییر می دهد. سه متغیر لازم برای مشخص کردن منبع گرما در مدل، عبارتند از: حرارت ورودی قوس، نحوه توزیع حرارت و سرعت حرکت منبع حرارتی. مطابق معادله (۱) میزان حرارت ورودی به قطعه کار در واحد زمان برابر با

$$Q = \eta V I \tag{1}$$

$$F(\text{Re}) = 2 \left[\text{Re}(1 + \frac{\text{Re}}{200})^{0.55} \right]^{0.5}$$
(8)

که در این روابط G تابعی از هندسه ابعادی نازل، D قطر نازل سردکننده بر حسب متر، r_s شعاع مؤثر دایرهای که روی سطح به واسطه انتقال حرارت منبع سردکننده ایجاد می شود که واحد آن متر است. لازم به ذکر است که جهت ساده سازی فرض شد که شعاع مؤثر منطقه تحت سرمایش برابر با قطر بازل است. H فاصله سر نازل تا سطح بر حسب متر و P_r عدد پرانتل و Re عدد رینولدز هستند. در قدم بعدی، اعداد رینولدز و پرانتل از معادلات (۷) و ما عدد رینولدز هستند. در قدم بعدی، اعداد رینولدز و پرانتل از معادلات (۷) و ما محاسبه شدند که در این روابط D قطر نازل سردکننده با واحد متر، ۷ محاسبه شدند که در این روابط D قطر نازل سردکننده با واحد متر، ۷ و مع موتر منطقه تحت سرمایش برانت و ۲) و در زمان است. H فاصله سر نازل تا سطح بر حسب متر و برانتل از معادلات (۷) و مع عدد رینولدز هستند. در قدم بعدی، اعداد رینولدز و پرانتل از معادلات (۷) و مع عدد رینولدز هستند. در قدم بعدی اعداد رینولدز و پرانتل از معادلات (۷) و مع عدد رینولدز هستند. در قدم بعدی اعداد رینولدز و پرانتل از معادلات (۷) و مع عدد رینولدز هستند. در قدم بعدی اعداد مینولدز و پرانتل از معادلات (۷) و مد من محب، با واحد متر با و حسب متر و رمن کر ایند که در این روابط مقطر نازل سردکننده با واحد متر، ۷ از می سرعت دمش سیال با واحد متر بر ثانیه، م داند که در این روابط م تور نازل سردکننده با واحد کیلوگرم بر متر متر متر با نایه ای سرعت دمش سیال با واحد متر بر ثانیه، ای واحد مترمربع بر ثانیه، ۷ از می می می می می را می توان از تقسیم دبی گاز بر مقدار سطح مقطع خروجی نازل سردکننده بدست آورد [۲۱ و ۲۲].

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{v} \tag{Y}$$

$$\Pr = \frac{\mu}{\rho \alpha} = \frac{\nu}{\alpha} \tag{A}$$

بدین ترتیب با استفاده از روابط ارائهشده، مقدار ضریب انتقال همرفت ناشی از منبع سردکننده دنبالهرو به دست می آید. شکل ۳ چگونگی اعمال منبع سردکننده در شبیهسازی انجام شده را نشان می دهد. از آنجایی که خواص مواد برای آلیاژ ۳۱۰۵ در دسترس نبود، از خواص آلیاژ ۳۰۰۴ که دارای بیشترین شباهت در ترکیب عناصر با آلیاژ ۳۱۰۵ است، استفاده شد. جداول ۴ و ۵ نشان دهنده خواص مواد وابسته به دمای این آلیاژ هستند [۲۳]. در مورد شرایط مرزی مکانیکی شایان ذکر است که هنگام انجام جوشکاری، مناطق تحت قید کاملاً مقید بودند و پس از رفع قید، جهت جلوگیری از حرکت جسم صلب تنها نقطه مرجع مختصات در سه جهت مقید شد. در این پژوهش، مقدار r/8 برای η در نظر گرفته شده است [۲۰]. از معادله (۲) نیز میتوان برای توزیع انرژی حرارتی قوس الکتریکی بهصورت شار حرارتی سطحی استفاده کرد. این انرژی دارای تقارن شعاعی است و در ضمن شار حرارتی سطحی r_s مطابق معادله (۲) با توزیع گاوسی تقریب زده شد. دراین(بطه Q انرژی حرارتی در واحد زمان و ۲ فاصله از مرکز منبع شد. دراین(بطه Q انرژی حرارتی در واحد زمان و ۲ فاصله از مرکز منبع حرارتی است. '۲ نیز پارامتر توزیع گاوسی است که شعاعی از قطعه است که حول ۹۵٪ قوس به آن وارد میشود یعنی در این فاصله از مرکز قوس، شدت حرارت ورودی نسبت به مرکز قوس به ۵ درصد کاهشیافته است. در این پژوهش، مقدار پارامتر توزیع گاوسی، برابر ۲/۱ میلی متر و سرعت حرکت قوس برابر ۶ میلی متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در این پژوهش، یک منبع باعث سرد شدن سریع قطعه میشود. این منبع، یک جت سردکننده از گاز باعث سرد شدن سریع قطعه میشود. این منبع، یک جت سردکننده از گاز آرگون است که در آن، گاز آرگون با دبی خروجی ۱۰ لیتر بر دقیقه و ۱۲ لیتر بر دقیقه از سر نازل خارج میشود. ضریب انتقال حرارت همرفتی ناشی از بر دقیقه از سر نازل خارج میشود. ضریب انتقال حرارت همرفتی ناشی از بر دقیقه از سر نازل خارج میشود. ضریب انتقال حرارت همرفتی ناشی از

$$q_{s} = \frac{Q}{2\pi (r')^{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\frac{r}{r'})^{2}\right]$$
(7)

$$h = k \frac{\overline{Nu}}{D} \tag{(7)}$$

که دراین رابطه Nu عدد ناسلت، k هدایت حرارتی سیال مورد استفاده با واحد وات بر متر بر کلوین و D قطر نازل سردکننده با واحد متر است. عدد \overline{Nu} نیز تابع متغیرهایی است که در معادلات (۴) تا (۸) ارائه شده است.

$$\frac{\overline{Nu}}{\Pr^{0.42}} = G(\frac{rs}{D}, \frac{H}{D})F(\text{Re})$$
(*)

$$G(\frac{r_{s}}{D}, \frac{H}{D}) = \frac{D}{r_{s}} \times \frac{1 - 1 \cdot 1(\frac{D}{r_{s}})}{1 + 0 \cdot 1\left[\frac{H}{D} - 6\right](\frac{D}{r_{s}})}$$
(Δ)



شکل ۳. اعمال منبع سردکننده

Fig. 3. Application of the heat sink

جدول ۴. خواص حرارتی فلز پایه [۲۱ و ۲۳]

 Table 4. Thermal properties of the base metal [21, 23]

۲٠	1	۲۰۰	۳۰۰	4	۵۰۰	۶	دما(°C)
۱۷۱	١٧٧	۱۸۳	۱۸۹	۱۹۵	۲۰۱	۲۰۷	هدایت حرارتی(W/m°C)
۲۵	۱۸۰	۲۸۰	۳۸۰	۴۸۰	۵۸۰		دما(°C)
٨٩٧	٩٧٠	۱۰۵۰	11	114.	17		گرمای ویژه(J/kg °C))
			2210				چگالی(kg/m ^۳)

جدول ۵. خواص مکانیکی فلز پایه [۱۵]

Table 5. Mechanical properties of the base metal [15]

۲۵	۲	99 +	دما(°C)
٧٠	۵۲	۵	مدول يانگ(GPa)
۵۵	۴١	۵	تنش تسليم(MPa)
21/8	۲۳/۶	24/0	$(\mu m/m^{\circ}C)$ ضریب انبساط حرارتی
	•/٣٣		ضريب پواسون

جدول ۶. مقایسه پهنای حوضچه جوش) شبیهسازی و تجربی)

حوضچە(ميلىمتر)	پهنای بالایی	حوضچە(ميلىمتر)	پهنای پایینی	نمونه آزمايش
شبيەسازى	تجربى	شبيەسازى	تجربى	
۱۱٫۶	۴,۱۰	11,4	۱۰٫۱	١
))	۳٫۰	۱ <i>۰</i> ٬۶۵	٩٫٩	٢
۱۱٫۳۶	۲۰٬۴	11/5	۲,۰۱	٣

Table 6. Comparison of weld pool width (simulation and experimental).

جدول ۷. خطاهای مربوط به تخمین پهنای حوضچه جوش حاصل از شبیهسازی در مقایسه با مقادیر تجربی آن

 Table 7. Errors for estimating the weld pool width obtained from the simulation compared to experimental values

درصد خطای پهنای بالایی حوضچه(میلیمتر)	درصد خطای پهنای پایینی حوضچه(میلیمتر)	نمونه أزمايش
۱۱,Δ	۱۲٫۸	١
€ _/ Y	۲ _/ ۵	٢
٩,٢	٩٫٨	٣

۴- نتایج و بحث

در این آزمایش، ازآنجهت که معیاری برای مطابقت نتایج تجربی و شبیه سازی لازم است، اندازه حوضچه جوش، معیاری برای نزدیک بودن آزمایش تجربی و روند شبیه سازی قرار داده شد. لازم به ذکر است که در تمام آزمایش های انجام شده، نفوذ کامل جوش مشاهده شد. در جدول ۶ نتایج شبیه سازی و آزمایش تجربی مقایسه شده است.

در شکلهای ۴ تا ۶ مقایسه نتایج حاصل از ابعاد حوضچه حاصل از شبیهسازی و نتایج تجربی در نمونههای جوشکاری شده با روش عادی و با منبع خنک کننده دنبالهرو ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل نشان میدهد که مدل بکار رفته، نتایج خوبی در پیش بینی حوضچه جوش از خود نشان میدهد. جدول ۷ میزان خطای ابعاد حوضچه را نشان میدهد.

همان طور که مشاهده می شود حداکثر اختلاف نتایج تئوری و تجربی حدود ۱۳٪ است که حاکی از صحت مدل مورداستفاده در پیش بینی رفتار حرارتی سیستم است. برای مقایسه روش عادی جوشکاری و جوشکاری با اعمال منبع سردکننده، سه متغیر دما، اعوجاج و سختی منطقه جوش و

منطقه متأثر از حرارت مورد بررسی قرار گرفتند. در اعمال منبع سردکننده با دبی خروجی ۱۲ لیتر بر دقیقه، مقدار ضریب انتقال حرارت برابر ۸ لیتر بر در نظر گرفته شد. همچنین در مورد حالتی که دبی خروجی برابر ۸ لیتر بر دقیقه است نیز برابر ۲۰۰۰ در نظر گرفته شد [۱۰]. در شکل ۷ تأثیر منبع سردکننده بر توزیع دما قابل مشاهده است. در جایی که قوس در فاصله ۱۲۵ میلیمتری از مبدأ مختصات است، با اعمال منبع سردکننده دنبالهرو، کاهش ۲۰ درجه سانتی گرادی دما ایجاد می شود به طوری که ۹۷۴ درجه سانتی گراد در جوشکاری معمولی(بدون منبع سردکننده) به ۹۵۴ درجه سانتی گراد در جوشکاری معمولی(بدون منبع سردکننده) به ۹۵۴ درجه مرحله باعث افت ماکزیمم دما، تا مقدار ۱۹۹۹ درجه سانتی گراد شده و توزیع دما مرحله آخر نشان داده شده است. اعمال گاز سردکننده در این مرحله باعث افت ماکزیمم دما، تا مقدار ۱۹۹۹ درجه سانتی گراد شده و کاهش ۲۶ درجهای دما مشاهده می شود. علت وجود دمای بالا این است که در انتهای قطعه، سطح سرد جلوی قوس کم شده و سطوح قبل قوس، گرم است. نمودار شکل ۹ نیز نشان دهنده تغییرات دما با تغییر X در راستای Z های متفاوت است.



شکل ۴. مقایسه ابعاد تجربی و شبیهسازی شده حوضچه جوش برای نمونه جو شکاری شده با روش عادی





شکل ۵. مقایسه ابعاد تجربی و شبیهسازی حوضچه جوش برای نمونه جوشکاری شده با منبع سردکننده دنبالهرو با قطر مؤثر ۵۸ میلی متر

Fig. 5. Comparison of experimental and simulated dimensions of the weld pool for a welded specimen with a trailing heat sink with effective diameter 58 mm



شکل ۶. مقایسه ابعاد تجربی و شبیهسازی حوضچه جوش برای نمونه جوشکاری شده با منبع سردکننده دنبالهرو با قطر مؤثر ۴۰ میلی متر Fig. 6. Comparison of experimental and simulated dimensions of a weld pool for a welded specimen with a trailing heat sink with effective diameter 40 mm



شکل ۷. توزیع دما در مرحله ۲۵ جوشکاری: الف) روش جوشکاری عادی ب) جوشکاری با منبع سردکننده متحرک با ضریب انتقال حرارت همرفتی ۳۰۰۰ W/m². K

Fig. 7. Temperature distribution in stage 25 welding: a) Conventional welding method b) Welding with trailing heat sink with convection heat transfer coefficient 3000 W/m². K



(ب)

W/ شکل ۸. توزیع دما در مرحله ۵۰ جوشکاری: الف) روش جوشکاری عادی ب) جوشکاری با منبع سردکننده متحرک با ضریب انتقال حرارت همرفتی /W ۳۰۰۰ m². K

Fig. 8. Temperature distribution in stage 50 welding: a) Conventional welding method b) Welding with trailing heat sink with heat transfer coefficient 3000 W/m². K



Fig. 9. Temperature-distance curve (from the center of the weld) for points located in "y = 0 mm" and "z = 0 mm" in stage 7 welding

شکل ۹. منحنی دما – فاصله (از مرکز جوش) برای نقاط واقع در ۲۰ = y میلیمتر و ۲۰ z میلیمتر در مرحله ۷ جوشکاری

در تمام نمودار دو نکته قابل توجه است، اول اینکه با اعمال منبع سردکننده حرارتی، کاهش دما قابل مشاهده است. این کاهش به موقیعت قوس و منبع سردکننده بستگی دارد؛ بهطوری که هرچه قوس به انتهای قطعه نزدیک میشود، مقدار کاهش بیشتر میشود. دوم آنکه با افزایش فاصله از مرکز خط جوش، میزان کاهش کمتر شده و تأثیر منبع سرد کم میشود. لازم به ذکر است که در تمام نمودارها، فاصله قوس تا منبع سردکننده برابر ۳۵ میلی متر است.

اما موقعیت مکانی قوس برای شکل ۱۰ برابر فاصله ۱۲۵ میلیمتری از مبدأ برای قوس و برای گاز سردکننده ۹۰ میلیمتری از مبدأ است. کاهش دما در این نقاط از ۲۱ تا ۸ درجه سانتی گراد متغیر است. علت اینکه کاهش دما نیز در این مختصات وجود دارد این است که منبع سردکننده ۳۵ میلیمتر عقب تر از قوس است و نقطه موردنظر در نمودار در فاصله ۵ میلیمتری قوس و ۳۰ میلیمتری منبع سرد دنبالهرو قرار دارد.

از نمودار دما – مکان آورده شده می توان دریافت که استفاده از منبع سردکننده دنبالهرو، باعث کاهش دما در قطعه شده و این مقدار کاهش بستگی به مکان مورد بررسی دارد. هر چه قوس و به دنبال آن منبع سرد دنبالهرو، به سمت جلو قطعه حرکت کند، اولاً دمای قطعه

بالاتر رفته که دلیل آن گرمشدن سطوح قبل از منبع است و ثانیا با جلو رفتن الکترود و پیشروی آن، تأثیر منبع سردکننده بیشتر میشود. در واقع هر چه دما بالاتر رود، تأثیر کاهش دمای منبع سردکننده دنبالهرو در کاهش دما چشمگیرتر است. شکل ۱۱ چرخه دمایی در راستای 0=zمیلیمتر در عرضهای ۰، ۳، ۵، ۵/۱۴ و ۳۵ میلیمتری را در نمونه مورد تحلیل در جوشکاری عادی و با منبع خنککننده نشان میدهد. در این نمودار تأثیر منبع سردکننده اعمالی بر توزیع دمای ناشی از جوشکاری نشانداده شده است. نکته بسیار مهمی که علاوه بر کاهش دما، در این منبع سردکننده، روی شیب دمایی تأثیر گذاشته و آن را تندتر میکند. در ضمن، با دور شدن از حداکثر دما، این شیب ملایمتر میشود، چراکه تأثیر منبع سردکننده کاهش مییابد.

شکل ۱۲ بیانگر اعوجاج ایجاد شده در اثر گرادیان دمایی در اثر جوشکاری در راستای جهت y قطعه است. بیشترین اعوجاج حاصل در این راستا است که با اعمال یک منبع سرد در پشت سر قوس، مقدار اعوجاج از ۱۷٫۵ میلیمتر به ۱۱/۸میلیمتر رسیده است. محققان دیگر در جوشکاری لیزر، کاهش حدود ۳۲ درصد در اعوجاج بهوسیله این روش را گزارش



شکل ۱۰. منحنی دما – فاصله (از مرکز جوش) برای نقاط واقع در ۲۰ = z = ۲۱۵ یلیمتر و ۲۵ = z میلیمتر در مرحله ۲۵ جوشکاری Fig. 10. Temperature-distance curve (from the center of the weld) for points located in "y = 0 mm" and "z = 0 mm" in stage 25 welding

نمودهاند [۲۴]. اساس این تأثیر زیاد، همان کاهش ناگهانی دمایی است که در منطقه سرمایش ناشی از منبع خنک کننده ایجاد می شود. این اثر خنک کنندگی موضعی، سبب انقباض بخش مذکور شده و یک تنش کششی بسیار قوی در ناحیه بین حوضچه ذوب و فروکش حرارتی ایجاد می کند. این تنشهای کششی، کرنشهای پلاستیکی کششی ایجاد کرده و کرنشهای فشاری منطقه تحت گرمایش را جبران می نمایند.

در شکل ۱۳ نتایج حاصل از جوشکاری عملی مشاهده می شود. همان طور که در این شکل نیز مشخص است، اعمال یک منبع سرد در پشت سر قوس باعث شده تا اعوجاج حاصل از جوشکاری کاهش یابد و روی نتایج حاصل از شبیه سازی صحه گذارد. تفاوت اعوجاج حاصل از جوشکاری دو حالت قابل رؤیت است. مقدار اعوجاج های عملی اندازه گیری شده در روش جوشکاری عادی برابر ۲۵٫۸ میلی متر به دست آمد، در حالی که در روش با منبع سردکننده دنباله رو با دبی دمش ۱۲ لیتر بر دقیقه و ۸ لیتر بر دقیقه به ترتیب برابر ۱۲٫۱ و ۱۲٫۸ میلی متر، اعوجاج حاصل شد.

در قدم بعد تأثیر قطر مؤثر منبع سردکننده روی سطح قطعه بر میزان اعوجاج بررسی شد. در این بخش قطر مؤثر از ۵۸ میلیمتر به ۴۰۰ میلیمتر تغییر پیدا کرده است. اشکال ۱۴ و ۱۵ نتایج حاصل از تغییر میزان این متغیر را نشان میدهند. همان طور که در این شکلها مشاهده میشود، کاهش قطر مؤثر منبع سردکننده، باعث افزایش دماها نسبت به حالتی که قطر مؤثر ۸۸ میلیمتر در نظر گرفته شده است، میشود. دما نسبت به حالتی که گاز سردکننده اعمال نمیشود، بین ۵ تا ۱۰ درجه کاهشیافته است. دو تصویر گویای آن است که افزایش قطر مؤثر منبع سردکننده، در کاهش دما مؤثر تر است و هنگامی که قطر مؤثر ۸۸ میلیمتر است، ماکزیمم کاهش دما حدود ۱۴ درجه سانتی گراد بیشتر از حالتی است که قطر مؤثر برابر ۴۰ میلیمتر است.

همان طور که در شکل ۱۶ نیز مشخص است کاهش قطر مؤثر منبع سردکننده روی قطعه، برای انتقال حرارت، از ۵۸ به ۴۰ میلیمتر باعث افزایش اعوجاج در راستای Y به میزان ۲٫۲ میلیمتر شده است.



شکل ۱۱. منحنی دما – زمان نقاط مربوط به ۲ = ۷ میلیمتر و ۲ = z میلیمتر در مقادیر x های متفاوت الف) جوشکاری عادی ب) با منبع سرکا ۱۱. منحنی دما – زمان نقاط مربوط به ۲ میلیمتر و ۲ = ۲ میلیمتر ک

Fig. 11. Temperature-time curve of points related to "y = 0 mm" and "z = 0 mm" at different values of x a) Conventional welding b) With trailing heat sink



(ب)

شکل ۱۲. اعوجاج بهدست آمده در راستای y حاصل از جوشکاری الف)روش عادی جوشکاری ب) جوشکاری با منبع سردکننده متحرک با ضریب انتقال حرارت همرفتی ۳۰۰۰ W/m². K

Fig. 12. Distortion obtained in y direction from welding a) Conventional welding method b) Welding with trailing heat sink with heat transfer coefficient 3000 W/m². K



شکل ۱۳. مقایسه اعوجاج حاصل از جوشکاری در دو حالت عادی و با منبع سردکننده



حرارت جوشکاری قطعه در منطقه متأثر از حرارت دچار افت سختی می شود. مطابق شکل ۲۰ سه قسمت فلز پایه، متأثر از حرارت و فلز جوش در نمودار سختی بر حسب فاصله قابل مشاهده هستند. استفاده از یک منبع سردکننده دنبالهرو باعث شده تا سختی در منطقه متأثر از حرارت اندکی نسبت به روش معمولی افزایش یابد. این مسئله به دلیل افت دمای ناشی از اعمال این منبع است که می تواند وقوع پدیده هایی مانند تبلور مجدد و رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت و به تبع آنها افت سختی را کاهش می دهد. همچنین افزایش دبی منبع سردکننده از ۸ لیتر بر دقیقه به ۱۲ لیتر بر دقیقه، باعث افزایش سختی در فلز جوش شده است. در واقع اعمال منبع سردکننده باعث افزایش سختی در فلز جوش شده است. در واقع اعمال منبع سردکننده باعث افزایش یدیده افزایش سرعت سرمایش ناشی از حرارت جوش شده است. علت این پدیده افزایش سرعت سرمایش ناشی از دمش گاز محافظ با سرعت بیشتر و شکل ۱۷ نتایج حاصل از شبیهسازی با تغییر دبی دمش گاز سردکننده را برای حالتی که قطر مؤثر برای هر دو حالت، ۵۸ میلیمتر است را نشان میدهد. کاهش دبی خروجی از ۱۲ لیتر بر دقیقه به ۸ لیتر بر دقیقه باعث میشود تا سرعت گاز سردکننده کمتر شده و این کاهش سرعت روی ضریب انتقال حرارت (h) تأثیر گذاشته و آن را کاهش دهد و این باعث افزایش ۶ درجهای ماکزیمم دما و رسیدن آن تا مقدار ۹۶۰ درجه سانتیگراد و در پی آن افزایش اعوجاج به مقدار ۲ تا ۳ میلیمتر شده است. شکل ۱۸ نمودار دما– مکان را برای طول ۲۱۵ میلیمتر در زمانی که قوس در انتهای قطعه قرار دارد، نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود، اختلاف دمای ۹ تا ۲۴ درجهای در راستای عرض قطعه رخ داده است. مطابق شکل ۱۹ اعوجاج راستای ۷ نیز به دنبال افزایش دمای جوشکاری ۲٫۳ میلیمتر افزایش یافته است.

شکل ۲۰ نتایج حاصل از سختی سنجی قطعات جوشکاری شده را نشان میدهد. در فرایند جوشکاری آلیاژهای کارشده به دلیل تبلور مجدد ناشی از





Fig. 14. Temperature distribution in welding with trailing heat sink a) effective diameter 58 mm b) effective diameter 40 mm



شکل ۱۵. دما – فاصله (از مرکز جوش) برای نقاط واقع در ۲ = y میلیمتر و ۲۱۵ = z میلیمتر با منبع سردکننده متحرک

Fig. 15. Temperature – distance (from the center of the weld) for points located in "y = 0 mm" and "z = 215 mm" with a trailing heat sink

۵- نتیجه گیری

۱– در این پژوهش از روش المان محدود برای تخمین اعوجاج ناشی از جوشکاری آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ در دو حالت عادی و با استفاده از یک منبع سردکننده دنبالهرو بر اعوجاج ناشی از جوشکاری آلومینیوم ۳۱۰۵ استفاده شد. مقایسه نتایج بهدستآمده از مدل عددی با نتایج تجربی، اعتبار مدل مورد استفاده را ثابت نمود. بر مبنای این مطالعه میتوان به نتایج زیر، دستیافت: ۳– استفاده از یک منبع سردکننده از جنس گاز آرگون در پشت سر قوس به دلیل ایجاد انقباض بخش، یک تنش کششی بسیار قوی در ناحیه قوس به دلیل ایجاد انقباض بخش، یک تنش کششی بسیار قوی در ناحیه بین حوضچه ذوب و فروکش حرارتی، کرنشهای فشاری منطقه تحت گرمایش را جبران و به طبع آن باعث کاهش اعوجاج از ۸٫۹۵میلیمتر به ۳۰٫۸ میلیمتر میشود که کاهش حدود ۳۳ درصدی اعوجاج از ۸٫۹۸میلیمتر باعث ۱۸٫۸ میلیمتر میشود که کاهش حدود ۳۳ درصدی اعوجاج را به دنبال دارد.

سانتی گراد می شود و به طبع آن باعث افزایش اعوجاج حاصل از جوشکاری از ۱۱۸ میلی متر به ۱۴ میلی متر می شود. این تغییر باعث افزایش ۱۹ درصدی اعوجاج می شود.

۴– افزایش دبی خروجی منبع سردکننده دنبالهرو از ۸ لیتر بر دقیقه به ۱۲ لیتر بر دقیقه، به دلیل افزایش قدرت سردکنندگی منبع سردکننده دنبالهرو، باعث کاهش دمای حاصل از جوشکاری از ۹۶۰ درجه سانتی گراد به ۹۵۴ درجه سانتی گراد می شود که این موضوع باعث کاهش اعوجاج حاصل از جوشکاری از ۱۳٫۹میلی متر به ۱۱۸ میلی متر می شود.

۵– استفاده از منبع سردکننده دنباله و میتواند وقوع پدیدههایی
 کاهنده سختی مانند تبلور مجدد و رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت را
 کاهش و باعث افزایش سختی در منطقه متأثر از حرارت جوش به مقدار ۱۰٪
 تا ۱۲٪ می شود و سختی را از ۵۰ ویکرز به ۵۶ ویکرز می رساند.



شکل ۱۶. اعوجاج در راستای y الف) قطر مؤثر ۵۸ میلیمتر ب) قطر مؤثر ۴۰ میلیمتر





شکل ۱۷. تأثیر دبی منبع سردکننده بر توزیع دما الف) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه ب) دبی ۸ لیتر بر دقیقه





شکل ۱۸. منحنی دما - فاصله برای نقاط واقع در ۲ = v میلیمتر و ۲۱۵ = z میلیمتر با منبع سردکننده متحرک

Fig. 18. Temperature-distance curve for points located "y = 0 mm" and "z = 215 mm" with a trailing heat sink



(الف)



شکل ۱۹. اعوجاج در راستای y الف) منبع سردکننده با دبی دمش ۱۲ لیتر بر دقیقه ب) منبع سردکننده با دبی ۸ لیتر بر دقیقه

Fig. 19. The effect of heat sink flow rate on distortion in the y direction a) flow rate of 12 l/m b) flow rate of 8 l/m



شکل ۲۰. توزیع سختی در نمونههای جوشکاری شده

Fig. 20. Hardness distribution in the welded samples

on residual stress and distortion of pulsed laser welded Hastelloy C-276 thin sheets, J. Mater. Process. Technol., 214(12) (2014) 2891-2899.

- [13] S.R. Kala, N.S. Prasad, G. Phanikumar, Studies on multipass welding with trailing heat sink considering phase transformation, J. Mater. Process. Technol., 214(6) (2014) 1228-1235.
- [14] T. Bajpei, H. Chelladurai, M.Z. Ansari, Mitigation of residual stresses and distortions in thin aluminium alloy GMAW plates using different heat sink models, Journal of Manufacturing Processes, 22 (2016) 199-210.
- [15] A.S.o. Metals, ASM Metals Handbook, Vol 02 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, in: E.L.R.a.J.H.L. Linden (Ed.), ASM Met. Park. Ohio, 1990.
- [16] A. Int., ASM Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing, and Soldering, in, Met. Park. Ohio, USA., 1993.
- [17] G.F.V. Voort, Metallography, Principles and Practice, Fourth ed., 2007.
- [18] K. Biswas, A numerical prediction of the temperature distribution in the thermionic cathode of a welding arc, J. Mater. Process. Technol., 40(1-2) (1994) 219-237.
- [19] A. Farzadi, S. Serajzadeh, A. Kokabi, Modeling of heat transfer and fluid flow during gas tungsten arc welding of commercial pure aluminum, Int. J. Adv. Manuf. Technol, 38(3) (2008) 258-267.
- [20] E. Ranjbarnodeh, S. Serajzadeh, A. Kokabi, A. Fischer, Prediction of temperature distribution in dissimilar arc welding of stainless steel to carbon steel, Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf, 226(1) (2012) 117-125.
- [21] J.P. Hartnett, T.F. Irvine, Y.I. Cho, G.A. Greene, H. Taniguchi, W.-J. Yang, K. Kudo, Advances in Heat Transfer: Radiative Heat Transfer by the Monte Carlo Method, Academic Press, 1995.
- [22] T.L. Bergman, T.L. Bergman, F.P. Incropera, D.P. Dewitt, A.S. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, 2011.

 A.H. Kokabi, M.M.Ghaznavi, Welding Technology (Processes), First ed., Sharif University, 2005 (in Persian).

منابع

- [2] M. Moeinian, The Key to Welding, Second Edi, Azadeh 2012 (in Persian).
- [3] T.N. S. Aoki, and T. Hiroi, Reduction method for residual stress of welded joint using random vibration, Nucl. Eng. Des., 235(14) (2005) 1441–1445.
- [4] H.R.S. R. V Preston, P. J. Withers, and S. D. Smith, Finite element modelling of tungsten inert gas welding of aluminium alloy 2024, Sci. Technol. Weld. Join., 8(1) (2003) 10-18.
- [5] L.C. J. Xu, and C. Ni, Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girthbutt welded pipes, Int. J. Press. Vessel. Pip., 84(5) (2007) 298–303.
- [6] G.L. G.Luan, C.Li, C. Dong, DC-LSND friction stir welding, China FSW Center Beijing FSW Technol. Co, 2005.
- [7] X. Huang, Residual stress reduction by combined treatment of pulsed magnetic field and pulsed current, Mater. Sci. Eng. A, 528(19) (2011) 6287–6292.
- [8] L.P.C. J. A. Martins, J. A. Fraymann, and S. T. Button, Analyses of residual stresses on stamped valves by X-ray diffraction and finite elements method, J. Mater. Process. Technol., 179 (2006) 30-35.
- [9] Q.G. J. Li, Y. Shi, D. Guo, Y. Du, and Y. Sun, Studies on characteristics of temperature field during GTAW with a trailing heat sink for titanium sheet, J. Mater. Process. Technol., 147(3) (2004) 328–335.
- [10] W. Jiang, Y. Zhang, W. Woo, Using heat sink technology to decrease residual stress in 316L stainless steel welding joint: Finite element simulation, Int. J. Press. Vessel. Pip., 92 (2012) 56-62.
- [11] X. Tian, Q. Shi, Preventing welding hot cracking by welding with an intensive trailing cooler, J. Mater. Process. Technol., 97(1-3) (2000) 30-34.
- [12] Y. Guo, D. Wu, G. Ma, D. Guo, Trailing heat sink effects

and experimental investigation on the mechanism of synchronous trailing cold air heat sink in eliminating the deformation during laser welding SUS301L thin sheet, Opt Laser Technol, 153 (2022) 108258.

- [23] A. BOILER, P.V. CODE, MATERIALS Part D–, American Society of Mechanical Engineers, 1992(1995) (1989) 1998-2001.
- [24] Z. Liu, X. Jin, J. Zhang, Z. Hao, J. Li, H. Chen, Numerical

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم F. Jafari Vidoji, E. Ranjbarnodeh, S. E. Mirsalehi, Finite Element Simulation of the Trailing Heat Sink's Effect on Welding-Induced Distortion of Al 3105, Amirkabir J. Mech Eng., 54(8) (2022) 1945-1968.





بی موجعه محمد ا