



# Exergy Analysis of A36 Mild Steel Welding Process and Investigation of Hammering, Parallel Heating and Vibration Method on Residual Stress Reduction

#### ARTICLE INFO

*Article Type* Original Research

Authors

Mamourian M.\*1 *PhD,* Naghedifar S.A. <sup>1</sup> *MSc,* Mohammadi Neyshaburi M.<sup>2</sup> *MSc* 

How to cite this article Mamourian M, Naghedifar S.A, Mohammadi Neyshaburi M. Exergy Analysis of A36 Mild Steel Welding Process and Investigation of Hammering, Parallel Heating and Vibration Method on Residual Stress Reduction. Modares Mechanical Engi-

neering. 2020;20(8):1979-1989.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran <sup>2</sup>Aerospace Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran Phone: -Fax: mamourian@um.ac.ir

#### Article History

Received: October 15, 2018 Accepted: May 4, 2020 ePublished: August 15, 2020

#### ABSTRACT

Residual stress is one of the most substantial defects of welded parts caused by intensive thermal gradient. In this study, different mechanical and thermal techniques for reducing residual stresses have been investigated and the effectiveness of contributing parameters has been discussed afterwards. Subsequently, some equations have been proposed for welding energy and exergy efficiency and the effects of parallel flame heating, vibration method, and hammer working method on reducing welding residual stresses are expressed. The results show that by using parallel heating technique, the enhancement of flame power would result in reducing both energy and exergy efficiencies. However, the decremental rate of the two efficiencies would slow down and they approach to an asymptotic value. Increasing the speed of welding improves two efficiencies more than 2 times. On the other hand, the normalized entropy is reduced by increasing the heat input of the flames. This fact is an indicator of a reduction in welding residual stress. This reduction is more at high speeds. Eventually, the ratio of the two efficiencies shows that in this study, economical power was about 1800j/s. The reduction of normalized entropy for the vibration, hammering, and parallel flame methods are 0.001, 0.1, and 10, respectively. Overall, it is expected that thermal methods are more efficient than mechanical methods in reducing residual stresses.

Keywords Welding Residual Stress; Exergy; Hammering; Parallel Heating; Vibration Method

### CITATION LINKS

[1] Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds [2] Thermal and stress analysis of a sheet metal in welding [3] Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint [4] Using heat sink technology to decrease residual stress in 316L stainless steel welding joint: Finite element simulation [5] A new technique for reducing the residual stress induced by welding in type 304 stainless steel [6] Reduction of residual stresses induced by welding in monel alloy, using parallel heat welding [7] Theory of thermomechanical processes in welding [8] Entropy generation rate during laser pulse heating: Effect of laser pulse parameters on entropy generation rate [9] Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment [10] Thermodynamics and transport properties of metal/inert-gas mixtures used for arc welding [11] Entropy generation in Marangoni convection flow of heated fluid in an open ended cavity [12] Influence of heat-input on mechanical behavior and phase balance of 2304 duplex stainless steel resistance spot welds [13] Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes [14] Friction stir vibration welding and study about the effects of its parameters on microstructure and mechanical properties of Al5052 joint [15] Laser welding: the first and second law analysis [16] GTAW liquid pool convections and the weld shape variations under helium gas shielding [17] Simulation of welding distortions in ship section [18] Conduction of heat in solids [19] Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting [20] The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress [21] Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds [22] Effect of impact energy on residual stresses induced by hammer peening of 304L plates [23] Investigation of residual stress of arc welding by finite element method [24] Handbook of Welding and Joints in Steel Buildings [25] Vibratory stress relief-an investigation of the underlying processes

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱۹۸۰ مجتبی ماموریان و همکاران ــ

تحلیل اگزرژی فرآیند جوشکاری در فولاد نرمه A36 و بررسی روشهای چکشکاری، گرمایش موازی و روش ارتعاشی جهت کاهش تنشهای پسماند

## مجتبی ماموریان<sup>\*</sup> PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران **سیدعلی ناقدیفر MSc** گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران **منا محمدینیشابوری MSc** گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

# چکیدہ

یکی از مهمترین عیوب قطعات جوشکاریشده که در اثر گرادیانهای شدید گرمایی ایجاد میشود، تنشهای پسماند است. در این تحقیق روشهای مختلف مکانیکی و حرارتی جهت کاهش تنشهای پسماند بررسی شده و پارامترهای مختلف موثر مورد بحث قرار گرفته است. در همین راستا، روابطی برای بازده انرژی و اگزرژی برای جوشکاری ارایه شده و سپس تاثیرات گرمایش شعلههای موازی، روش ارتعاشی و روش چکشکاری بر کاهش تنشهای پسماند جوشکاری به کمک این دو بازده بیان شده است. نتایج نشان میدهد که در روش گرمایش موازی، با افزایش توان شعلهها، هر دو بازده انرژی و اگزرژی کاهش یافته اما از روند کاهشی این دو بازده، به مرور کاسته میشود و به مقدار صفر میل میکند. افزایش سرعت جوشکاری نیز هر دو بازده را تا بیش از ۲ برابر افزایش میدهد. از طرفی آنتروپی بیبعدشده با افزایش گرمای ورودی شعلهها، کاهش مییابد که نشان از کاهش تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری است. این کاهش در سرعتهای بالاتر، بیشتر است. همچنین نسبت دو بازده نشان میدهد که در این بررسی، توان حدود ۱۸۰۰ژول بر ثانیه، مقداری بهینه از نظر اقتصادی خواهد بود. مرتبه کاهش تولید آنتروپی بیبعدشده برای روش ارتعاشی ۰/۰۰۱، روش چکشکاری ۰/۱ و روش شعله موازی ۱۰ است. میتوان انتظار داشت روشهای گرمایشی کارآیی بیشتری نسبت به روشهای مکانیکی در کاهش تنشهای پسماند دارا هستند.

**کلیدواژهها:** تنشهای پسماند جوشکاری، اگزرژی، چکشکاری، گرمایش موازی، روش ارتعاشی

تاریخ دریافت: ۲۷/۷۰/۷۳
تاریخ پذیرش: ۲/۱۵/۱۳۹۹
نویسنده مسئول: mamourian@um.ac.ir

#### مقدمه

پژوهشهای صورتگرفته در راستای افزایش کیفیت فرآیند جوشکاری نشان میدهد که مهمترین عامل در میزان تنشهای پسماند، مشخصههای شعله جوش و گرادیانهای دمایی ایجادشده بر روی قطعه است. از اینرو، مطالعات متعددی پیرامون تأثیرات توزیع دما و شکل حوضچه مذاب قطعه بر میزان تنشهای پسماند جوشکاری صورت گرفته است. در پژوهشی تأثیر سرعت سرمایش قطعه را بر میزان تنشهای پسماند جوشکاری، به روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند و اثبات کردند که افزایش سرعت

سرمایش، موجب افزایش تنشهای پسماند میشود<sup>[1]</sup>. گرادیانهای دمایی تأثیر چندانی بر تنش پسماند عرضی ندارند<sup>[2]</sup>. در تحقیقی دیگر مدلهای مختلفی از شار حرارتی را برای شبیهسازی شعله جوش استفاده کردند و تأثیر هر یک را بر میزان تنشهای یسماند ایجادشده مورد مطالعه قرار دادند<sup>[3]</sup>. در همین راستا روشهای متعددی برای کاهش گرادیانهای دمایی و تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری ارایه شده است. از جمله تکنولوژی چاه گرمایی برای ایجاد تغییرات مورد نظر در تعیین گرادیانهای گرمایی نوار جوش بهره بردند و بدین وسیله توانستند میزان تنشهای پسماند را تا ۲۰% کاهش دهند<sup>[4]</sup>. روش دیگری که ارایه شده، استفاده از دو شعله متحرک بوده که به موازات شعله جوش حرکت میکنند. این روش نخستینبار توسط *لین* و *چو* ارایه شد<sup>[5]</sup>. وی از طریق نتایج تجربی نشان داد که با استفاده از گرمایش موازی، میتوان تنشهای پسماند را ۲۱ تا ۳۲% کاهش داد. محققان از طریق روش سوراخکاری نشان دادند که با بهکارگیری روش مورد بحث در جوشکاری برخی قطعات، میتوان تا حدود ۲۰% تنشهای ون- میزز را کاهش داد<sup>[6]</sup>.

بحث از ترمودینامیک جوشکاری بهمنظور افزایش کیفیت جوش، در چند سال اخیر مطرح شده است<sup>[7]</sup>. تأثیر پارامترهای پالس لیزر جوشکاری بر نرخ تولید آنتروپی مورد مطالعه قرار گرفته است<sup>[8]</sup>. ارتباط میان بازگشتناپذیری (تولید آنتروپی) و تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری، توسط محققانی دیگر ارایه شده است<sup>[9]</sup>. با استفاده از رابطه تولید آنتروپی برحسب توزیع دما، تأثیر توالی جوش بر میزان تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت<sup>[10, 11]</sup>. اما در پژوهش حاضر، روابط تحلیلی بازده انرژی و بازده اگزرژی برای جوشکاری قوسی نوشته شده و تأثیر گرمایش موازی و سرعت جوشکاری بر مقدار هر یک از بازدههای فوق بررسی شده است و نهایتاً تغییرات اختلاف این دو بازده در اثر گرمایش موازی و سرعت جوشکاری مورد بررسی قرار میگیرد. اختلاف این دو بازده، در اثر بازگشتناپذیری فرآیند جوش یا همان تولید آنتروپی در خلال پروسه جوشکاری است و چون مهمترین دلیل بازگشتناپذیری فرآیند، تنشهای پسماند است لذا تغییرات اختلاف دو بازده در اثر گرمایش موازی، میتواند بیانگر تغییرات تنشهای پسماند قطعات باشد. همچنین پارامتری بهصورت نسبت دو بازده معرفی شده و نشان داده شده که بهکمک این پارامتر، میتوان گرمایش بهینه برای مساله را تعیین نمود.

پر تر ایران حرارت ورودی فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطهای محققان اثرات حرارت ورودی فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطهای فولاد زنگنزن دوبلکس ۲۳۰۴ را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند هر چقدر سرعت سردشدن در جوشکاری مقاومتی بیشتر باشد، تعادل فاز فریت- آستنیت در منطقه ذوب از بین میرود. همچنین هر چقدر جریان جوشکاری افزایش پیدا کند، ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی جوش بهبود پیدا میکند<sup>[12]</sup>. بررسی اثر پیشگرمایش بر روی تنشهای پسماند در جوشکاری تعمیری

لولههای فولادی نشان داد هر چقدر دما افزایش پیدا کند تنشهای پسماند محوری کششی هم در سطح خارجی و هم در سطح داخلی کاهش پیدا میکند اما در سطح خارجی تنشهای فشاری تغییر چندانی نمیکند. همچنین اثر پیشگرمایش بر اندازه و توزیع تنش پسماند محیطی در سطح داخلی لوله تأثیر بهسزایی ندارد. در دماهای پیشگرم بالا نیز تأثیر تنشهای پسماند محوری بیشتر میشوند<sup>[13]</sup>. بررسی اثرات پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی بر ریزساختار آلیاژ آلومینیوم نشان داد اندازه دانه ناحیه جوش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی ۳۰% از دانه ناحیه جوش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عواملی همچون سرعت چرخش، سرعت ابزار بستگی دارد و در نهایت با توجه به مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی، استفاده توجه به مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی، استفاده

در این پژوهش به کمک نرمافزار ANSYS Fluent و روابط ترمودینامیک به تحلیل اگزرژی فرآیند جوشکاری در فولاد نرمه A36 پرداخته خواهد شد. در این راستا، روشهای چکش کاری، گرمایش موازی و روش ارتعاشی بر کاهش تنشهای پسماند مطالعه میشود.

# فیزیک و روابط حاکم مساله روابط روش المان محدود

معادله هدایت حرارتی مورد استفاده به شکل زیر است:

$$\rho(T)c_p(T)\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left( k(T)\frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( k(T)\frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left( k(T)\frac{\delta T}{\delta z} \right) + Q \tag{1}$$

که در آن *C<sub>p</sub>* ،Q و ρ بهترتیب نرخ گرمای تولیدی حجمی، ظرفیت گرمایی و چگالی قطعه هستند. شرایط مرزی معادله مورد بحث به شکل زیر است:

$$\begin{aligned} q_c &= h_r (T^4 - T_\infty^4) \\ q_r &= h_r (T^4 - T_\infty^4) \end{aligned} \tag{Y}$$

که در آن ،q<sub>r</sub> ،q<sub>c</sub> ا و h<sub>r</sub> بهترتیب گرمای مبادلهشده در اثر جابهجایی و تشعشع، ضریب جابهجایی و ضریب تشعشع هستند. فرم المان محدود معادله هدایت به شکل زیر است:

$$\rho c \frac{\delta I}{\delta t} + \{L\}^T \{q\} = Q \tag{(4)}$$

که در آن {L} ماتریس عملگر دیفرانسیل است. معادله تعادل به شکل زیر است:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \tag{(1)}$$

که در آن f بردار نیروی حجمی و  $\sigma$  تانسور تنش است. معادله الاستو- پلاستیک مورد استفاده نیز به شکل زیر است:

(0)  $\{\Delta \sigma_e\} = \{D^{ep}\}[B]\{\Delta U_e\} - \{C^{th}\}[M]\{\Delta T_e\} = \{\Delta \sigma_e\}$ by cr  $[M], \{\Delta T_e\}, [M], \{\Delta U_e\}, \{\Delta U_e\}, [M], \{\Delta \sigma_e\}, \{\Delta$ 

Volume 20, Issue 8, August 2020

ــ تحلیل اگزرژی فرآیند جوشکاری در فولاد نرمه A36 و برسی روشهای چکشکاری... ۱۹۸۱ افزایش دمای گرهی هستند. نهایتاً معادله اصلی المان محدود بهصورت معادله زیر خواهد بود:

$$^{M+1}K_1\{\Delta U_e\} - {}^{M+1}K_2\{\Delta T_e\} = \{\Delta R\}$$
 (٦)  
که در آن

$$\begin{split} ^{M+1}K_{1} &= \int_{\nu}^{1} [B]^{T} \{D^{ep}\} [B] dV \\ ^{M+1}K_{1} &= \int_{\nu}^{1} [B]^{T} \{C^{th}\} [M] dV \\ \{R\} &= \int_{\nu}^{1} [N]^{T} \{P\} dA + \int_{\nu}^{1} [N]^{T} \{f\} dV \end{split}$$
 (Y)

که در آن f ،P ،N بهترتیب تابع شکل المان، بردار نیروی سطحی و بردار نیروی حجمی هستند. نهایتاً بهکمک رابطه ٦ مقدار تغییر مکان گرهی U<sub>e</sub> محاسبه شده و از رابطه ٥ تنش نهایی بهدست میآید.

## محاسبات بازده و اگزرژی

فرآیندهای انتقال حرارت و انتقال جرم در طی جوشکاری قوسی در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱، مقداری از انرژی تولیدشده در اثر جریان الکتریکی، بهوسیله سه مکانیزم هدایت، جابهجایی و تشعشع اتلافشده، قسمت اعظم آن موجب تولید فلز نوار جوش شده و مقدار اندکی نیز صرف تبخیر فلز میشود. در این مساله، قطعه در دمای اولیه  $T_{pr}$  قرار دارد که دمای اولیه باند جوش است. چنان چه باند جوش بهعنوان حجم کنترل در نظر بالارفتن دما و نهایتاً ذوب آن میشود در حالی که دمای نواحی ذوبشده به مرور منجمد میشود و گرمای خود را از طریق مکانیزمهای هدایت حرارتی، تشعشع و جابهجایی حرارتی از دست میدهد. سرمایش تا دمای اولیه قطعه ادامه مییابد که نقطه نهایی بررسی مساله است. در این حالت فرض میشود دمای قطعه نهایی بررسی مساله است. در این حالت فرض میشود دمای قطعه



**شکل ۱)** انتقال جرم و حرارت صورتگرفته در طی فرآیند جوشکاری<sup>[15]</sup>

بازده انرژی برای جوشکاری به فرم زیر تعریف میشود<sup>[15]</sup>: ( جار جشکاری میشود انشان از میان مای توان بازیر جوشکاری

$$\eta_I = \frac{m_{bond} (h_b - h_{in})}{Q} \qquad (\lambda)$$

که در آن  $h_b$ ،  $\dot{m}_{bond}$  و  $h_i$  بهترتیب نرخ تغییر جرم نوار جوش، آنتالپی ویژه باند و آنتالپی ویژه ورودی به سیستم (نوار جوش) بوده و  $\dot{Q} = \dot{Q}_{conduction} + \dot{Q}_{convection} + \dot{Q}_{Radiation} +$ بوده و نصت. از جرم فلز تبخیرشده میتوان صرف

**Modares Mechanical Engineering** 

۱۹۸۲ مجتبی ماموریان و همکاران .

نظر کرد<sup>[16]</sup>، لذا میتوان نوشت:

$$\eta_I = \frac{m_{bond}[C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m]}{\dot{Q}}$$

$$= \frac{m_{bond}[C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m]}{III}$$
(9)

که در رابطه فوق،  $T_{pr}$  و  $T_m$ ، $L_m$  ، $\mathcal{C}_{p(solid)}$  بهترتیب ظرفیت گرمایی ویژه فلز باند، گرمای نهان ذوب، دمای ذوب فلز نوار جوش و مقدار دمای اولیه قطعه است. همچنین UI انرژی الکتریکی مصرفشده در الکترود است.

با تقسیم صورت و مخرج کسر بر سرعت جوشکاری میتوان نوشت:

$$\eta_I = \frac{v.\dot{m}_{bond}[C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m]}{ULd} \tag{(10)}$$

که در آن d، طول باند جوشکاری و v سرعت حرکت شعله جوش است. بازده اگزرژی برای فرآیند جوشکاری بهصورت زیر تعریف می شود<sup>[15]</sup>:

$$\eta_{II} = \frac{|\vec{x}_{i(\hat{\chi})} \, k_{i(\hat{\chi})} \, z_{i(\hat{\chi})} \, z_{i(\hat{\chi})}}{z_{i(\hat{\chi})} \, z_{i(\hat{\chi})} \, z_{i(\hat{\chi})}} = \frac{\dot{m}_{bond}(x_b - x_{in})}{\dot{x}_{Total}} \tag{11}$$

که در آن  $x_{in}$   $x_b$  و  $\dot{X}_{Total}$  بهترتیب اگزرژی ویژه نوار جوش، اگزرژی ویژه ورودی به سیستم (نوار جوش) و نرخ کل اگزرژی ورودی به سیستم است. توجه شود که نرخ اگزرژی کل ورودی در واقع همان انرژی الکتریکی مصرفشده در الکترود است (U.I) که چون در مرحله بعدی فرآیند جوش، انرژی الکتریکی بهصورت گرما ظاهر میشود، این دو انرژی را میتوان از نظر مقدار، یکسان در نظر گرفت. می توان نوشت:

$$\dot{X}_{b} - \dot{X}_{in} = \dot{m}_{bond} [(h_{b} - h_{in}) - T_{0}(s_{b} - s_{in})]$$
(1Y)

*s*<sub>b</sub> و *S*<sub>in</sub> بهترتیب آنتروپی ویژه نوار جوش و آنتروپی ویژه ورودی به سیستم هستند. در نتیجه رابطه ۱۳ حاصل میشود:

$$\dot{X}_b - \dot{X}_{in} = \dot{m}_{bond} \left[ C_{P(solid)} \left( T_m - T_{pr} \right) + L_m - T_0 \left( C_{P(solid)} ln \left( T_m / T_{pr} \right) + L_m / T_m \right) \right]$$
(19)

$$\dot{X}_{Total} = \dot{Q} \tag{15}$$

$$\eta_{II} = \left[ \dot{m}_{bond} \left( C_{P(solid)} (T_m - T_{pr}) + L_m - T_0 \left( C_{P(solid)} ln (T_m / T_{pr}) + L_m / T_m \right) \right) \right] / (\dot{Q})$$
(10)

و یا میتوان نوشت:

$$\eta_{II} = \left[ v.\dot{m}_{bond} \left( C_{P(solid)} (T_m - T_{pr}) + L_m - T_0 (C_{P(solid)} ln (T_m / T_{pr}) + L_m / T_m) \right) \right] / (UI.d)$$

$$(17)$$

با تلفیق روابط ۱۰ و ۱۶ رابطه اختلاف بازده انرژی و بازده اگزرژی و یا پارامتر تولید آنتروپی بیبعدشده، حاصل میشود:

$$\eta_I - \eta_{II} = \frac{\dot{m}_{bond} \left( T_0 \left( C_{P(solid)} \cdot ln(T_m/T_{pr}) + L_m/T_m \right) \right)}{UI} \qquad (YY)$$

 $\eta_{I} - \eta_{II} = \frac{v.\dot{m}_{bond} \left( T_0 \left( C_{P(solid)} \cdot ln(T_m/T_{pr}) + L_m/T_m \right) \right)}{v.\dot{m}_{bond} \left( T_0 \left( C_{P(solid)} \cdot ln(T_m/T_{pr}) + L_m/T_m \right) \right)}$  $(\Lambda \Lambda)$ 

این اختلاف بیانگر تولید آنتروپی بیبعدشده در خلال جوشکاری است. مقدار UI در طی فرآیند جوشکاری ثابت میماند، لذا یارامترهای متغیر موثر در میزان تولید آنترویی، در صورت کسر رابطه ۱۸ جای دارد. پارامتر دیگری که باید معرفی و تفسیر شود، نسبت بازده اگزرژی و بازده انرژی است که از تلفیق روابط ۱۶ و ۱۰

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

به شکل زیر خواهد بود:

$$\frac{\eta_{II}}{\eta_{I}} = 1 - \frac{T_{0} \left[ C_{p(Solid)} ln \left( \frac{T_{m}}{T_{pr}} \right) + \frac{L_{m}}{T_{m}} \right]}{C_{p(Solid)} (T_{m} - T_{pr}) + L_{m}}$$
(19)

 $n_I$ 

صورت عبارت دوم از سمت راست رابطه ۱۹، بیانگر تولید آنترویی و مخرج آن بهصورت مستقیم با بازده انرژی رابطه دارد. همان طور که مشاهده میشود، هم صورت و هم مخرج عبارت مورد بحث، با دمای اولیه  $(T_{Pr})$  رابطه عکس دارند بهعبارت دیگر، نسبت به تغییرات دمای اولیه، همرفتار هستند؛ این در حالی است که تمایل داریم صورت کسر (که بیانگر تولید آنتروپی است و رابطه عکس با کیفیت جوش دارد)، کاهش و مخرج کسر (که رابطه مستقیم با بازده انرژی دارد) افزایش یابد. حالت بهینه فرآیند هنگامی اتفاق میافتد که صورت کسر مورد بحث، بیشتر از مخرج  $T_{Pr}$  آن کاهش یابد یعنی شیب نمودار رابطه ۱۹ نسبت به افزایشی باشد. اگر شیب نمودار، کاهشی باشد، به این معنا است که درصد کاهش بازده انرژی، بیشتر از درصد افزایش بازده اگزرژی (یا افزایش کیفیت جوش) است و این بهصرفه نیست. اگر شیب نمودار به صفر نزدیک شود، در این صورت درصد افزایش بازده اگزرژی و درصد کاهش بازده انرژی به یک میزان است.

# شبيهسازي عددي

## فرضیات و روش انجام

از نرمافزار ANSYS برای شبیهسازی فرآیند حرارتی جوشکاری قوسی بهره گرفته شده است. از اعمال جریان گرمایی به گرهها استفاده شده است. همچنین برای مدلسازیهای انجامگرفته از فولاد نرمه A36 استفاده شده و تغییرات خواص مکانیکی و گرمایی فلز برحسب دما از مطالعه *بیرک- سورنسن*<sup>[17]</sup> استخراج شده است. جوشکاری از نوع لببهلب فرض شده که صفحات دارای پخ با زاویه ۶۰درجه هستند. چون تنها از یک پالس جوشکاری استفاده شده است میتوان انتظار داشت برآمدگی ایجادشده بر روی نوار جوش چندان قابل اعتنا نباشد.

برای جوشکاری با شدت جریان ۲۱۰آمپر و ولتاژ ۲۵ صورت گرفته است. برای باند جوش این فولاد، با فرض ترکیب نیمی از فولاد و نیمی از فلز الکترود، گرمای نهان ذوب ۲۷۴۰۰۰ ژول بر کیلوگرم، دمای ذوب ۱۴۸۲درجه سانتیگراد، چگالی ۷۸۵۰کیلوگرم بر مترمکعب و گرمای ویژه متوسط در محدوده دمایی مورد استفاده، برابر ۳۱۰ژول بر کیلوگرم درجه کلوین است. شعلههای گرمایش نیز به موازات مشعل جوشکاری و به فاصله ۶سانتیمتری از یکدیگر قرار دارند.

## تأثیرات گرمایشی شعلههای موازی

استفاده از دو شعله متحرک به موازات شعله جوش که به اختصار گرمایش موازی خوانده میشود نخستینبار توسط *لین* و *چو*<sup>[5]</sup> ارایه شد که مبنای آن مانند سایر روشهای گرمایشی، کاهش گرادیانهای دمایی اطراف نوار جوش است. مکانیزم این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) طرحواره روش گرمایش موازی

تأثیر شعلههای موازی گرمایشی در مقدار *T<sub>Pr</sub>* واقع میشود. معادله دیفرانسیل هدایت حرارتی به شکل زیر بیان میشود:

 $\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ (Y°)  $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ (Y°)  $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ (Y°)

 $T = \frac{Q}{8(\pi kt)^{3/2}} e^{-\left[\left(x-x'\right)^2 + \left(y-y'\right)^2 + \left(z-z'\right)^2\right]/(4kt)}$ (Y1)

که در آن 'x' 'y و 'z مختصات قرارگیری منبع حرارتی است. شکل ۳، شماتیکی از مساله منبع حرارتی متحرک را نشان میدهد که حروف x، y و z، نمایانگر مختصات مطلق هستند و X، مختصات متحرک در راستای محور x است.



فاصله بین منبع حرارتی و نقطه M، به شکل زیر است: $\sqrt{(x-v au_i)^2+y^2+z^2}$  (۲۲) در این صورت افزایش دمای  $d heta_M$  در نقطه M در زمان t در اثر

گرمای آزادشده، در زمان تنابی به شکل زیر خواهد بود: گرمای آزادشده، در زمان t<sub>i</sub> به شکل زیر خواهد بود:

$$dT = \frac{q_{pt} u \tau_i}{8\rho c (\pi k \tau)^{3/2}} e^{-[(x - U\tau_i)^2 + y^2 + z^2]/(4k\tau_i)}$$
(YW)

$$x - \upsilon \tau_i = X + \upsilon \tau, \tau = t - \tau_i \tag{YE}$$

$$T = \frac{q_{pt}}{c_{p(4a\pi)^{\frac{3}{2}}}} \int_{\tau=0}^{t} \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} \exp\left(-\frac{(X+\nu\tau)^2 + y^2 + z^2}{4a\tau}\right)$$
(Yo)

و یا میتوان نوشت:

Volume 20, Issue 8, August 2020

۱۹۸۳ – تحلیل اگزرژی فرآیند جوشکاری در فولاد نرمه A36 و بررسی روشهای چکش کاری...  

$$T = \frac{q_{pt}}{Cp(4a\pi)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{Xv}{2a}\right)$$

$$\int_{0}^{t} \frac{d\tau}{cp(4a\pi)^{\frac{3}{2}}} \exp\left[-\frac{X^{2}+y^{2}+z^{2}}{2a}\right] \exp\left(-\frac{v^{2}\tau}{2a}\right)$$
(۲٦)

 $\int_{\tau=0}^{} \frac{\exp[-\frac{1}{4a\tau}]\exp[-\frac{1}{4a\tau}]}{e^{3/2}} \exp[-\frac{1}{4a\tau}]$ Sumar litikation (index in the second se

$$\omega = \frac{u^2 \tau}{4a} \tag{Y}$$

در این صورت معادله ۲۶ به شکل زیر تبدیل میشود:

$$T = \frac{q_{pt} \cdot v}{16\lambda a \pi^{3/2}} \exp(-\frac{xv}{2a}) \times \int_0^{\frac{v-t}{4a}} \frac{dw}{w^{3/2}} \exp[-w - \left(\frac{u^2}{4w}\right)]$$
(YA)

که در آن:

$$u = \frac{Rv}{2a} \tag{Y9}$$

$$R = x^2 + y^2 + z^2 \tag{(\vee \circ})$$

معادله ۲۸ برای شرایط گذرا نیز میتواند بهکار گرفته شود. توجه شود که قسمت انتگرالی این رابطه از طریق عددی قابل حل است که در اینجا برای حل آن از روش سیمپسون بهره گرفته شده است. آزمایشها نشان میدهد که اگر جوشکاری در فاصله به اندازه کافی طولانی صورت گیرد، حالتی در قطعه ایجاد میشود که به آن حالت شبهپایا گفته میشود، به این معنا که چنان چه ناظری بر روی منبع حرارتی مورد استفاده، قرار گیرد، هیچ گونه تغییری در توزیع دمای اطراف منبع حرارتی ایجاد نمیشود. یا به بیان دیگر، اگر توزیع دمای اطراف منبع حرارتی به شکل یک تپه در نظر گرفته شود، در این صورت در حالت انتقال حرارت شبهپایا، تپه بهصورت قطعه حرکت میکند<sup>[10]</sup>. نهایتاً رد پای خطوط همدما بر روی سطح قطعه، خطوطی موازی یکدیگر و در جهت حرکت جوش خواهند بود.

برای مقادیر ۵ < w انتگرال رابطه ۲۹ مقدار تقریباً یکسانی خواهد داشت (حتی اگر ∞ → w) دراینصورت میتوان برای ۵ < w شرایط شبهپایا در نظر گرفت (زیرا عبارات شامل زمان، درون انتگرال قرار دارد و مقدار انتگرال در این شرایط ثابت است).

## استفاده از روش ارتعاشی برای کاهش تنشهای پسماند

تنش گیری ارتعاشی قطعات جوشکاری شده (VSR) یکی از روش های کاهش تنش های پسماند از رسته اورلودینگ است که هر چند برای بیش از چهل سال سابقه دارد، با این وجود مکانیزم آن، ارزیابی های کمی و میزان تأثیرگذاری آن همچنان در دست مطالعه و بررسی است<sup>[20]</sup>. فرکانس کوتاه ارتعاشی با انرژی نوسانی بالا به قسمتهای مونتاژشده یا قسمتهای ماشین کاری شده اعمال می شود. این ارتعاش های فراوان، باری (شارژی) مازاد بر الگوهای تنش های موجود در قطعه بوده که علاوه بر تغییر شکل های پلاستیک محلی، موجب کاهش پیک تنش های پسماند می شوند که نهایتاً سبب تولید قطعاتی پایدار و کاهش اعوجاجها می شود. شماتیک استفاده از روش ارتعاشی در شکل ۴ نشان داده شده است.



**شکل ٤)** شماتیک استفاده از روش ارتعاشی در جوشکاری<sup>[21]</sup>

## ارزيابى صحت

کاهش تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری در قبال استفاده از فرکانس روش چکشکاری در نمودار ۱ نشان داده شده است. در این نمودار، سیمبلها نشانگر نتایج تجربی پژوهش *هاسینی* و همکاران<sup>[22]</sup> بوده و خطوط، نتایج پژوهش حاضر است. همان طور که مشاهده میشود، تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری با افزایش انرژی چکشها و افزایش تعداد بارگذاری، کاهش مییابد. رابطه کمی ۲۰ بین پارامتر بازگشتناپذیری بیبعدشده و کاهش تنشهای پسماند پیشنهاد میشود:

$$\Delta \sigma = \frac{1.23 \times 10^6 (13.738 - I)}{(1000)}$$
(W1)

که در آن A، I و  $\Delta \sigma$  بهترتیب دامنه ارتعاش، بازگشتناپذیری بیبعدشده و کاهش تنشهای پسماند برحسب مگاپاسگال هستند. میزان کاهش تنشهای پسماند در اثر روش ارتعاشی محاسبهشده از رابطه ۳۱ را در مقایسه با نتایج مطالعه *راو* و همکاران $^{[20]}$  در نمودار ۲ نشان داده شده است.

میزان خطای نسبی برای تعداد دورهای مختلف در سه دامنه در نمودار ۳ نشان داده شده است. بهدلیل اینکه رابطه تحلیلی کرنش، در تعداد سیکلهای کمتر، خطای بیشتری دارد لذا میزان خطای رابطه ۳۱ در تعداد دور کمتر، بیشتر است.

علاوهبر این مقدار تنشهای پسماند محاسبهشده با دادههای تجربی مطالعه *حنایی*<sup>[23]</sup> در نمودار ۴ مقایسه شده است.



**نمودار ۱)** مقایسه نتایج کاهش تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری در اثر چکشکاری نسبت به تعداد مراحل بارگذاری پژوهش *هاسینی* و همکاران<sup>[22]</sup> و پژوهش حاضر



**نمودار ۲)** میزان کاهش تنشهای پسماند بهازای تعداد دورهای ارتعاشدهی در دامنههای ارتعاشی مختلف محاسبهشده از رابطه ۳۱ در مقایسه با نتایج مطالعه *راو* و همکاران<sup>[20]</sup>



**نمودار ۳)** تغییرات میزان خطای نسبی (رابطه ۳۱) در دامنههای مختلف نسبت به تعداد بارگذاری



**نمودار ٤)** نتایج شبیهسازی تغییر تنشهای پسماند با فاصله از نوار جوش در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مطالعه *حنایی*[<sup>23]</sup>

## نتایج و بحث تأثیرات روش ارتعاشی

در مطالعه *طهونی*<sup>[24]</sup> نشان داده شده است که نمودار نیروی اعمالشده در اثر فرآیند ارتعاشی و کرنشهای پلاستیک در تعداد سیکلهای مختلف، یکسان است (نمودار ۵). لذا رابطه ۳۲ برای تعداد سیکلهای مختلف صادق است.

(٣٢)

(٣٣)

 $\varepsilon_r = A.P_1 \left[ 1 - exp \left( N. \left( \frac{P_2}{A} \right) \right) \right]$ 

A که در آن  $\mathcal{E}_r$  کرنش خزشی سیکلی پس از N تعداد سیکل،  $\mathcal{E}_r$ دامنه تنشهای سیکلی دینامیک،  $P_1$  و  $P_2$  ثوابت تطبیق معادله با منحنی تجربی هستند. در این صورت کاهش تنشهای پسماند به شکل زیر قابل بیان است<sup>[25]</sup>:

 $\Delta \sigma = \epsilon . \epsilon_r$ 

که در آن  $\epsilon$  مدول دینامیک است.

بازده انرژی برای فرآیند تلفیقی جوشکاری- کارسختی ارتعاشی در نمودار ۶ نمایش داده شده است که در آن فرکانس ارتعاش ۱۰هرتز است. همان طور که در نمودار ۶ دیده میشود، افزایش تعداد دورههای بارگذاری ارتعاشی موجب کاهش بازده انرژی میشود زیرا مصرف انرژی بیشتر میشود. اما به مرور شیب نمودار کاهش مییابد که بهدلیل کاهش کرنش و در نتیجه کاهش انرژی مصرفی است. تغییرات بازده اگزرژی فرآیند مورد بحث برای چند تعداد سیکل بارگذاری ارتعاشی در نمودار ۲ مقایسه شده است.

با مقایسه نمودارهای ۶ و ۷ مشخص میشود که بازده انرژی از بازده اگزرژی بیشتر است. این اختلاف بهدلیل تولید آنتروپی در خلال فرآیند مورد بحث است از اینرو روند تغییرات این دو نمودار مشابه یکدیگر هستند. کاهش هر دو بازده نشان از آن دارد که این محدوده از لحاظ اقتصادی هزینه بالایی را برای کارگزاران به همراه دارد.

اختلاف دو بازده انرژی و اگزرژی در نمودار ۸ نشان داده شده است که با عنوان بازگشتناپذیری بیبعدشده خوانده میشود. طبیعی است که در فرآیندهای صنعتی تمایل برای کاهش هر چه بیشتر این پارامتر وجود دارد. مطابق نمودار ۸ برای دامنه ارتعاشی ۳۰مگاپاسگال در حوالی تعداد ۱۰۰ سیکل ارتعاشی، مقدار تولید آنتروپی بیبعدشده تقریباً به حداقل میزان خود میرسد. لذا از این تعداد سیکل به بعد تولید آنتروپی کاهش نخواهد داشت و یا به بیان دیگر ارتعاش بیشتر، تأثیری بر میزان تنشهای پسماند نخواهد داشت. بنابراین تعداد سیکل بهینه برای دامنه ۳۰مگایاسکال حدود ۱۰۰دور است. با افزایش دامنه ارتعاش، تعداد سيكل بهينه افزايش مىيابد.



**نمودار ۵)** تغییرات نیرو با درصد کرنش خزشی در تعداد سیکلهای مختلف<sup>[24]</sup>



نمودار ۶) تغییرات بازده انرژی نسبت به تعداد سیکل عملیات ارتعاشی در دامنههای مختلفی از ارتعاش



نمودار Y) تغییرات بازده اگزرژی نسبت به تعداد سیکل عملیات ارتعاشی در دامنههای مختلفی از ارتعاش



نمودار ۸) تغییرات تولید آنتروپی بی بعدشده نسبت به تعداد سیکل عملیات ارتعاشی در دامنههای مختلفی از ارتعاش

## تأثيرات روش چکشکاری

اگر برخورد، با فرکانس ۴/۵هرتز صورت بگیرد در این صورت بازده انرژی مطابق نمودار ۹ خواهد بود. مطابق این نمودار بازده انرژی

#### ۱۹۸۶ مجتبی ماموریان و همکاران ــ

برای سه انرژیدهی مختلف ترسیم شده است. انرژی بیشتر موجب کاهش بیشتر بازده انرژی میشود لذا بهکاربردن این روش هزینهساز است اما بهدلیل مزایای بعدی از آن استفاده میشود.

تغییرات بازده اگزرژی بهازای تعداد مراحل چکشکاری در نمودار ۱۰ نشان داده شده است. این نتایج نشان میدهد که بازده اگزرژی نیز با افزایش تعداد مراحل چکشکاری کاهش مییابد. ضمناً افزایش انرژی چکشکاری، بازده اگزرژی را نیز کاهش میدهد. این شیب کاهشی با افزایش انرژی چکشکاری، افزوده میشود. این کاهش بازده انرژی و اگزرژی با افزایش تعداد مراحل چکشکاری، مربوط به افزایش انرژی و اگزرژی مصرفشده درطی فرآیند است. همان طور که انتظار میرود بازده اگزرژی از بازده انرژی کمتر است که مربوط به تولید آنتروپی در خلال فرآیند میشود. نمودار ۱۱ اختلاف دو بازده را نشان میدهد که همان بازگشتناپذیری بیرعدشده است.

در نمودار ۱۱ نشان داده شده است که با افزایش مراحل چکشکاری، میزان تولید آنتروپی بیبعدشده کاهش مییابد، هر چند شیب کاهش اختلاف دو بازده به مرور کاسته میشود لذا میتوان انتظار داشت تعداد بارگذاری بیش از ۵هرتز چندان تغییری در میزان تنشها ایجاد نکند. همچنین افزایش انرژی چکش سبب کاهش مضاعف تولید آنتروپی میشود. ضمناً شیب کاهش تولید آنتروپی بیبعد برای انرژیهای بیشتر، بزرگتر است لذا با افزایش انرژی چکشکاری، کاهش در میزان تنشها، در تعداد بارگذاری کمتر بهوقوع میپیوندد.

رابطه ۳۴ برای محاسبه میزان کاهش تنشهای پسماند براساس بازگشتناپذیری بیبعدشده ارایه شده است:

$$\Delta \sigma = \frac{E(-11.5+I)}{5.6} \tag{WE}$$

که در آن E انرژی ناشی از چکشها است. کاهش تنشهای پسماند در اثر چکشکاری که از رابطه ۳۴ محاسبه شده، در نمودار ۱۲ نشان داده شده است.



نمودار ۹) تغییرات بازده انرژی با تعداد برخوردهای صورت گرفته



نمودار ۱۰) تغییرات بازده اگزرژی با تعداد برخوردهای صورت گرفته



**نمودار ۱۱)** تغییرات تولید آنتروپی بیبعدشده با تعداد برخوردهای صورتگرفته



**نمودار ۱۲)** کاهش تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری در اثر چکشکاری نسبت به تعداد مراحل بارگذاری محاسبهشده از رابطه ۳۴

## گرمایش با شعله موازی

تغییرات مقدار بازده انرژی، بازده اگزرژی و تولید آنتروپی بیبعدشده با گرمای شعله، در سرعتهای جوشکاری ۲/۵ و

۸میلیمتر بر ثانیه در نمودار ۱۳ نمایش داده شده است. مشاهده میشود که با افزایش گرمای شعلهها، مقدار بازده انرژی کاهش مییابد. شیب کاهشی این بازده برای سرعتهای بالاتر، مقدار بیشتری دارد. ضمناً مقدار بازده، با افزایش سرعت، بیشتر میشود. همچنین نمودار ۱۳ تغییرات مقدار بازده اگزرژی با مقدار گرمای شعله را نمایش میدهد. دیده میشود که با افزایش گرمای شعلهها، مقدار بازده اگزرژی کاهش مییابد. شیب کاهشی این بازده برای سرعتهای بالاتر، مقدار بیشتری دارد. ضمناً مقدار بازده با افزایش سرعت، بیشتر میشود. توجه شود که بازده اگزرژی در یک سرعت مشخص از جوشکاری از بازده انرژی آن کمتر است که دلیل آن تولید آنترویی است.

علاو،بر این، نمودار ۱۳ تغییرات اختلاف دو بازده انرژی و اگزرژی (یا تولید آنتروپی بیبعدشده) را در دو سرعت ۲/۵ و ۸میلیمتر بر ثانیه با گرمای شعله نشان میدهد. این اختلاف که ناشی از بازگشتناپذیریهای ایجادشده در خلال جوشکاری است، در واقع نمایشی از میزان تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری است. نتایج نشان میدهد با افزایش گرمای شعله، تنشهای پسماند ایجادشده در قطعه کاهش مییابد. ضمناً این نمودار نشان میدهد که با افزایش گرمای شعلهها، شیب کاهشی آنتروپی بیبعدشده شعلهها بر کاهش تنشهای پسماند کاسته میشود. توجه شود که با توجه به نمودار ۱۳ تأثیر گرمایش موازی در کاهش تنشهای پسماند، در سرعتهای بالاتر، بیشتر است.

تغییرات نسبت بازده اگزرژی به بازده انرژی را نسبت به تغییرات گرمای شعله را در نمودار ۱۴ نمایش داده شده است. همان طور که بیشتر در مورد معنای فیزیکی این پارامتر اشاره شد، در مناطقی که شیب افزایشیِ نمودار تندتر است، کاهش تولید آنتروپی (افزایش کیفیت جوش) از کاهش بازده انرژی بیشتر است. و لذا در آن محدوده افزایش گرمای شعلهها میتواند مقرون بهصرفه باشد.

مطابق نمودار ۱۱، محدوده مورد بحث را میتوان تا حدود ۱۸۰۰ژول بر بر ثانیه در نظر گرفت. سپس شیب نمودار در حدود ۱۸۰۰ژول بر ثانیه به صفر نزدیک است که نشان از نسبت یکسان کاهش در تولید آنتروپی و بازده انرژی دارد. در این محدوده هر چند کیفیت جوش با استفاده از گرمایش موازی بالا میرود اما بازده انرژی نیز به همان نسبت کاهش مییابد و برای گرمایش بیش از ۱۰۰۰ژول بر ثانیه نمودار شیب نزولی پیدا میکند؛ به این معنا که کیفیت جوش بالا رفته (تنشهای پسماند کاهش مییابد) اما بازده انرژی بهصورت مضاعف کم میشود و این حالت مطلوب نیست. نکته قابل توجه این است که نسبت دو بازده، به سرعت فرآیند به سرعت پروسه جوشکاری نمیتواند وابسته باشد.



**نمودار ۱۳)** تغییرات مقدار بازده انرژی، بازده اگزرژی و تولید آنتروپی بیبعدشده با گرمای شعله، در سرعتهای جوشکاری ۲/۵ و ۸میلیمتر بر ثانیه



**نمودار ۱**۲) تغییرات نسبت بازده اگزرژی و انرژی با گرمای شعله، در سرعتهای جوشکاری ۲/۵ و ۸میلیمتر بر ثانیه

### جمعبندى

تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری، نقشی مهم و حیاتی را در کیفیت قطعات، استحکام و طول عمر آنها بازی میکنند. به همین منظور با رویکردی ترمودینامیکی- عددی به مطالعه این تنشها پرداخته شد. در همین راستا سه روش تنشزدایی مشتمل بر روش گرمایش با شعله موازی، ارتعاشی و چکشکاری مطالعه شد.

۱- افزایش حرارت، موجب کاهش بازده انرژی و افزایش بازده اگزرژی شده، شیب افزایشی بازده اگزرژی در حدود توان ۱۸۰۰ژول بر ثانیه به صفر نزدیک میشود.

۲- افزایش ۳ برابری سرعت جوشکاری، هر بازده انرژی و اگزرژی را تا حدود ۳ برابر افزایش میدهد.

۳- تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری با افزایش گرمایش شعله، کاهش خواهد داشت. اما با افزایش سرعت، این تنشها (و یا اختلاف دو بازده) افزایش مییابد.

۴- با توجه به نسبت بازده اگزرژی به بازده انرژی، افزایش گرمایش تا حدود توان ۱۸۰۰ژول بر ثانیه، میتواند بهصرفه باشد و برای گرماهای بیشتر از آن، میزان صرفه اقتصادی افزایش گرمایش، به

## ۱۹۸۸ مجتبی ماموریان و همکاران ـــــ

نوع كاربرد جوش مورد استفاده وابسته است.

۵- صرفه اقتصادی افزایش گرمایش، به سرعت پروسه جوشکاری وابسته نیست.

۶- ضمناً انطباق نتایج حاصله با نتایج ارایه د توسط پژوهش بیرک- سورنسن<sup>[17]</sup> و سهولت استفاده از روش ارایه شده، نشان می دهد که اختلاف دو بازده انرژی و اگزرژی و یا تولید آنتروپی بی بعد شده می تواند معیاری مناسب از تنش های پسماند ناشی از جو شکاری با شد.

۲۰ بحث در مورد اینکه کدام روش تنشها را بیشتر کاهش میدهد بهتنهایی کافی نیست بلکه میزان کاهش تنشها باید در قبال انرژی مصرفشده در نظر گرفته شود. نظر به اینکه کاهش تولید آنتروپی بیبعدشده کارآیی روشهای کاهنده تنشهای پسماند نسبت به کل اگزرژی مورد استفاده را نشان میدهد، لذا مقایسه این پارامتر برای روشهای گوناگون معیاری مناسب برای بازشناسی کارآیی روشها است. مرتبه کاهش تولید آنتروپی بیبعدشده برای روش ارتعاشی ۱۰۰/۰۰، روش چکشکاری ۱/۰ و روش شعله موازی ۱۰ است.

۸- میتوان انتظار داشت روشهای گرمایشی کارآیی بیشتری
 نسبت به روشهای مکانیکی در کاهش تنشهای پسماند دارا
 هستند.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است. **تاییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است. **تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: مجتبی ماموریان (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روششناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)؛ سیدعلی ناقدیفر (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روششناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵%)؛ منا محمدینیشابوری (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روششناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵%).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

## فهرست علايم

- A دامنه ارتعاش (m)
   A سطح مقطع فلز پرکننده در نوار جوش (m<sup>2</sup>)
  - (m<sup>2</sup>) سطح مقطع فلز پایه در نوار جوش (A<sub>2</sub>
    - (J.kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) گرمای ویژه (*C<sub>p</sub>*
    - ر d طول باند جوشکاری (m)
      - (J) انرژی E
      - (m.s<sup>-2</sup>) شتاب گرانشی **g** 
        - (J.kg<sup>-1</sup>) آنتالپی (b.kg<sup>-1</sup>)
      - **ا** بازگشتناپذیری بیبعد
    - (W.m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) ضریب هدایت حرارتی (k
      - (J.kg<sup>-1</sup>) گرمای نهان ذوب (*L*m
        - (kg.s<sup>-1</sup>) دبی جرمی (m
- (W) نرخ گرمای کل ایجاد شده در اثر قوس (W)  $\dot{m{q}}$
- (J.kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>m<sup>-3</sup>) نرخ تولید آنتروپی در واحد حجم (**S**'''<sub>gen</sub>
  - زمان (s)

t

Т	دما (K)
U	ولتاژ (V)
v	سرعت (m.s <sup>-1</sup> )
W	کار (W)
X	اگزرژی (J.kg <sup>-1</sup> )
<i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i>	مختصات
علايم يونانى	
α	نفوذ حرارتی (m²s <sup>-1</sup> )
$\varepsilon_r$	كرنش پلاستيك
ε	مدول دینامیک (Pa)
η	بازده قوس
η	بازده انرژی
η <sub>11</sub>	بازده اگزرژی
ξ	مختصات متحرک
ρ	چگالی (kg.m <sup>-3</sup> )
σ	تنش (Pa)
زيرنويسها	
0	حالت مرده
bond	نوار جوش
in, out	ورودی، خروجی
Pr	پیشگرمایش
solid	حامد

## منابع

1- Teng TL, Lin CC. Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1998;75(12):857-864.

2- Sunar M, Yilbas BS, Boran K. Thermal and stress analysis of a sheet metal in welding. Journal of Materials Processing Technology. 2006;172(1):123-129.

3- Kiyoshima S, Deng D, Ogawa K, Yanagida N, Saito K. Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint. Computational Materials Science. 2009;46(4):987-995.

4- Jiang W, Zhang Y, Woo W. Using heat sink technology to decrease residual stress in 316L stainless steel welding joint: Finite element simulation. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012;92:56-62.

5- Lin YC, Chou Cp. A new technique for reducing the residual stress induced by welding in type 304 stainless steel. Journal of Materials Processing Technology. 1995;48(1-4):693-698.

6- Barsanescu P-D, Leitoiu B, Goanta V, Cantemir D, Gherasim G. Reduction of residual stresses induced by welding in monel alloy, using parallel heat welding. International Journal Academic Research. 2011;3(1):335-339.

7- Sluzalec A. Theory of thermomechanical processes in welding. Berlin: Springer; 2005.

8- Al-Qahtani H, Yilbas BS. Entropy generation rate during laser pulse heating: Effect of laser pulse parameters on entropy generation rate. Optics and Lasers in Engineering. 2008;46(1):27-33.

9- Fallahi A, Jafarpur K, Nami MR. Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment. Scientia Iranica. 2011;18(3):398-406.

10- Hoffmann T, Baldea G, Riedel U. Thermodynamics

س تحلیل اگزرژی فرآیند جوشکاری در فولاد نرمه A36 و بررسی روشهای چکش کاری... in ship section. Copenhagen: Technical University of Denmark (DTU); 1999.

18- Carslaw HS, Jaeger JC. Conduction of heat in solids. Oxford: Oxford University Press; 1959.

19- Rosenthal D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. Welding Journal. 1941;20(5):220-234.

20- Rao D, Wang D, Chen L, Ni C. The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress. International Journal of Fatigue. 2007;29(1):192-196.

21- Jose MJ, Kumar SS, Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds. Science and Technology of Welding and Joining. 2016;21(4):243-258.

22- Hacini L, Van Lê N, Bocher P. Effect of impact energy on residual stresses induced by hammer peening of 304L plates. Journal of Materials Processing Technology. 2008;208(1-3):542-548.

23- Hanaei S. Investigation of residual stress of arc welding by finite element method [dissertation]. Semnan: Semnan University; 2009. [Persian]

24- Tahouni S. Handbook of Welding and Joints in Steel Buildings. Unknown Publisher; 2010.

25- Walker C, Waddell A, Johnston D. Vibratory stress relief-an investigation of the underlying processes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 1995;209(1):51-58. and transport properties of metal/inert-gas mixtures used for arc welding. Proceedings of the Combustion Institute. 2009;32(2):3207-3214.

11- Saleem M, Hossain MA, Mahmud S, Pop I. Entropy generation in Marangoni convection flow of heated fluid in an open ended cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011;54(21-22):4473-4484.

12- Arabi SH, Pouranvari M, Movahedi M. Influence of heat-input on mechanical behavior and phase balance of 2304 duplex stainless steel resistance spot welds. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(5):159-165. [Persian]

13- Charkhi M, Akbari D. Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes. Modares Mechanical Engineering. 2018;17(12):1-10. [Persian]

14- Fouladi S, Abbasi M, Givi M. Friction stir vibration welding and study about the effects of its parameters on microstructure and mechanical properties of Al5052 joint. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(4):217-224. [Persian]

15- Sahin AZ, Ayar T, Yilbas BS. Laser welding: the first and second law analysis. International Journal of Exergy. 2010;7(5):535-546.

16- Dong W, Lu S, Li D, Li Y. GTAW liquid pool convections and the weld shape variations under helium gas shielding. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011;54(7-8):1420-1431.

17- Birk-Sørensen M. Simulation of welding distortions