

ارزیابی شار گرمایی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی با روش گرادیان مزدوج وارون

میرمهرداد حسینی
 کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
 حسن بصیرت تبریزی*
 استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

این تحقیق به مطالعه در مورد ارزیابی شار گرمایی برحسب زمان سپری شده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی با استفاده از روش وارون پرداخته است. روش با توجه به دخیل سازی اندازه گیری های آزمایشگاهی، نزدیکی قابل توجهی به اندازه ی واقعی دارد. جهت تخمین هرچه دقیق تر شار گرمایی، فرمول تحلیلی برای تولید حرارت، اعمال تغییرات خطی ویژگی های ترموفیزیکی بر حسب دما و ملاحظات مربوط به تابع لغزش در حل به روش المان محدود سه بعدی نظر گرفته شده است. برای تخمین شار گرمایی و دمای ابزار، از روش وارون گرادیان وارون برای ارزیابی پارامترهای مجهولات استفاده شد. در تعریف تابع لغزش از تقریب نمایی سرعت دورانی ماتریس استفاده گردید و برآورد تولید شار گرمایی به واسطه ی اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک در قطعه کار با ارزیابی ضریب تقریب نمایی متناظر همراه شده است. غالباً در فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، به منظور کاهش اعوجاج و تنش پسماند، مطلوب آن است که هیچ نقطه ای از قطعه کار بالاتر از دمای ذوب را تجربه نکند. با توجه به این بحث، همزمان از گاز خنک کار دی اکسید کربن استفاده شده است. حل عددی مربوط به ارزیابی شار گرمایی با استفاده از روش وارون برای جوش اصطکاکی - اغتشاشی آلیاژ آلومینیومی A15052 با اندازه گیری های دمایی ارائه شده و پارامترهای راهبر فرآیند به دست آمده است. تاثیر حضور خنک کار بر میدان دمایی قطعه کار با استفاده از حل عددی مورد بررسی قرار گرفته است. شار گرمایی محاسبه شده دقیق ترین شار گرمایی است که شرایط دمایی اندازه گیری شده را ارضا کرده و پارامترهای مشخصه ساز فرآیند را ارائه می دهد.

واژه های کلیدی: شار گرمایی، جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، روش گرادیان مزدوج، انتقال گرمای وارون.

Heat Flux Determination of Friction Stir Welding Procedure Using Conjugate Gradient Method

M. M. Hosseini
 H. Basirat Tabrizi

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

This study implements an inverse method for obtaining heat input during the friction welding process in terms of time, with specified sequences. Using limited experimental data leads to precise evaluation of heat generation during the process. Solution accuracy was improved by integration of analytical formulation, consideration of temperature-dependent thermophysical properties and slip definition in three-dimensional finite element model. Specifically, conjugate gradient method was used as inverse method to calculate the unknown parameters. Heat generation within sliding, sticking state was obtained using friction and slip dependence of time and deducted from exponential approximation of angular velocity of matrix. Favorable situation for friction stir welding is the case that workpiece does not experience the melting temperature. Online CO₂ gas cooling flow was used to obligate the desired span of temperature. Numerical calculation of heat flux during friction stir welding of A15052-O accompanied by cooling stage was considered and inverse method was integrated to evaluate governing parameters. Effect of cooling stage in temperature distribution of workpiece was simulated numerically. Calculated unknown parameters indicate good prediction of heat flux, which satisfy the measured temperature, and characteristic parameters of the process.

Keywords: Heat flux, Friction stir welding, Conjugate gradient method, Inverse heat transfer.

۱- مقدمه

الیاسی و همکاران [۲] کیفیت اتصال آلومینیم A1100 و فولاد A441 AISI را با توجه به گرمای تولید شده مورد بررسی قرار داده اند. بررسی خواص مکانیکی اتصال فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد تحقیق واقع شده است. بررسی پارامتری این نوع از روش اتصال برای اتصال لبروی هم از نقطه نظر خواص مکانیکی برای فولاد ضدزنگ آستنیتی توسط سلطانی و همکاران انجام شده است [۳]. اما تحلیل جامع و برآورد شار گرمایی دقیق، به عنوان تعیین کننده متغیر راهبر، برای یک فرآیند واقعی در منابع کم تر به چشم می خورد. طوری که برآورد و توسعه ی آن جهت بهبود اتصالات از نقطه نظر حرارتی می تواند از احتمال وقوع عیوب بکاهد و به مطالعات قبلی جامعیت ببخشد. اهمیت این حوزه در فرآیندهای جوشکاری که مطالعات آزمایشگاهی در آن

جوشکاری کماکان یکی از مهم ترین روش های ساخت در صنعت محسوب می گردد. طی دهه های اخیر روش های جوشکاری متعددی برپایه ی روش های تجربی، روی مواد و قطعات مختلف ابداع و به کار گرفته شده اند. اولین شبیه سازی برای فرآیند، به عنوان یک کار بنیادی بر مبنای قوانین فیزیک و با استفاده از روابط ریاضی، توسط روزنتال مطرح گردید [۱]. انتقال گرما از این نظر در جوشکاری بسیار حائز اهمیت است که پارامترهای کیفیت جوش از جمله اعوجاج، عیوب و دمای پیش گرم به صورت قابل توجهی به آن بستگی دارند. کارها و مطالعات زیادی در رابطه با بررسی کیفیت اتصال با گرمای تولید شده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی مطرح شده است. به عنوان مثال

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hbasirat@aut.ac.ir

ناموفق بوده و اطلاعات دقیقی از کمیت‌های حرارتی فراهم نشده است، بیش‌تر به چشم می‌خورد. به عبارتی دیگر زمانی می‌توان برداشت صحیح و خروجی مطمئن از یک فرآیند واقعی به دست آورد که ورودی‌های شبیه‌ساز، اجزای واقعی یک فرآیند واقعی باشند و این زمانی میسر خواهد بود که استراتژی حل مسئله به‌طور وارون اتخاذ گردد. در دهه‌های اخیر به دلیل پیشرفت پردازنده‌ها و افزایش سرعت محاسبات، استفاده از روش وارون گرمایی برای شبیه‌سازی بسیاری از فرآیندها مورد استفاده قرار گرفته‌است. مطالعات و کارهای زیادی برای بهینه‌سازی و ارزیابی مسائل حرارتی با استفاده از روش وارون انجام گرفته‌است [۴-۶]. بدست آوردن خروجی صحیح با استفاده از پارامترهای اندک برای یک فرآیند در زمان محاسباتی کم می‌تواند گامی بزرگ در اتوماسیون صنعت محسوب شود. در این بین روش گرادیان مزدوج از سرعت همگرایی خوبی نسبت به الگوریتم‌های دیگر برخوردار بوده و حس فیزیکی مطلوب‌تری نسبت به پدیده‌های حرارتی ارائه می‌دهد [۴]. همراه شدن اختلاط مکانیکی با ایجاد گرمای آدیباتیک در داخل ماده موجب نرم شدن ماده‌ی تحت تنش قرار گرفته که بدون تغییر فاز و انجام واکنش ذوب می‌گردد. با علم بر این فعل و انفعالات، می‌توان فرآیند جوشکاری را بر مسئله‌ی رسانش گرمایی وارون منطبق دانست. پیاده‌سازی روش وارون برای این فرآیند با در نظر گرفتن مسئله‌ی انتقال گرمای رسانشی سه بعدی و با اندازه‌گیری در مختصات مختلف از صفحه‌ی به‌کار رفته انجام می‌گیرد. بدست آوردن حرارت تولیدی حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی در دهه‌های اخیر مورد استقبال بسیاری از محققین قرار گرفته‌است. راسل و شرکلیف [۷]، خاندکار و همکاران [۸] ارزیابی حرارتی فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی را با استفاده از روش المان محدود برای هندسه‌ی سه بعدی قطعه‌کار انجام داده‌اند. مالکیان و همکارانش [۹] روش وارون را با روش‌های دیگر محاسباتی و تجربی به صورت اجمالی برای یک فرآیند جوشکاری اغتشاشی ساده مورد مقایسه قرار داده‌اند. در رابطه با کارهای انجام شده به روش وارون در حوزه ساخت و تولید، می‌توان برآورد شار حرارتی به روش وارون در فرآیند سنگ‌زنی توسط گارسیا و همکاران را ذکر کرد [۱۰]. در رابطه با پیشینه‌ی استفاده‌ی روش‌های وارون در جوشکاری نیز می‌توان به بررسی معکوس ریزساختاری آلیاژ آلومینیم حین جوشکاری GTA^۱ اشاره کرد [۱۱]. با توجه به ویژگی‌های آلومینیم و جوش‌پذیری آن طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، بررسی جوشکاری آلیاژهای آلومینیم، از جمله آلیاژ ۵۰۵۲ آلومینیم، به یکدیگر و با دیگر فلزات در دستور کار بسیاری از محققین قرار گرفته است. دولتخواه و همکارانش تاثیر پارامترهای جوشکاری آلیاژ ۵۰۵۲ را با کلسیم کاربرد در ابعاد بسیار ریز و از نقطه نظر کامپوزیتی سنجیده‌اند [۱۲]. در بسیاری از تحقیقات و مطالعات تحلیلی انجام‌گرفته، تابع لغزش (δ) و سهم حرارت تولیدی به-واسطه‌ی تغییر شکل پلاستیک ساده‌سازی شده و صفر در نظر گرفته شده‌است. الگوی حل در نظر گرفته شده با لحاظ تابع هوی‌ساید^۲ لحظه‌ی شروع را برای لغزش محاسبه کرده و با تابع تقریب نمائی برای سرعت دورانی ماتریس، بهترین ضریب تقریب را برای آن ارزیابی و شار گرمایی به دست آمده را ارائه می‌دهد. محاسبه‌ی لحظه‌ی شروع لغزش با مقایسه‌ی مقادیر تنش برشی اصطکاکی و تنش برشی تسلیم هر

نود(گره) با توجه به بستگی دمایی تنش تسلیم به دما صورت می‌پذیرد. روش گرادیان مزدوج برای ارزیابی پارامتر و ضرایب مجهول با در نظر گرفتن فرمول تحلیلی مورد استفاده قرار گرفته‌است. این روش در طبقه‌بندی روش‌های وارون می‌گنجد و برای به دست آوردن ضرایب مجهول توابع معلوم از سرعت همگرایی بالایی برخوردار است. روش وارون مجهولات مربوط به فرمول تحلیلی را تعیین می‌کند. مجهولات مسئله نیروی عمودی، ضریب انتقال گرمای جابجایی و ضریب جانسون-کوک (برای مواردی که تغییر شکل پلاستیک انجام گیرد) میانگین برای فرآیند جوشکاری مورد نظر می‌باشد [۱۳]. تغییرات تنش برشی تسلیم بر حسب دما در بازه‌های مختلف دمایی در نظر گرفته شده و مقدار آن با تنش برشی ناشی از اصطکاک که تابعی از نیروی وارده و ضریب اصطکاک می‌باشد، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. دشواری ارزیابی نیروی عمودی در دخیل کردن آن در تعریف لحظه‌ی شروع تغییر شکل پلاستیک است. با ارزیابی نیروی عمودی، مقایسه‌ی تنش برشی اصطکاکی و تنش برشی تسلیم نیز تحت تاثیر قرار گرفته و لحظه‌ی شروع تغییر شکل پلاستیک دستخوش تغییر می‌گردد. با ارزیابی گردشی پارامترهای مذکور به روش گرادیان مزدوج، مدل المان محدود سه بعدی تبیین و شبیه‌سازی برای رسیدن به بهترین جواب برای هر گردش محاسباتی تکرار می‌گردد. طی عملیات جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، سیلندر دوار با سرعت ثابت، بدون تغییر جرم و هدرفت ماده‌ی به کاررفته در آن، روی صفحه به طور عمود می‌چرخد. این روش بیش‌تر برای اتصالات لبه‌ای به کار گرفته شده و با سرعتی ثابت، فاصله‌ی محوری را طی می‌نماید. گرمای اصطکاکی حاصل از تماس قطعه‌کار و پوشش ابزار باعث کامل شدن فرآیند جوش و اتصال فاصله مورد نظر می‌شود. در این تحقیق، ابتدا تعریف مسئله و تبیین معادلات راهبر در این زمینه و سپس معرفی تئوری، و نحوه‌ی استخراج توابع معلوم و ضرایب مجهول پرداخته خواهد شد. سپس نتایج به دست آمده به روش معکوس و اختلاف آن با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ارائه و در پایان نتیجه‌گیری کلی مطرح شده‌است.

۲- مدل گرمایی

برای مدل‌سازی حرارتی فرآیند انتقال گرمای رسانشی برای جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی در نظر گرفته شده‌است. با وجود اینکه پذیرفتن شبیه‌سازی این فرآیند در صنعت هنوز با محدودیت‌هایی مواجه است و به دلیل تبعیت این فرآیند از چندین پدیده‌ی فیزیکی غیرخطی گاهی از نقطه نظر درک شهودی با ناهمواری‌هایی همراه است که شبیه‌سازی آن را با مشکلاتی روبرو نموده است. شرایطی که بتواند مدل هماهنگی را فراهم آورد تا پارامترهای ورودی فرآیند واقعی را به خروجی‌هایی مثل میدان دمایی، شار گرمایی اعمال شده، شار جرمی سیال در حوضچه‌ی جوش و شرایط پایداری منتج سازد، یک شبیه‌سازی موفق تلقی می‌شود. با توجه به این موضوع، منظور کردن جملات غیرخطی مانند انتقال گرمای تابشی و خواص فیزیکی متغیر با دما از دشواری‌های حل محسوب می‌شود. با این وجود شرایط انتقال گرمای رسانشی برای قطعه‌کار و حرارت مبادله شده‌ی آن با محیط به دوصورت تابشی و جابجایی در نظر گرفته شده‌است. با توجه به اینکه ضخامت قطعه‌کار ۳ میلی‌متر بوده‌است مسئله‌ی دوبعدی رسانشی برای یک منبع

¹ GTA Welding

² Heaviside Function

گرمایی متحرک در حل مستقیم الگوریتم در دستور کار قرار گرفته است. شکل ۱ نشان دهنده هندسه قطعه کار و بخش بندی حرارتی برای سطح ابزار دوار است. در راستای طرح مسئله ی وارون حرارتی برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی خطی، مهم ترین مکان های هندسی روی قطعه کار خطوط جوشکاری و اندازه گیری تعریف شده اند. خط جوشکاری جهت صحنه گذاری کیفیت دمایی مرکز جوش و ارائه ی اختلاف آن با دمایی ۹۵٪ دمایی ذوب قطعه کار و خط اندازه گیری جهت نشان دادن اختلاف اندازه گیری شده و دماهای محاسبه شده با شارحرارتی محاسبه شده، حائز اهمیت هستند. با مقایسه ی میدان دمایی در راستای خط جوش ملزومات و مقدمات جهت بهینه سازی، در راستای خط اندازه گیری، کمینه سازی حل انجام می پذیرد. برای شبیه سازی نهایی المان محدود سه بعدی برای قطعه کار با ضخامت کم در نظر گرفته شده است. این روش به واسطه ی ایجاد مدل در محیط Solidworks به صورت فرمت STL^۱ در کد نوشته شده در MATLAB وارد شده و شرایط مرزی و تعریف مش روی آن در این محیط انجام گرفته است. شرایط مرزی حرارتی برای سطوح مشترک ابزار و قطعه کار برای مدل المان محدود سه بعدی نامعلوم و با استفاده از الگوریتم وارون به دست می آید. لازم به ذکر است با توجه به ثبت دمایی در سطح بالایی و ضخامت کم قطعه کار، به کار بردن مدل المان محدود دو بعدی در سرعت محاسبات به روش معکوس را سرعت خواهد بخشید. ولی با اتخاذ تراکم مش کم تر در راستای ضخامت، نهایتاً حل مستقیم به واسطه ی المان محدود سه بعدی مدنظر قرار گرفته تا به حل نهایی جامعیت بیشتری ببخشد.

ضریب جابجایی طبیعی برای صفحه ی افقی، k رسانایی گرمایی c ویژه و ρ چگالی قطعه کار می باشد. در رابطه ی (۱) q_{gen} تابع تولید حرارت سطحی توسط ابزار دوار روی قطعه کار بوده که به پارامترهای مکانی و زمان بستگی دارد. تعریف و حدس اولیه ی این متغیر با استفاده از فرمول تحلیلی ارائه شده توسط اشمیت و همکاران^۲ [۱۴] تبیین شده است. در معادله ی (۲) $T_{\infty} = 298K$ و شرایط اولیه برای قطعه کار $T(x, y, 0) = 293K$ می باشد.

$$k(T) \frac{dT}{dn} \Big|_{face} = h(T_{\infty} - T|_{face}) \quad (2)$$

۲-۲- خواص ترموفیزیکی

خواص ترموفیزیکی A15052 برای مقادیر مختلف دمایی به صورت جدول ۱ ارائه شده است [۱۵]. برای افزایش پایداری حل و سرعت همگرایی تغییرات ضریب رسانش حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب دما به صورت خطی در نظر گرفته شده است. رابطه ی (۳) نشان دهنده ی تقریب خطی برای ضرایب رسانش و ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب دماست.

$$k(T) = C_1 T + C_2 \quad (3-f)$$

$$C_p(T) = C'_1 T + C'_2 \quad (3-b)$$

مقادیر C_1, C_2, C'_1, C'_2 با توجه به بازه های مختلف دمایی متغیر است. جدول ۲ نشان دهنده ی مقادیر ضرایب مذکور در بازه های مختلف دمایی است. مش مکانی قطعه کار ۱۶۰ در ۲۵۰ و مش زمانی ۸۰ منظور شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی A15052 در دماهای مختلف [۱۵]

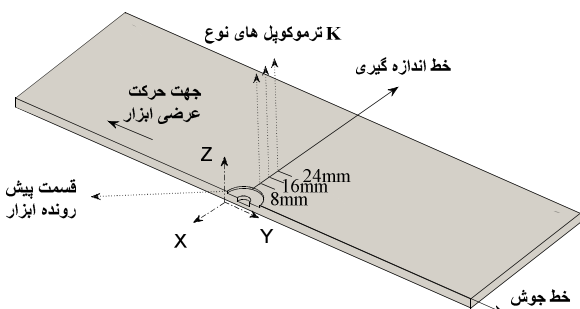
| T (°C) | $k(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})$ | $\rho(\frac{kg}{m^3})$ | $C_p(\frac{J}{kg \cdot ^\circ C})$ |
|--------|-----------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| ۲۴ | ۱۵۰ | ۲۶۸۰ | ۹۰۰ |
| ۱۴۹ | ۱۶۲ | ۲۶۸۰ | ۱۰۰۰ |
| ۲۶۰ | ۲۰۰ | ۲۶۸۰ | ۱۱۲۵ |
| ۳۷۱ | ۲۲۰ | ۲۶۸۰ | ۱۲۰۰ |

جدول ۲- ضرایب تقریب خطی خواص ترموفیزیکی A15052-O برای بازه های مختلف دمایی

| بازه دمایی | C'_2 | C'_1 | C_2 | C_1 |
|------------|--------|--------|--------|-------|
| ۲۴-۱۴۹ | ۸۸/۸ | ۰/۸ | ۱۴۶/۷ | ۰/۰۹۶ |
| ۱۴۹-۲۶۰ | ۸۳۲/۲ | ۱/۱۲۶ | ۱۱۱ | ۰/۳۴۲ |
| ۲۶۰-۳۷۱ | ۸۷۴/۴ | ۰/۶۷۵ | ۱۵۳/۱۶ | ۰/۱۱۸ |
| ۳۷۱-۶۰۷ | ۹۹۹/۵ | ۰/۵۴ | ۱۷۲/۲۴ | ۰/۱۲۷ |

۳- پیاده سازی روش گرادیان مزدوج

در تبیین الگوریتم وارون به روش گرادیان مزدوج از تعریف سرعت دورانی جدیدی بهره برده شده است. واردن کردن این فرض و لحاظ



شکل ۱- سمت پیش رونده ابزار و قطعه کار تحت جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی خطی و اندازه گیری های انجام گرفته

۲-۱- معادلات راهبر

معادله ی راهبر برای قطعه کار، معادله ی رسانشی انتقال گرمایی سه بعدی بوده که در آن خواص ترموفیزیکی به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده است.

$$k(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k(T) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_{gen} = \rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

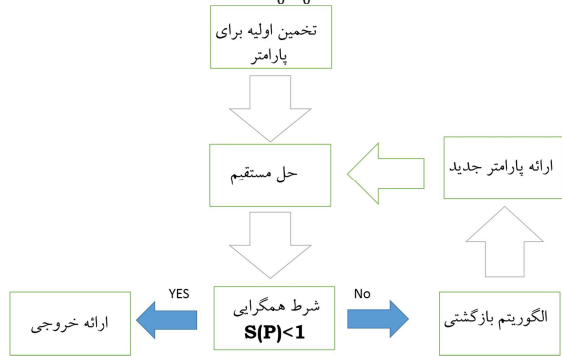
رابطه ی (۱) برای سطح آزاد و درگیر با ابزار صادق است. x, y, z مختصات و فاصله ی طولی و عرضی هرگره در مختصات اصلی است. h

² Schmidt et al.

¹ Stereolithography (STL)

δ_0 مقدار آزمایشگاهی (برابر با واحد در نظر گرفته شده)، ω_0 سرعت دورانی مرجع برای آزمایش انجام گرفته (۷۰۰ دور بر دقیقه) و T_0 شعاع شانه‌ی ابزار می‌باشند. با توجه به رابطه‌ی (۶) بدیهی‌ست مقدار لغزش برای زمان‌های کم‌تر از t_r صفر و بعد از آن به‌طور نمایی به مقدار واحد میل می‌کند. ضریب اصطکاک نیز به صورت رابطه‌ی (۷) قابل تعریف است [۱۸]:

$$\mu = \mu_0(\omega_{rel}/\omega_0) \cdot \exp(-\delta(t) \cdot \frac{\omega_{matrix} \cdot r}{r_0 \omega_0}) \quad (7)$$



شکل ۲- فلوجارت حل وارون

در رابطه‌ی (۷) ω_{rel} سرعت دورانی نسبی و با تفاضل سرعت دورانی ماتریس و ابزار برابر است. μ_0 ضریب اصطکاک آلومینیم و فولاد و ۰.۳ در نظر گرفته شده‌است. تنش برشی تسلیم از معادله‌ی جانسون-کوک به دست می‌آید [۱۹].

$$q_{gen} = \bar{P}\eta \cdot \mu (1 - \delta(t)) (r\omega_{tool} - U \sin\theta) + \bar{\xi} \cdot \delta \cdot \left[- \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^{1.54} \right] (r\omega_{tool} - U \sin\theta) \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸) $\bar{\xi}$ ضریب موثر میانگین معادله‌ی جانسون-کوک که تابعی از نرخ کرنش و کرنش پلاستیک است.

حاصل ضرب فشار عمودی در بازده ($\bar{P}\eta$)، ضریب جانسون-کوک موثر ($\bar{\xi}$) در رابطه‌ی (۲) و ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) مجهولات مسئله خواهند بود.

در حضور خنک‌کار ضریب انتقال گرمایی جابجایی سردساز نیز وارد محاسبات شده و به عنوان مجهول مسئله مطرح خواهد شد. اعمال تاثیر خنک‌کاری با در نظر گرفتن سطح موثر برخورد سیال خنک‌کاری و سرعت عرضی نازل همراه بوده‌است. نازل به اسپیندل حامل ابزار پیوست شده و با فاصله‌ی ۲ سانتی‌متری از ابزار، خط جوش را با سرعت برابر با سرعت عرضی ابزار خنک‌کاری می‌کند. پیکربندی و طرحواره خنک‌کاری در شکل ۴ آمده‌است.

۳-۲- رابطه‌ی بازگشتی

رابطه‌ی بازگشتی برای مجهولات که با بردار X نشان داده شده با رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید [۱۷].

$$X^{k+1} = X^k - d^k \beta^k \quad (9)$$

X بردار مجهولات متشکل از اجزای $X_1 = \bar{\xi}$, $X_2 = \bar{h}$, $X_3 = \bar{P}\eta$ می‌باشد. d^k جهت تنزل و β^k ضریب گام برای گردش k ام در رابطه‌ی (۱۰) آمده‌است [۱۷].

$$d^k = -2 \left(\frac{\partial T}{\partial X} \right)^T [Y - T(X^k)] + \gamma^k d^{k-1} \quad (10-f)$$

لغزش و تاثیرپذیری آن روی نیروی مجهول عمودی به حل حرارتی این فرآیند جامعیت بخشیده‌است. طی این روش تابع حرارتی به‌صورت چندجمله‌ای از حاصل ضرب پارامترهای مجهول و توابع معلوم به دست می‌آید. تابع حساسیت با مجموع تفاضل مربعات بردار اندازه‌گیری و محاسبه برابر بوده و با S نشان داده می‌شود. نحوه‌ی تعریف توابع و استخراج پارامترهای مجهول در بخش ۳-۲ ارائه شده‌است. فلوجارت حل وارون در شکل ۲ آمده‌است.

۳-۱- استخراج پارامترهای مجهول

روش گرادیان مزدوج روشی قدرتمند و سریع برای حل معادلات خطی و غیرخطی معکوس جهت ارزیابی پارامتر است [۱۶]. طی این روش در هر دوره‌ی گردش محاسباتی اندازه‌ی گام مناسبی در راستای جهت تنزل^۱ برای کمینه‌سازی تابع هدف (حساسیت) اتخاذ می‌گردد. جهت تنزل- به‌عنوان ترکیب خطی منفی- با استفاده از محاسبات مربوط به دوره‌ی گردش متناظر با جهت تنزل دوره‌ی گردش قبل به دست می‌آید. خروجی‌های به دست آمده به روش گرادیان مزدوج به معیار توقف و نوع الگوی تنظیم بازگشتی انتخاب شده بستگی دارد. لازم به ذکر است که الگوی تنظیم بازگشتی آلیفانو در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷].

طبق فرمول ارائه شده توسط اشمیت و همکاران [۱۴] شار گرمایی تولید شده به‌واسطه‌ی اصطکاک و اغتشاش در رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود.

$$g = (1 - \delta) P \eta \mu r \omega + \delta \tau_y r \omega \quad (4)$$

δ تابع لغزش، μ ضریب اصطکاک، P فشار وارده بر سطح مشترک ابزار و قطعه‌کار و τ_y تنش تسلیم قطعه‌کار می‌باشد. دیواره‌ی جانبی ابزار با توجه به عمق فروروی ۱.۵ میلی‌متری پین در قطعه‌کار، مقدار سطح جانبی را به وجود می‌آورد که در برآورد گرمای حجمی منظور می‌شود. رابطه‌ی (۵) نشان دهنده‌ی تقریب نمایی سرعت دورانی برای جامعیت بخشیدن و پوشش دادن پدیده‌ی لغزش است.

$$\omega_{matrix}(t) = \omega_{tool}(t) (1 - \exp(-H(t - t_v) \lambda_v t)), \quad \lambda_v > 0 \quad (5)$$

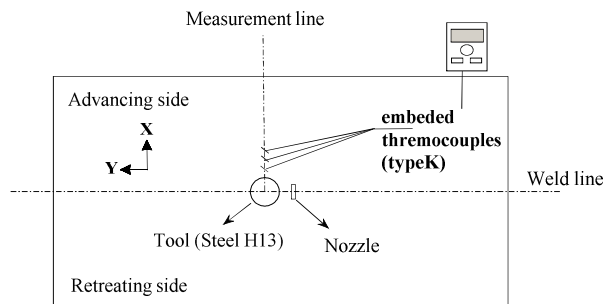
$$\delta(t, r) = 1 - \exp\left(\frac{\omega_{matrix} \cdot r}{\delta_0 \omega_0 r_0}\right) \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۵)، $H(t)$ تابع هوی‌ساید، t_v لحظه‌ی تبدیل چسبندگی به لغزش و شروع حرکت ماتریس، $\omega_{tool}(t)$ تابع ورودی سرعت دورانی ابزار است که توسط اپراتور تعیین شده و اغلب مقداری ثابت و مستقل از زمان است. λ_v ضریب تقریب نمایی سرعت دورانی برای تعریف تبدیل چسبندگی کامل به لغزش کامل است. به عبارتی دیگر تا لحظه‌ی شروع لغزش این سرعت ابزار است که در فرمول تحلیلی وارد می‌شود و سرعت ماتریس صفر است. پس از شروع لغزش سرعت ماتریس و ابزار به هم میل کرده و از این لحظه به بعد سرعت ماتریس غیرصفر و شروع به میل کردن به مقدار سرعت ابزار خواهد کرد. تابع لغزش با توجه به تعریف آرورا و همکارانش^۲ [۱۸] و رابطه‌ی (۵) به‌صورت رابطه‌ی (۶) بازنویسی شده- است:

$$\delta(t, r) = 1 - \exp\left(\frac{\omega_{matrix} \cdot r}{\delta_0 \omega_0 r_0}\right) \quad (6)$$

¹ Direction of descent

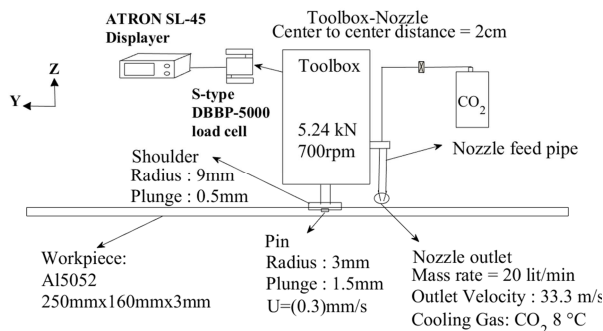
² Arora



شکل ۳- نحوه‌ی اندازه‌گیری دمایی حین آزمایش (موقعیت قطعه‌کار در شکل منطبق بر موقعیت آن در شروع آزمایش است)

۴-۲- پیکربندی و نحوه خنک‌کاری

خنک‌کاری قطعه‌کار حین جوشکاری و همزمان و به دنبال انجام اتصال انجام می‌گیرد. نازل به ابزار جوشکاری مقید شده و با سرعت عرضی برابر و به فاصله دو سانتی متر به پیروی از آن خط جوش را جاروب می‌کند. سیال خنک‌کار گاز دی اکسید کربن بوده که ارتفاع ۳ سانتی‌متری از سطح بالایی قطعه‌کار بر روی آن برخورد می‌کند. دمای سیال در دهانه نازل ۸ درجه‌ی سلسیوس در نظر گرفته شده و با سرعت ۳۳.۳ متر بر ثانیه از آن خارج می‌شود. شکل ۴ شمای کلی پیکربندی خنک‌کاری را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نحوه‌ی سنجش نیرو و پیکربندی خنک‌کاری فرآیند به طور آزمایشگاهی

۴-۳- نتایج عددی به روش وارون

در این بخش ابتدا به آنالیز خطا و همگرایی مسئله پرداخته می‌شود. تغییرات خروجی (T) نسبت به ورودی را می‌توان با تعریف تغییرات تابع حساسیت بر حسب تعداد گردش محاسباتی نیز بیان کرد. شکل ۵ نشان دهنده‌ی نزول تابع حساسیت یا هدف و کاهش آن با تغییر تعداد گردش محاسباتی است. تحلیل حساسیت برای مقادیر مختلف μ برای استخراج بهترین مقدار انجام گرفته‌است.

$$\beta^k = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^l \left[\left(\frac{\partial T_{im}}{\partial X^k} \right)^T d^k \right] [T_{im}(X^k) - Y_{im}]}{\sum_{i=1}^l \left[\left(\frac{\partial T_i}{\partial X^k} \right)^T d^k \right]^2} \quad (10-b)$$

در رابطه‌ی (۱۰-الف) T ماتریس دمایی ارزیابی شده، Y ماتریس دمایی اندازه‌گیری شده، γ^k ضریب مزدوج بوده که با استفاده از رابطه‌ی فلچر-ریوز^۱ به دست می‌آید [۱۷]. در رابطه‌ی (۱۰-ب) l تعداد اندازه‌گیری‌ها در زمان و M تعداد ترموکوپل‌ها می‌باشد. معیار توقف محاسبات با دقت اندازه‌گیری و تعداد کل اندازه‌گیری‌ها و تعریف تابع هدف یا حساسیت^۲ (مجموع مربعات تفاضل اندازه‌گیری‌ها و ارزیابی‌ها) تبیین می‌شود. لذا با هدف‌گیری خروجی آزمایشگاهی توسط الگوریتم گرادیان مزدوج، نتایج عددی نیز به شرایط آزمایشگاهی نزدیک‌تر شده و نارسایی‌های مطالعاتی مانند تحلیل گرمایی ییلباس و شاهین^۳ [۲۰] را برطرف خواهد کرد.

۴- اندازه‌گیری‌ها و نتایج عددی

نتایج با مقایسه‌ی اندازه‌گیری‌های دمایی در انتهای هر گردش محاسباتی جهت نبل به دقیق‌ترین شار گرمایی انجام می‌پذیرد. این قیاس برای آخرین گردش محاسباتی (۴۰ امین گردش) و جواب نهایی در این بخش مطرح شده‌است.

۴-۱- نحوه انجام آزمایش، اندازه‌گیری دمایی

ابزار مورد استفاده از جنس فولاد H13 با شعاع شانه‌ی ۹ میلی‌متر و شعاع پین ۳ میلی‌متر بوده‌است. در ابتدا ابزار در مرکز تقاطع خط جوش و خط اندازه‌گیری مطابق شکل ۱ (مرکز قطعه‌کار) قرار داشته و با سرعت ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه شروع به حرکت در راستای خط جوش می‌کند. دماسنج‌های ترموکوپل نوع K با استفاده از چسب سیلیکون و در عمق بسیار کمی از شیارهای ایجاد شده در راستای خط اندازه‌گیری و به فواصل ۸، ۱۶، ۲۴ میلی‌متر از ابزار قرار گرفته‌اند. دماهای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌های تیپ K با استفاده از ترمومتر لوترون تی ام - ۴۹۶ در لحظه‌های متناظر ثبت گردیده‌است. شکل ۳ نشان دهنده‌ی شمای اندازه‌گیری دمای قطعه‌کار حین آزمایش است. عمق فروروی یا ارتفاع پین ۱.۵ میلی‌متر و ابزار با سرعت عرضی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه به مدت ۲۰۰ ثانیه عمل جوشکاری را انجام می‌دهد. سرعت دورانی ابزار ثابت و ۷۰۰ دور بر دقیقه و نیروی عمودی اندازه‌گیری شده ۵.۲۴ کیلو نیوتن بوده‌است. نیروی عمودی با استفاده از نیروسنج نوع S اندازه‌گیری شده و توسط نمایش‌گر آترون اس ال - ۴۵ ثبت گردیده است. شبیه‌سازی حرارتی و بررسی معکوس آزمایش با حضور خنک‌کار دی اکسید کربن نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. دبی سیال خنک‌کار ۲۰ لیتر بر دقیقه (سرعت در دهانه‌ی نازل ۳۳.۳ متر بر ثانیه) و ابعاد دهانه‌ی نازل ۱ در ۱۰ میلی‌متر، فاصله‌ی عمودی دهانه‌ی نازل تا قطعه کار ۳ میلی‌متر و سیال خنک‌کار گاز دی اکسید کربن با دمای ۸ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده‌است. اندازه‌گیری‌های دمایی برای دو حالت مختلف با خنک‌کار و در غیاب خنک‌کار گزارش شده‌است.

¹ Fletcher-Reeves

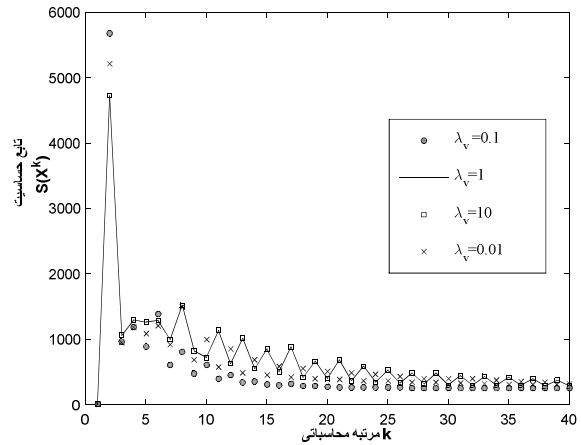
² Sensitivity

³ Yilbas and Shahin

⁴ Lutron TM-496

⁵ Atron SI-45

مقایسه‌ی نیروی عمودی اندازه‌گیری شده و نیروی به دست آمده نشان- دهنده‌ی بازده ۹۱٪ تبدیل نیروی مکانیکی به گرماست. اگر بازده ۱۰۰٪ برای نیروی اعمالی در نظر گرفته شود مقدار نیروی به دست آمده به روش وارون ۴/۷۶ کیلو نیوتن ارزیابی می‌گردد. شکل ۶ کاهش ۹۰ درصدی دمای گزارش شده در آزمایش‌ها برای نزدیک‌ترین ترموکوپل در حالت خنک‌کاری آنلاین در قیاس با جوشکاری معمولی را تصدیق می‌کند. این صحنه‌گذاری دیگری در مورد برآورد صحیح میدان دمایی برای دو حالت جوشکاری در حضور و بدون خنک‌کار است. برای پوشش دقت اندازه‌گیری و صحنه‌گذاری نهایی جواب به دست آمده، شکل ۷ ارائه شده است.



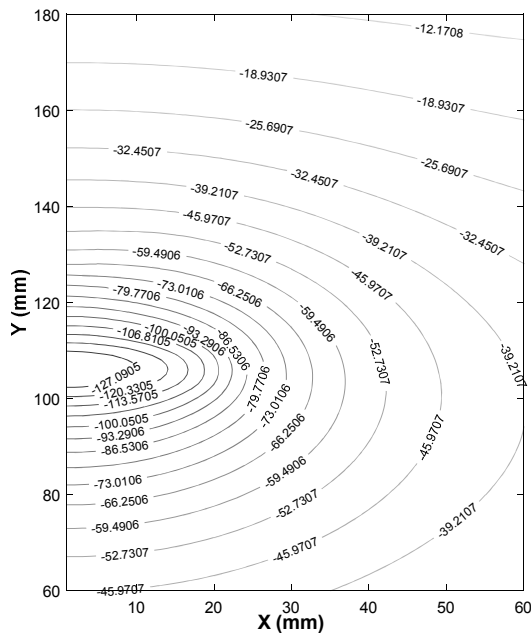
شکل ۵- آنالیز حساسیت برای مقادیر مختلف λ_v

با توجه به اینکه سرعت همگرایی برای $\lambda_v = 0.1$ بیش‌تر از مقادیر دیگر می‌باشد، این مقدار برای افزایش سرعت محاسباتی در نظر گرفته شده‌است. این حساسیت سنجی با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی برای آزمایش بدون خنک‌کار برای ۴۰ گردش محاسباتی انجام گرفته است. سیر نمایی ناشی از تقریب نمایی تابع لغزش بوده و در محاسبات الگوریتم وارون به این صورت نمایان شده‌است. شارحرارتی فرآیند جوشکاری مذکور با پارامترهای مجهول بر حسب گردش محاسباتی در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۳ مقدار ضریب جانسون-کوک میانگین برای فرآیند جوشکاری با خنک‌کار کم‌تر ارزیابی شده‌است. دلیل این امر کاهش درجه‌ی حرارت و وقوع تغییرشکل پلاستیک در وقفه‌های زمانی کم‌تر است. مقدار ضریب میانگین جانسون-کوک ارزیابی شده در قیاس با فرآیندهای معمولی برای آلیاژ آلومینیوم کم‌تر بوده ولی نزدیکی قابل توجهی را داراست. پایین بودن نسبت پیچ و نسبت سرعت عرضی به زاویه‌ای ابزار (v/ω) و نرم بودن آلیاژ آنیل شده می‌تواند توجیه این امر باشد [۲۱]. شکل ۶ نشان دهنده‌ی اختلاف دمای سطح بالایی قطعه‌کار برای دو حالت جوشکاری با خنک‌کار و بدون آن در ثانیه ۲۰۰ ام (پایان جوشکاری) است. تاثیر ایجاد چاله حرارتی (خنک‌کاری) در کاهش دما در این شکل مشهود بوده و حضور خنک‌کار باعث کم شدن سرعت کاهش تنش برشی تسلیم و پایین آوردن حداکثر دمای قطعه‌کار شده که این خود ایجاد کرنش پلاستیک را تا حدی به تعویق می‌اندازد.

جدول ۳- ضرایب مجهول به دست آمده برای گردش‌های محاسباتی

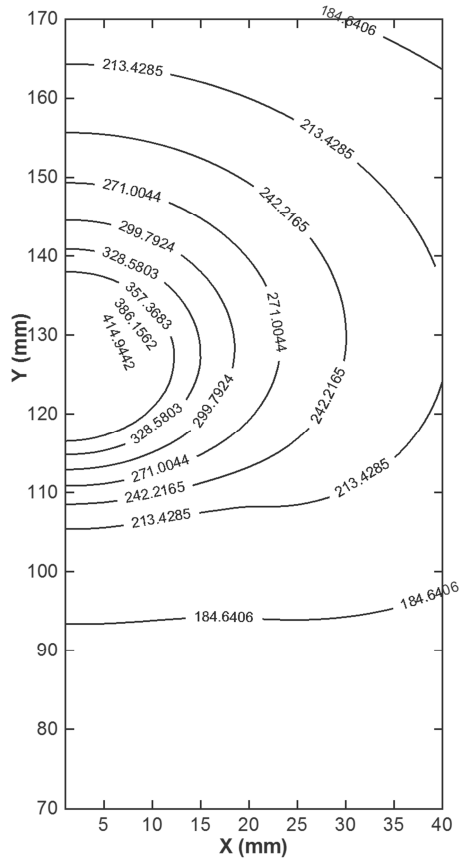
مختلف

| گردش محاسباتی (k) | $\bar{h}_{cool} (\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})$ | $h (\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})$ | $\bar{\xi}$ | $\bar{P}\eta (\frac{kN}{m^2}) \times 10^{-3}$ |
|-----------------------|---|------------------------------------|-------------|---|
| ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱۰ |
| ۵ | -۱۰۳/۲ | ۱۸/۸۲۳ | ۲۲/۱ | ۴۱/۴۷۶ |
| ۱۰ | ۲۳۳۰/۲ | ۳۷/۱۷ | ۲۳/۴۷ | ۵۱/۷۸ |
| ۱۵ | ۳۴۵۵/۱ | ۴۰/۸۹ | ۴۳/۳ | ۱۶/۹۲ |
| ۲۰ | ۲۳۲۶/۱ | ۳۱/۷۲ | ۳۰/۸۵ | ۱۷/۲۳ |
| ۲۵ | ۲۱۴۸/۱ | ۳۹/۹۴ | ۳۳/۲۴ | ۱۷/۳۳ |
| ۳۰ | ۱۹۸۸/۳ | ۲۸/۲۲ | ۳۲/۹۳ | ۱۸/۱۹ |
| ۳۵ | ۱۹۷۱/۲ | ۲۷/۶۳ | ۳۳/۶۴ | ۱۸/۳۶ |
| ۴۰ | ۱۹۶۶/۸ | ۲۷/۲۵ | ۳۳/۲۴ | ۱۸/۸۲ |



شکل ۶- تاثیر حضور خنک‌کار روی میدان دمایی سطح بالایی (سمت پیش‌رونده) قطعه‌کار در ثانیه ۲۰۰ام برای دو حالت مختلف جوشکاری (با حضور خنک‌کار و بدون آن)

شکل ۷ مقایسه‌ی دماهای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها و دماهای ارزیابی شده به روش گرادیان مزدوج در فواصل ۸، ۱۶، ۲۴ میلی‌متر از خط جوش ($x=0.08$)، روی خط اندازه‌گیری ($y=0$) و ارزیابی دمای خط جوش (دمای حداکثر) را نشان می‌دهد. در این شکل دمای نقطه‌ی تلاقی خط جوش و خط اندازه‌گیری با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری دمایی حین فرآیند ممکن نیست. این روش مقدار دمای بیشینه قطعه کار را به‌عنوان یکی از خروجی‌های اصلی مسئله ارائه می‌کند. لازم به ذکر است که دمای حداکثر قطعه‌کار با استفاده از روش‌های تجربی غیرقابل انجام بوده و استفاده از روش‌های وارون تنها روش ارائه دمای بیشینه برای پدیده‌های حرارتی از این قبیل است.

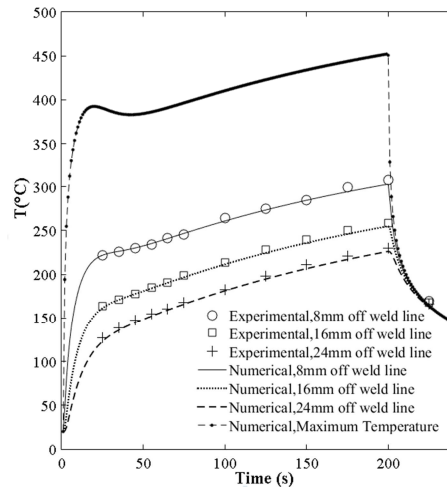


شکل ۸- میدان دمایی قطعه کار در ثانیه ۲۰۰ ام برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی در حضور خنک کار

۵- نتیجه گیری

در فرآیندهای جوشکاری توزیع دمایی به طور مستقیم و رخدادهای ترمومکانیکی، ویژگی‌های ترموفیزیکی به طور غیرمستقیم با شار گرمایی مرتبط هستند. روش گرادیان مزدوج به عنوان روش وارون خروجی شار گرمایی را ارائه داده و مدل المان محدود سه بعدی با استفاده از مقدار به دست آمده طی به کارگیری الگوریتم وارون در هر گردش محاسباتی پیاده سازی شده است. در این مطالعه با استفاده از اندازه گیری‌های دمایی ثبت شده در نقاط مختلف از خط جوش به عنوان ورودی و معیار قرار دادن آن‌ها، برآورد شار گرمایی دقیق در لبه‌ی پیش‌رونده‌ی ابزار حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی با استفاده از وارون گرادیان مزدوج روش انجام گردید. دیگر اینکه ارزیابی ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز در تخمین توزیع دمایی در قطعه کار بسیار حائز اهمیت بوده که محاسبه‌ی آن در روش به کار گرفته شده منظور شده است. به کارگیری این روش برای آزمایش مذکور دارای خروجی قابل قبولی است و شبیه‌سازی ارائه شده با توجه به شرکت دادن اندازه گیری‌های دمایی به واسطه‌ی روش وارون نزدیک‌ترین خروجی را به واقعیت ارائه داده که این در برآورد خطای به دست آمده مشهود است. از مهم‌ترین دستاوردهای کلی این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- الگویی که روش انتقال گرمای وارون ارائه داده است با در نظر گرفتن اندازه‌گیری‌های تجربی رخدادهایی مانند توزیع دمایی بوده و با معیار قراردادن این داده‌ها شرایط فرآیند



شکل ۷- مقایسه‌ی پروفیل دمایی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در تلاقی خطوط اندازه‌گیری و خطوط موازی با خط جوش با فاصله‌ی ۸، ۱۶، ۲۴ میلی‌متر (با خنک کاری)

میدان دمایی ارزیابی شده با استفاده از روش وارون، با توجه به مختصات صفحه‌ای، برای لایه‌ی بالایی قطعه کار در شکل ۸ آمده است. در شکل ۸ انحنای به وجود آمده، نشان دهنده‌ی تاثیرپذیری توزیع دمایی از شارحرارتی ایجاد شده در لبه‌ی پیش‌رونده‌ی نازل خنک‌کار است. حضور خنک‌کار باعث کاهش حداکثر دمای قطعه کار شده، به طوری که اختلاف حداکثر دماهای قطعه کار در دو حالت جوشکاری در حضور و بدون خنک کار، ۹۸ درجه‌ی سلسیوس محاسبه شده است. این از نظر افزایش شارحرارتی تغییر شکل پلاستیک، با توجه به تاثیرپذیری عکس آن از دما، برای مواردی مطلوب خواهد بود. استفاده از نازل از نظر محدود کردن دمای ماکزیمم قطعه کار به پیشانی ابزار بسیار موثر بوده و از نظر مهار نارسایی‌های ریزساختاری بسیار واقع شده است.

- واقعی را شبیه‌سازی و داده‌های دمایی را جایگزین وسایل اندازه‌گیری مکانیکی مانند کرنش‌سنج، (برای ارزیابی نرخ کرنش)، که حین فرآیند قابل اجرا نیست، قابل ارزیابی می‌نماید.
- دمای بیشینه قطعه‌کار با استفاده از روش‌های تجربی و وسایل ثبت معمولی غیرقابل ثبت است. روش وارون مقدار دمای حداکثر قطعه‌کار را حین فرآیند ارائه می‌دهد.
- حداکثر خطای گزارش شده از بین ۴۲ اندازه‌گیری ۰.۶٪ بوده و مربوط به شروع فرآیند و لحظات عبور ابزار از کنار ترموکوپل‌ها (خط اندازه‌گیری) می‌باشد. میانگین خطای اندازه‌گیری‌ها و دماهای محاسبه شده ۰.۷٪ برای ۴۰ گردش محاسباتی به دست آمده‌است.
- افزایش نیروی عمودی در به حداقل رساندن زمان لغزش بسیار موثر است. می‌توان برای نیروهای عمودی بیش‌تر از ۱۲ کیلو نیوتن برای جوشکاری آلومینیم ۵۰۵۲ لغزش را واحد در نظر گرفت.
- برآورد ضریب انتقال گرمای جابجایی نازل برای مشخصه‌سازی پارامترهای خنک‌کاری الگوی راهبری را پیشنهاد می‌دهد. با در دست داشتن مقدار موثر ضریب انتقال گرمای خنک‌کاری، اختصاص اقتصادی‌تر دبی سیال میسر خواهد بود.
- نارسایی‌های حل روش تحلیلی در مدلسازی حرارتی با به کارگیری روش وراون به طور کامل قابل حذف است.
- سهم تولید حرارت به واسطه‌ی تغییر شکل پلاستیک در قالب مدل ویسکوپلاستیک جانسون-کوک ارائه شده و همخوانی قابل قبولی برای مقادیر پیشنهادی در جوشکاری‌های اغتشاشی-اصطکاکی با پارامترهای مذکور را داراست.
- در خصوص تبیین تابع پاسخ زمانی تنش برشی تسلیم به زمان فرآیند جهت بهره‌گیری از مدل‌هایی غیر از مدل جانسون-کوک، هر قدر رفتار نمایی به رفتار خطی نزدیک‌تر می‌شود پاسخ به دست آمده پایدارتر بوده و همگرایی نیز سریع‌تر خواهد بود.

۶- تشکر و قدردانی

از زحمات و همکاری‌های آقای مهندس نیما جلیلی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بابت در اختیار گذاشتن خروجی‌های آزمایشگاهی و اطلاعات فنی پایان‌نامه‌ی ارزشمندشان بی‌نهایت سپاسگزاریم.

۷- نمادها

| | |
|-----|--|
| c | گرمای ویژه ($J \cdot Kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) |
| d | جهت تنزل |
| g | تابع تولید گرمای سطحی ($W \cdot m^{-2}$) |
| h | ضریب انتقال گرمای جابجایی ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$) |
| P | فشار ($kN \cdot m^{-2}$) |

| | |
|---------------------|--|
| J | ماتریس ژاکوبی |
| k | رسانندگی گرمایی ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$) |
| l | تعداد ثبت زمانی دما |
| m | مرتب‌هی ثبت مکانی دما |
| M | تعداد سنسور دما |
| r | فاصله‌ی شعاعی از محور دوار ابزار (m) |
| t | زمان (s) |
| T | دما، ماتریس محاسبه شده‌ی دما ($^\circ C$) |
| U | سرعت عرضی ابزار (mm/min) |
| X | پارامتر مجهول |
| Y | ماتریس اندازه‌گیری ($^\circ C$) |
| Z | ضریب جانسون-کوک موثر |
| علائم یونانی | |
| β | ضریب گام محاسباتی |
| ε | ضریب تابش |
| γ | ضریب مزدوج |
| η | بازده مکانیکی ابزار و قطعه‌کار |
| θ | زاویه‌نسبت به محور حرکت عرضی ابزار (Rad) |
| λ | ضریب تقریب نمایی سرعت دورانی ماتریس |
| δ | تابع لغزش |
| ρ | چگالی (Kg/m^3) |
| σ | ضریب استفان-بولتزمن ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-4}$) |
| τ | تنش برشی (MPa) |
| ω | سرعت دورانی ابزار ($Rad \cdot s^{-1}$) |
| بالانویس‌ها | |
| k | مرتب‌هی گردش محاسباتی |
| زیرنویس‌ها | |
| p | پلاستیک |
| t | گذرا |
| v | لغزش ماتریس |
| $Cool$ | خنک‌کاری |
| $tool$ | ابزار |
| $matrix$ | ماتریس |
| $melt$ | ذوب |
| ref | مرجع |
| y | تسلیم |

۸- مراجع

- [1] Pittner A., A contribution to the solution of the inverse heat conduction problem in welding simulation, PhD Thesis, Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung (BAM), 2012.
- [۲] الیاسی م.، آقاجانی ح.، حسین زاده م.، بررسی تاثیر حرارت تولید شده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی کیفیت اتصال آلومینوم به فولاد، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس، د. ۱۵، ش. ۴، ص ۳۷۹-۳۹۰، ۱۳۹۴.
- [3] A.Soltani, M. Shakeri, S. Norouzi, H. Jamshidi, Effect of friction stir welding parameters on mechanical properties of aluminum alloy to austenitic stainless steel lap joint,

- Mechanical Engineering Journal of Amirkabir university of Technology, Vol. 46, No. 2, pp. 13-15, 2014.
- [4] Abbas Nejad, A., Maghrebi M.J., Basirat Tabrizi H., Heng Y., Mhamdi A., Marquardt W., Optimal operation of alloy material in solidification processes with inverse heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 6, pp. 711-716, 2010.
- [5] Nguyen Q., Yang C., Inverse determination of laser power on laser welding with a given width penetration by a modified Newton–Raphson method. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 15-21, 2015.
- [6] Samadi F., Kowsary F., Sarchami A.. Estimation of heat flux imposed on the rake face of a cutting tool: a nonlinear, complex geometry inverse heat conduction case study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 2, pp. 298-303, 2012.
- [7] Shercliff H. R., Russell M. J., Taylor A., Dickerson T. L., Microstructural modelling in friction stir welding of 2000 series aluminium alloys. *Mecanique & Industries*, Vol. 6, No. 1, pp. 25-35, 2005.
- [8] Reynolds A. P., Khandkar Z., Long T., Tang W. X., Khan J., Utility of relatively simple models for understanding process parameter effects on FSW. *Materials Science Forum*, Vol. 426, pp. 2959-2964, 2003.
- [9] Maalekian M., Friction welding–critical assessment of literature, *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 12, No. 8, pp. 738-759.
- [10] García E., Méresse D., Pombo I., Harmand S., Sánchez J.A., Identification of heat partition in grinding related to process parameters, using the inverse heat flux conduction model, *Journal of Applied Thermal Engineering*, Vol. 66, pp. 122-130, 2014.
- [11] Magalhães E., Corerra E., Silva A., Silva S., Microstructural analysis in GTA aluminum alloy welding using inverse problems, *Journal of Applied Thermal Engineering*, Vol. 100, pp. 333-339, 2016.
- [12] Dolatkah A., Golbabaei P., Besharati Givi M.K., Molaiekiya F., Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing, *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 458-464, 2012.
- [13] He X., Gu F., Ball A. A review of numerical analysis of friction stir welding. *Progress in Materials Science*, Vol. 65, pp. 1-66, 2014.
- [14] Schmidt H., Hattel J., Wert J., An analytical model for the heat generation in friction stir welding. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 143-157, 2004.
- [15] Davis J.R., *ASM handbook Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. ASM International, 2009.
- [16] Ozisik M.N., *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*. CRC Press, 2000.
- [17] Arora A., Nandan R., Reynolds A.P., DebRoy T., Torque power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments. *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp. 13-16, 2009.
- [18] Al-Badour F., Merah N., Shuaib A., Bazoune A., Thermo-mechanical finite element model of friction stir welding of dissimilar alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol. 72, No. 5, pp. 607-617, 2014.