

پیش‌بینی تنش‌های پسماند و کرنش‌های الاستیک-پلاستیک در جوشکاری لیزری سوراخ کلیدی دیسک غیر همجنس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴

میلاذ آقایی عطار^{۱*}، مجید قریشی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵	شبییه‌سازی جوشکاری برای اتصال فلزات غیر همجنس به دلیل پیچیدگی‌های زیاد حین فرآیند به وسیله مدل‌سازی عددی توسعه چشمگیری یافته است. در این پژوهش فرآیند جوشکاری لیزر پیوسته دیسک جهت اتصال غیر همجنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به مس شبیه‌سازی شده است. برای این منظور مدل‌سازی جهت تخمین توزیع دما، پیش‌بینی هندسه و ابعاد سطح مقطع جوش شامل حوضچه جوش و ناحیه متأثر از حرارت با استفاده از توزیع شار حرارتی ترکیبی با کمک نرم افزار آباکوس و سابروتین نویسی دیفلاکس ^۳ با زبان فرترن پیشنهاد می‌گردد. پارامترهای خروجی اتصال جوش از جمله توزیع دما، توزیع کرنش‌های الاستیک-پلاستیک، هندسه جوش و تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار گرفتند. خروجی‌های شبیه‌سازی با مقایسه نتایج آزمایشگاهی گزارش شده سایر محققان برای سه پارامتر در سه سطح اعتبارسنجی شده است. خروجی‌های مدل منبع حرارتی پیشنهادی با مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی به خوبی تطابق داشته و دقت مدل عددی پیشنهادی را برای جوشکاری لیزری غیر همجنس نشان می‌دهد. مس به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بالاتر حین فرآیند و نیز پس از سرد شدن، حرارت بیشتری را از خود عبور داده و در نتیجه ناحیه متأثر از حرارت به دلیل پایین تر بودن دما در ناحیه مرکزی جوش، کوچکتر بوده و کرنش پلاستیک به طور میانگین در کل عرض مدل برای مس تقریباً ۶۰ درصد بیشتر از فولاد می‌باشد. پس از سرد شدن، تنش‌های پسماند طولی در ناحیه مرکزی برای هر دو جنس کششی بوده که به دلیل بالاتر بودن ضریب انبساط حرارتی فولاد نسبت به مس اندازه تنش‌ها نیز ۲۳ درصد در مرکز جوش بزرگتر هستند.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۵	
واژگان کلیدی: جوشکاری لیزر دیسک پیوسته، روش المان محدود، اتصال نامتجانس، تحلیل حرارتی-مکانیکی، توزیع دما، توزیع کرنش‌الاستیک- پلاستیک.	

۱-مقدمه

تجهیزات و هزینه‌های نگهداری، قابلیت اتوماسیون بالا و ایمنی فرآیند جوشکاری لیزر، چگالی انرژی بالا، نفوذ عمیق جوش، نسبت زیاد عمق به عرض جوش و منطقه متأثر از حرارت باریک است [۱]. از پرتو لیزر می‌توان در جوش دادن آلیاژها و سوپرآلیاژها با نقطه ذوب بالا و برای جوش دادن فلزات غیر همجنس استفاده نمود. ترکیب و اتصال فلزات غیر همجنس در صنایع پیشرفته مهندسی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. اتصال فلزات غیر همجنس فولاد

یکی از روش‌های جوشکاری که در اتصال همجنس و غیر همجنس فلزات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است روش جوشکاری پرتو لیزر می‌باشد که امروزه از روش‌های نوین و پیشرفته محسوب می‌شود. برخی از مزایای جوشکاری نقطه‌ای لیزری در مقایسه با جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی، کاهش هزینه در صنایع خاص، انعطاف پذیری بالا در اجرای فرآیند جوش، صرفه اقتصادی از لحاظ کم شدن هزینه

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: m_ghaee@email.kntu.ac.ir

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی

۲. استاد تمام، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی

³ DFLUX subroutine

زنگ نزن ۳۰۴ و مس در صنایع هسته‌ای، شیمیایی و خودرویی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. در صنعت هسته‌ای، لوله‌های مسی نیاز به اتصال به پوسته‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن در راکتورهای هسته‌ای به عنوان خنک کننده دارند. مس به دلیل هدایت حرارتی بالاتر نسبت به فولاد زنگ نزن، می‌تواند انتخاب ایده‌آلی برای مبدل‌های حرارتی نسبت به فولاد باشد. این چنین ساختارهایی با توجه به فشارهای بالا و شرایط محیطی اطراف نیاز به اتصالی کاملاً ایمن با استحکام مکانیکی بالا دارند [۳]. از آنجایی که اتصال غیر همجنس فلزات چالش‌های قابل توجهی به دلیل ایجاد حوضچه مذاب پیچیده به دلیل اختلاف در خواص فیزیکی-حرارتی مواد از جمله هدایت حرارتی و دمای نقطه مذاب در فرآیند جوشکاری دارد، بررسی و مطالعات زیادی در این زمینه را طلب می‌کند [۴]. شمس‌الهدایی و همکاران به بررسی میزان تشکیل ترکیبات بین فلزی در اتصال لیزری NiTi و فولاد زنگ نزن ۳۱۶ پرداختند. آن‌ها دریافتند علی‌رغم قابلیت جوشکاری لیزری غیر همجنس فلزات، غلظت‌های نامطلوب آلیاژهای شکل گرفته در فلز جوش می‌تواند استحکام جوش را کاهش داده و سبب ایجاد فازهای بین فلزی بیش از حد و حتی ایجاد ترک شود [۵]. تکنولوژی محاسبات رایج و روش المان محدود که براساس تکنیک‌های عددی هستند، در سال‌های اخیر به عنوان یک روش مطلوب برای پیش‌بینی پروفیل دما و هندسه جوش، کاهش آزمون و خطا و همچنین کاهش هزینه‌ها در آزمایش‌های تجربی شروع به شکل گرفتن کردند. با به کارگیری این روش می‌توان بسیاری از پدیده‌های فیزیکی مرتبط با لیزر را شبیه‌سازی کرد و اثر متغیرهای مختلف را بر این پدیده‌ها به صورت مجزا مورد بررسی قرار داد [۶]. در این زمینه از نرم افزارهای تجاری اجزای محدود استفاده می‌شود که قابلیت بالایی در شبیه‌سازی فرآیندهای واقعی صنعتی با کمترین ساده‌سازی‌ها دارند [۷]. اولین بار گلداک شبیه‌سازی جوشکاری را با استفاده از روش المان محدود به منظور مدل‌سازی شار حرارتی با توزیع بیضوی و دو بیضوی انجام داد [۸]. شبیه‌سازی بر پایه آباکوس برای درک و تحلیل فرآیند جوشکاری برای فلزات همجنس و غیر همجنس توسط محققان بسیاری در گذشته انجام گرفته است. اگر چه مطالعات بر روی شبیه‌سازی جوشکاری مس و فولاد به دلیل پیچیدگی‌های فرآیند مرتبط با خواص

فیزیکی و شرایط مرزی که بایستی در مدل با فرضیاتی همراه باشند کمتر بوده است [۳]. در شبیه‌سازی عددی جوشکاری، تنظیم پارامترهای منابع حرارتی و وارد کردن دقیق خواص هدایت حرارتی، از ضروری ترین مراحل مدل‌سازی حرارتی است که تاثیر قابل توجهی بر روی کیفیت پارامترهای خروجی محاسبه شده دارد [۹]. مگو و همکارانش [۱۰] یک مدل حرارتی المان محدود برای پیش‌بینی سیکل حرارتی گذرا در محل اتصال نامتجانس فولاد و آلومینیوم توسط جوشکاری لیزری برای سطوح مختلف انرژی وارد شده با تغییر منبع قدرت و مدت زمان را توسعه دادند. محمدپور و همکاران [۱۱] اتصال نامتجانس آلومینیوم و فولاد را با استفاده از جوشکاری لیزری دو پرتو را مورد بررسی قرار دادند. آزادخو و همکارانش [۱۲] به بررسی جوشکاری لیزری پالسی غیرهمجنس مس و فولاد زنگ نزن پرداختند. آنها مکانیزم تشکیل حوضچه جوش و میدان دمایی را بررسی کردند. پارامترهای مورد بررسی آن‌ها سرعت جوشکاری، توان لیزر، فاصله کانونی و میزان انحراف پرتو لیزر بود. بررسی آنها در نهایت بر روی گرادیان های دمایی حول حوضچه جوش و ترک‌های انجمادی ناشی از تغییر و تحولات متالورژیکی ناحیه مذاب بود. ایجاد گرادیان دمایی مناسب در حین جوشکاری نقش اساسی در کنترل بهینه ترک‌های انجمادی در حوضچه جوش دارد که در واقع با کاهش اثر هدایت حرارتی مس انجام می‌شود. میروسلاو ساهول و همکاران [۱۳] جوشکاری لیزری غیر همجنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به مس را با استفاده از لیزر دیسک انجام دادند. آنتونی مانوچی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ به مطالعه پارامتری جوشکاری لیزر Yb: YAG مس به فولاد زنگ نزن آستنیتی پرداختند. آنها به بررسی تاثیر توان لیزر، سرعت جوشکاری و آفست پرتو از درز اتصال جوش، بر روی پارامترهای ترکیب عنصری جوش، ریزساختار و خواص کششی پرداختند. گنگ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹ به تاثیر پارامترهای لیزر بر روی خواص مکانیکی و میکروساختاری اتصال غیرهمجنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و ۴۲۰ پرداختند. آن‌ها بیان کردند با افزایش سرعت جوشکاری استحکام مکانیکی کششی تا ۳۰٪ کاهش یافته و دمای نواحی اطراف حوضچه نیز تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. با کاهش دما در نمونه فریتی از ۲۵۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد تخلخل‌های ایجاد شده در ناحیه حوضچه جوش افزایش یافت.

گیری برای انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری لیزر، پیش‌بینی مناسب هندسه و ابعاد حوضچه جوش می‌باشد زیرا هندسه حوضچه جوش نقش بسیار مهمی در خواص مکانیکی اتصال جوش دارد [۱۶]. هندسه حوضچه جوش شامل عرض حوضچه در سطح بالایی، عرض حوضچه در ریشه جوش و عمق نفوذ جوش می‌باشد. علاوه بر این، نحوه توزیع حرارت، توزیع کرنش‌های الاستیک-پلاستیک و تنش‌های پسماند در جوشکاری لیزر غیر همجنس بین این دو ماده مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه مسیر کلی برای شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری لیزر و همچنین فرضیات ارائه شده است. در گام اول، روش مدل‌سازی و مش زنی با جزئیات توضیح داده شده و سپس تحلیل حرارتی جوشکاری لیزر غیرهمجنس با پارامترهای مشخص شده برای مدل منبع حرارتی پیشنهادی بیان می‌شود.

۳- گام‌های شبیه‌سازی جوشکاری لیزر

تمامی مراحل شبیه‌سازی به وسیله نرم افزار مهندسی ABAQUS 6.14.2، براساس روش المان محدود و با استفاده از سابروتین DFLUX و کدنویسی با زبان برنامه نویسی فرترن انجام شده است. مدل منبع حرارتی با توزیع شار حجمی دو-مخروطی^۲ بهبود یافته به منظور شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری لیزری دیسک غیر همجنس مورد استفاده قرار گرفته است. اثر تغییر فاز به وسیله تعریف کردن گرمای نهان ذوب و سایر خواص حرارتی وابسته به دما برای شبیه‌سازی از تحقیقات سایر محققان الهام گرفته شده است. سپس از این بین با مقایسه نتایج شبیه‌سازی هر یک مدل حرارتی پیشنهادی با نتایج تجربی سایر محققان، این مدل منبع حرارتی برای مدل‌سازی المان محدود فرآیند جوشکاری لیزری دیسک سوراخ کلیدی (جوشکاری عمیق) نامتجانس با اتصال لب به لب دو ورق از جنس فولاد ضد زنگ ۳۰۴ و مس با ابعاد $2 \times 15 \times 20$ میلی‌متر به منظور تخمین توزیع دما و پیش‌بینی هندسه مقطع جوش شامل ناحیه همجوشی و ناحیه متأثر از حرارت پیشنهاد می‌گردد. توزیع دمای گذرا در نمونه جوشکاری شده تابعی است از زمان t و سیستم مختصات کارتزین با جهت محور X در راستای خط جوشکاری، محور Z در راستای ضخامت و مرکز

همانطور که مشاهده می‌شود در پژوهش‌های انجام شده کمتر به جوشکاری عمیق سوراخ کلیدی^۱ بین مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ پرداخته شده بنابراین هدف از پژوهش حاضر، بررسی دقیق‌تر اتصال غیر همجنس این دو متریال با در نظر گرفتن تمامی خواص به صورت وابسته به دما، در نظر گرفتن اثر گاز محافظ با معادلات مشخص، در نظر گرفتن تمامی شرایط مرزی مطابق آزمایش‌های تجربی و به ویژه استفاده از مدل حجمی دو مخروطی بهبود یافته برای اتصال مذکور که بتواند خروجی‌ها از جمله ابعاد و شکل هندسی جوش، توزیع دما، توزیع کرنش‌های الاستیک و پلاستیک و تنش‌های پسماند را همزمان و به درستی محاسبه کرده و نمایش دهد. تحلیل جوشکاری لیزری غیر همجنس برای این فلزات توسط نرم افزار آباکوس انجام شده است. برای این منظور، ابتدا با استفاده از روش المان محدود و تعریف دقیقی از منبع حرارتی، تحلیل حرارتی صورت گرفته که در نتیجه آن پروفیل دمایی و ابعاد منطقه ذوب به دست آمده است. سپس تحلیل مکانیکی به این روش که نتایج تحلیل حرارتی به صورت تاریخچه در المان‌های مکانیکی ذخیره شده تا تنش و کرنش‌های حاصل از آن به دست آید که روش غیر مستقیم یا غیر کوپل گفته می‌شود، انجام شد.

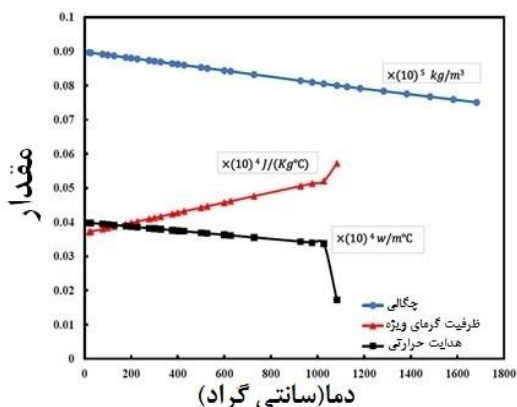
۲- شرح مساله

میزان پژوهش‌ها و تحقیقات در زمینه اتصال دو فلز با خواص متفاوت با فرآیند جوشکاری لیزر بسیار کم بوده و این حیطه کاری، فضای مناسبی برای تحقیق و آزمایش‌های متنوع است. همچنین به دلیل تفاوت در ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و مس، دستیابی به اتصالی با خواص مطلوب کمی دشوار است. در صورتی که بتوان یک روش دقیق غیر آزمایشگاهی و تئوری ارائه داد که خواص حرارتی و مکانیکی این نوع فرآیند جوشکاری را به دست آورد، می‌توان برای اتصالات مختلف و انواع متفاوت فلزات، پارامترهای موثر در جوشکاری را با هزینه کمتر و سرعت بیشتر معین کرد. در این پژوهش، مساله اصلی یافتن راه حل عددی، تئوری و قابل تعمیم برای شبیه‌سازی جوشکاری لیزر بین دو فلز نامتجانس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و مس، با ایجاد زمینه مناسب برای پژوهش‌های پیش رو جهت بهبود این فرآیند است. در این پژوهش معیار تصمیم

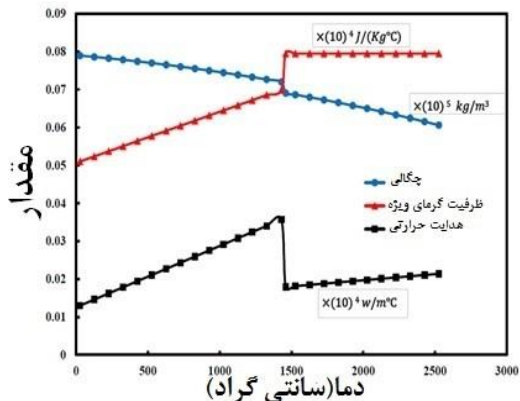
² Volumetric double conical heat source

¹ Keyhole deep welding

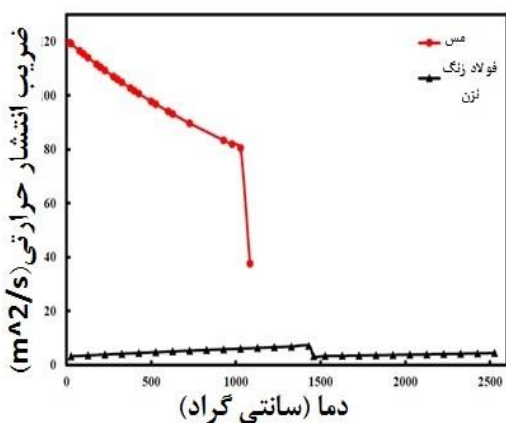
به علاوه، در جدول ۱ سایر خواص حرارتی شامل گرمای نهان ذوب، دماهای سالییدوس و لیکوئیدوس نشان داده شدند.



شکل ۱- خواص فیزیکی-حرارتی مس [۱۷]



شکل ۲- خواص فیزیکی-حرارتی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ [۱۸]



شکل ۳- ضریب انتشار حرارتی مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴، [۱۷]، [۱۸]

شرایط مرزی حرارتی شامل حرارت ورودی در اثر تابش لیزر و شرایط خنک کننده محیط اطراف می‌باشد. شرایط مرزی حرارتی مطابق با شکل (۶) است. دمای اولیه قطعه کار ۲۵ درجه سانتی گراد لحاظ شده است.

مختصات بر روی سطح نمونه قرار گرفته است.

معادله حاکم برای هدایت حرارتی گذرا با معادله شماره (۱) بیان می‌شود [۹]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) = \rho(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

در حالیکه T معرف دما، ρ چگالی مواد، c گرمای ویژه، k هدایت حرارتی و Q حرارت تولیدی داخلی در واحد حجم می‌باشد.

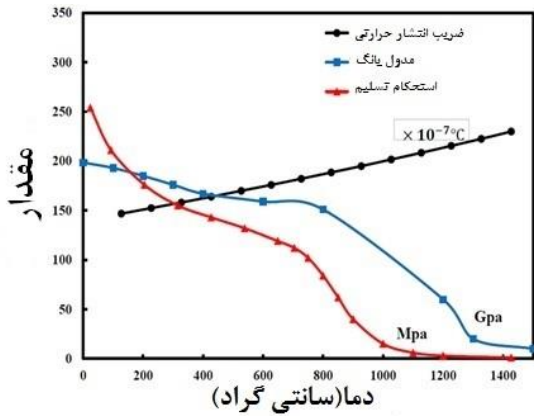
۳-۱- خواص فیزیکی-حرارتی و حرارتی-مکانیکی مواد

گام اول در ایجاد مدل سه بعدی تعریف خواص فیزیکی و مکانیکی هر یک از ورق‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی و شرایط مرزی حاکم بر مدل حرارتی و مکانیکی است. از آنجایی که در فرآیند جوشکاری لیزر، دما در قطعات جوشکاری شده خیلی سریع تغییر می‌کند، در شبیه‌سازی، خواص مواد بایستی به صورت وابسته به دما لحاظ شوند [۱۷]، [۱۸].

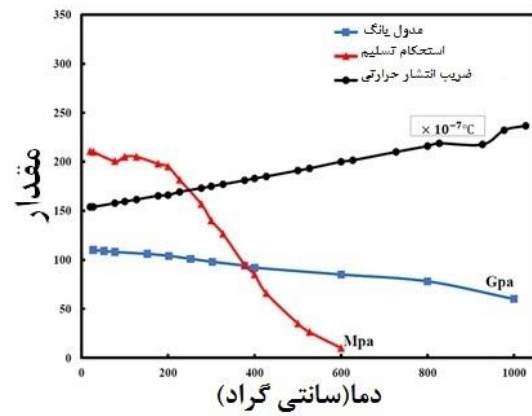
در شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) خواص فیزیکی هر یک از مواد شامل چگالی، ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتشار حرارتی که وابسته به دما نیز می‌باشند، در نرم افزار تعریف شدند. لازم به ذکر است در طول موج ۱/۰۳ میکرومتری لیزر دیسک، ضریب جذب به صورت ثابت و برای مس برابر با ۰/۰۳ و برای فولاد زنگ نزن ۳۰۴ برابر با ۰/۲۷ ثابت گردید. علاوه بر این، خواص مکانیکی مواد نیز در شکل‌های (۴) و (۵) به صورت وابسته به دما برای محاسبه توزیع کرنش و تنش در حین فرآیند جوشکاری لیزر و زمان خنک‌کاری تعریف شدند. لازم به ذکر است، اثر آنیل نیز با حذف تاثیر کار سختی در حین فرآیند با صفر در نظر گرفتن کرنش پلاستیک معادل وارد مدلسازی شده است [۱۹].

جدول ۱- ضریب گرمای نهان ویژه، دمای سالییدوس و لیکوئیدوس مواد [۱۹]

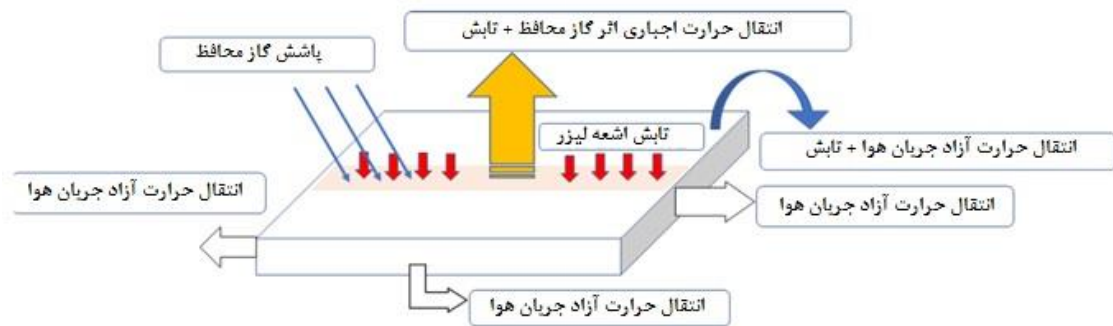
مواد	گرمای نهان ذوب (KJ/Kg)	دمای سالییدوس °C	دمای لیکوئیدوس °C
مس	۱۸۸	۱۰۶۴	۱۰۸۳
فولاد زنگ نزن ۳۰۴	۴۰۰	۱۶۷۰	۱۷۷۰



شکل ۵- خواص مکانیکی-حرارتی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ [۱۸]



شکل ۴- خواص مکانیکی-حرارتی مس [۱۷]



شکل ۶- شرایط مرزی حرارتی

در روابط فوق، ∂T_s دمای سطح ورق مورد آزمایش (در حین شبیه‌سازی در حال تغییر می باشد بنابراین به صورت گرادینانی تعریف شده)، T_∞ دمای محیط آزمایش، T_f دمای فیکسچر نگهدارنده است. ϵ ضریب گسیلندگی ناشی از تشعشع برای مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به ترتیب ۰/۳ و ۰/۳ می باشد. مقادیر ضریب جابجایی آزاد هوا برای فولاد ضد زنگ ۳۰۴ و مس در این پژوهش به ترتیب برابر با $10 (w/m^2k)$ و $25 (w/m^2k)$ در نظر گرفته شد.

این مقادیر برای تمامی سطوح به جز سطوح تحت تاثیر گاز محافظ می باشد. گازهای محافظ به منظور محافظت از جوش در مقابل واکنش‌های مخرب با محیط اطراف حوضچه مذاب در جوشکاری لیزر مورد استفاده قرار می گیرند. ناحیه‌ای از سطح که به طور مستقیم زیر نازل پاشش به دلیل جریان گاز محافظ است، انتقال حرارت همرفتی اجباری را تجربه می‌کند. به همین ترتیب، انتقال حرارت تولیدی ناشی از جریان گاز محافظ به عنوان همرفت

همانطور که در شکل نیز مشخص است، انواع اتلاف حرارتی از طریق تابش، همرفت و هدایت حرارتی می‌باشد [۲۰]. سطح پایینی قطعه کار در تماس با فیکسچر آلومینیومی بوده که هدایت حرارتی بسیار بالایی دارد. بنابراین مقاومت تماس حرارتی^۱ بین قطعه کار با دو جنس نامتجانس و فیکسچر آلومینیومی با فرض انتقال حرارت همرفتی در سطح پایینی قطعه کار در شبیه‌سازی جبران می‌شود. اتلاف حرارت ناشی از هدایت حرارتی بین ورق و فیکسچر در رابطه ۴، به همین ترتیب اتلاف ناشی از تشعشع به واسطه تابش پرتو لیزر به سطح و بازتاب آن با رابطه ۳ بیان شده و اتلاف حرارتی همرفت اجباری نیز به دلیل پاشش گاز محافظ در محل خط جوش و اتلاف حرارتی همرفت آزاد ناشی از جریان هوا اطراف قطعه کار با رابطه ۲ بیان می‌شوند.

$$q_{convection} = h_{conv}(\partial T_s - T_\infty) \quad (2)$$

$$q_{radiation} = \sigma \epsilon (\partial T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

$$q_{th\ cond} = h_{th\ cond}(T_f - \partial T_s) \quad (4)$$

¹ Heat contact resistance

با صرف نظر از اثر تغییر فاز، کرنش‌های تدریجی ایجاد شده به سه جزو کرنش الاستیک ϵ^e ، کرنش پلاستیک ϵ^p و کرنش ناشی از حرارت ϵ^{Th} تجزیه می‌شوند [۲۲]:

$$\epsilon^{Total} = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^{Th} \quad (۹)$$

کرنش الاستیک با استفاده از قانون هوک، در حالیکه کرنش پلاستیک با استفاده از قانون جریان پلاستیک مدل شده است. قانون جریان پلاستیک با در نظر گرفتن خواص وابسته به دما مواد و استحکام تسلیم قابل تعریف می‌باشد [۲۲].

۳-۲- تعیین المان برای تحلیل حرارتی

شکل (۷) سطح مقطع سه بعدی مدل هندسی به کار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. قطعات استفاده شده در این شبیه‌سازی از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و مس که هر یک با ابعاد $10 \times 15 \times 2$ میلی‌متر می‌باشند. مدل هندسی با استفاده از دو نوع المان مش بندی شده است. برای المان بندی نمونه ابتدا با استفاده از پارتیشن بندی، نمونه به ۵ قسمت تقسیم می‌شود. در مدل حرارتی از المان‌های DC3D4 و DC3D8 استفاده شده است. این المان یک المان مکعب مستطیلی هشت گره‌ای با اتصال خطی می‌باشد که تنها درجه آزادی دما را داشته و قابلیت کارکرد در تحلیل پایدار و گذرای حرارتی را نیز دارد. برای کاستن زمان تحلیل، در مناطق دورتر از خط جوش از المان‌های درشت‌تر استفاده شده است. بنابراین با توجه به تعداد گره‌ها اتصال المان‌های درشت به المان‌های ریز بدون المان‌های واسط امکان پذیر نیست. المان DC3D4 به عنوان المان واسطه در مدل استفاده شده است. این المان یک المان هرمی چهار گره‌ای با اتصال خطی است. لازم به ذکر است تحلیل مکانیکی با مدل هندسی و مش بندی مشابه مدل حرارتی انجام شده است. با این تفاوت که المان‌های C3D8 و C3D4 در بخش مکانیکی به کار گرفته می‌شوند. اندازه نهایی مش باید با توجه به زمان شبیه‌سازی کامپیوتری و دقت مورد نیاز باشد. اسنبری و همکارانش [۲۳] برای تأمین صحت روش از نظر عددی، برای محاسبه اندازه مطلوب المان جهت شبیه‌سازی، رابطه ۱۰ را پیشنهاد دادند:

$$h_e \leq \left| \frac{k}{\rho \cdot c \cdot v_i} \right| \quad (۱۰)$$

که در آن v_i سرعت جوشکاری، c گرمای ویژه بر حسب

اجباری در شبیه‌سازی لحاظ شده است.

روابط تجربی زیر ابتدا توسط گاردون و کوبونپو برای هوا پیشنهاد شد و بعداً توسط استین برای هرگونه گاز اصلاح شده، برای بخشی از سطح زیر نازل استفاده شد [۲۱].

$$h = 13Re^{1/2}Pr^{1/3}k_{gas}/NPD \quad (۵)$$

$$Re = \frac{v_{gas} \times D \times \rho_{gas}}{\mu_{gas}} \quad (۶)$$

$$Pr = \frac{v_{gas}}{\alpha_{gas}} = \frac{\mu_{gas}C_{pgas}}{k_{gas}} \quad (۷)$$

k_{gas} هدایت حرارتی گاز محافظ (W /m K)، NPD فاصله نازل تا صفحه ورق (m)، V_{gas} سرعت جریان گاز محافظ (m/s)، v_{gas} ویسکوزیته سینماتیکی گاز محافظ (m²/s)، D قطر نازل (m)، ρ_{gas} چگالی گاز محافظ (kg/m³)، μ_{gas} ویسکوزیته دینامیکی گاز محافظ، α_{gas} ضریب انتشار حرارتی گاز محافظ (m²/s)، C_{pgas} گرمای ویژه گاز محافظ (J/kgK).

Re عدد رینولدز و Pr عدد پرانتل براساس خواص گاز محافظ می‌باشند. سپس سابروتین فیلم^۱ که شامل پارامتر h می‌باشد، تعریف می‌گردد. این سابروتین h را برای هر قطعه به صورت انتگرالی در هر گام حل، محاسبه می‌کند. لازم به ذکر است ضریب انتقال حرارت ثابت h برای تمامی نقاط زیر نازل مورد استفاده قرار گرفته است. ضریب انتقال حرارت ثابت جابه جایی (همرفت) اجباری برای گاز هلیوم $237W/m^2$ محاسبه شد.

بنابراین تعادل انرژی در مواد زیر لایه با منبع حرارتی متحرک در راستای محور x توسط معادله ۱ بیان شد. در زمان $t=0$ ، $T(x, y, z, 0) = T_{\infty}$ با بیان ریاضی، شرایط مرزی با رابطه زیر بیان شده است:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} - q_s + \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4) + h_c(T_s - T_{\infty}) = 0 \quad (۸)$$

در حالیکه q_s شار حرارتی توزیع شده، n بیانگر جهت نرمال به سطح می‌باشد، h_c ضریب انتقال حرارت همرفتی، ϵ ضریب گسیلندگی، σ ثابت استفان بلترمان و T_{∞} دمای محیط می‌باشد.

تخمین اعوجاج ناشی از جوشکاری توسط اعمال بار حرارتی و قيود مکانیکی مرزی با فرض رفتار الاستیک-پلاستیک مواد محاسبه گردیده است. شرط مرزی مکانیکی با اعمال قيود کامل بر روی لبه‌های جانبی انجام شده است.

^۱ FILM subroutine

ناحیه متأثر از حرارت، توزیع شار حرارتی ترکیبی حجمی دو مخروطی بهبودیافته پیشنهاد می‌گردد. با توجه به تصاویر متالوگرافی گرفته شده زیر میکروسکوپ از ناحیه جوش بین دو ماده مذکور، این توزیع شار حرارتی پیشنهاد شده و نتایج آن در ادامه قابل بررسی هستند. در ادامه ابتدا روابط ریاضی مدل ساده حجمی مخروطی بیان و سپس روش توزیع حجمی دو مخروطی به تفصیل توضیح داده می‌شود.

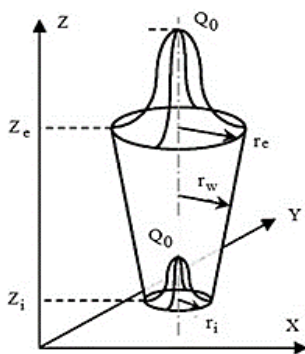
۳-۴-۱- مدل حرارتی با توزیع شار حجمی مخروطی

در مدل حجمی گوسی مخروطی همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، حوضچه مذاب هرمی به صورت یک هرم ناقص با شعاع بالای r_e ، شعاع پایین r_i و ارتفاع H است. مانند توزیع‌های قبلی، توزیع شار حرارتی هرمی دارای یک توزیع گوسی یا نرمال روی حجم است. مطابق رابطه ۱۱، چگالی شار حجمی حرارتی $Q_v(r_c, z)$ بر حسب وات بر متر مکعب در فاصله r_c از مرکز پرتو با ارتفاع z را نشان می‌دهد. در این رابطه Q_0 بیشینه شار حرارتی در $z = z_e$ و $r = 0$ است [۲۴]:

$$Q_v(r_c, z) = Q_0 \exp\left(-\frac{c_n r_c^2}{r_c^2}\right) \quad (11)$$

$$r_c = r_i + (r_e - r_i) \frac{z - z_i}{H} \quad (12)$$

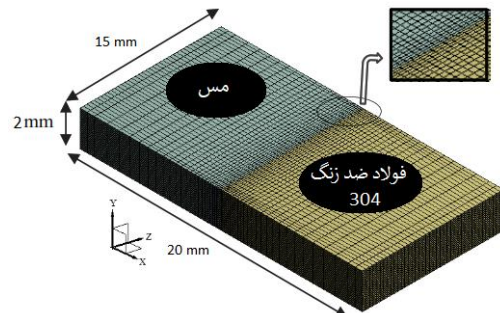
با جایگذاری r_c مقدار Q_v از رابطه به دست می‌آید. در این توزیع نیز مانند توزیع شار سطحی گوسی و حجمی گوسی با تغییر ضریب اصلاح c_n می‌توان توزیع شار حرارتی را تغییر داد. به نحوی که با زیاد شدن این ضریب، میزان نفوذ جوش افزایش می‌یابد و از میزان پهنای جوش کاسته می‌شود، در صورتی که با توجه به ثابت بودن انتگرال رابطه، میزان چگالی شار وارده به قطعه کار تغییری نمی‌کند [۲۴].



شکل ۹- توزیع شار حجمی مخروطی

ρ چگالی بر حسب g/mm^3 است.

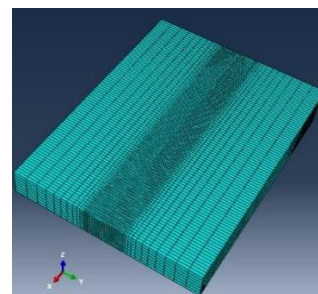
که بنابر رابطه فوق و آنالیز حساسیت مش در نهایت اندازه مش ۰/۱ برای مناطق نزدیک به خط جوش و برای ناحیه واسطه و نواحی دورتر نیز به ترتیب ۰/۵ و ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شدند.



شکل ۷- هندسه مدل

۳-۳- مدل‌سازی و مش‌بندی اتصالات:

گام بعدی برای تحلیل، مش‌بندی اتصال، شامل دو ورق به ابعاد $2 \times 15 \times 10$ میلی‌متر که به صورت لب به لب در مجاورت هم قرار گرفته و نحوه حرکت لیزر به صورت خطی در امتداد طولی می‌باشد. این امر باعث می‌شود تا تمرکز مش‌بندی در اطراف خط جوش بیشتر شود. با توجه به گرادیان‌های حرارتی شدیدتر در نواحی نزدیک به خط مرکزی جوش و در نتیجه نیاز به دقت بالاتر، مدل هندسی باید به گونه‌ای مش‌بندی شود که در نواحی حساس نزدیک به خط جوش، مش‌بندی ریزتر باشد. همچنین برای کاهش زمان محاسبات، همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است، باید مش‌بندی با افزایش فاصله از خط مرکزی جوش درشت‌تر شود.



شکل ۸- مدل مش

۳-۴- روابط تحلیل به منظور تعریف منابع شار حرارتی

جهت شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری غیر همجنس بین مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ برای تخمین توزیع دما، پیش‌بینی هندسه و ابعاد سطح مقطع جوش شامل حوضچه جوش و

می‌باشند. $r_1(z)$ و $r_2(z)$ نیز به ترتیب پارامترهای توزیع می‌باشند که بسته به ناحیه مخروطی شکل به صورت خطی افزایش و یا کاهش می‌یابند. Q_{I1} و Q_{I2} نیز به ترتیب بیانگر توان موثر لیزر برای مخروط پایینی و مخروط بالایی می‌باشند.

۳-۵- تحلیل عددی:

با به کارگیری روابط تحلیلی ذکر شده به کمک برنامه نویسی با زبان فرترن، نحوه توزیع شار حرارتی برای مدل مذکور تعریف شده است. در جدول شماره ۲ نیز پارامترهای ورودی در سه حالت مختلف که در آزمایش تجربی توسط میروسلاو سا هول و همکاران [۱۳] انجام شد آورده شده است. در این فرآیند از لیزر دیسک TruDisk 8002 با طول موج ۱/۰۳ میکرومتر و حداکثر توان ۸۰۰۰ وات استفاده شد. فاصله کانونی مستقیماً بر روی سطح تنظیم شده است و در فاصله ۲۰۰ میلیمتری از لنز می‌باشد. قطر لکه لیزر ۴۰۰ میکرون روی سطح تنظیم شده است. سپس تحلیل حرارتی و مکانیکی مطابق جدول ۲ توسط نرم افزار آباکوس انجام شد. لذا در ادامه در بخش نتایج به بررسی و تحلیل هندسه حوضچه مذاب، چگونگی توزیع حرارت در جوشکاری غیر همجنس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و دلایل آن، چگونگی توزیع کرنش‌های الاستیک و پلاستیک و در نهایت ابعاد حوضچه جوش و اعتبار سنجی از طریق مقایسه با نتایج تجربی برای مدل حرارتی پیشنهادی ثبت می‌شود و پس از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی، میزان عدم انطباق ابعادی بین هندسه مقطع جوش در نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی قابل محاسبه بوده و در نهایت مدل مناسب برای شبیه‌سازی جوشکاری مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ ارائه می‌شود.

جدول ۲- پارامترهای ورودی آزمایش تجربی

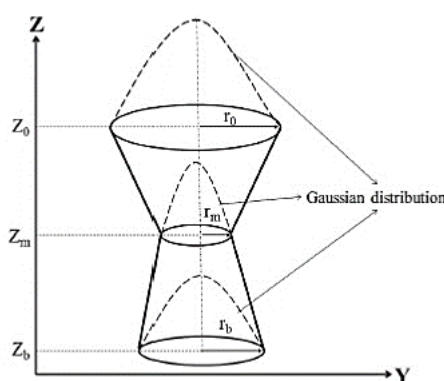
پارامترهای ورودی	آزمایش تجربی ۱	آزمایش تجربی ۲	آزمایش تجربی ۳
توان لیزر	۲۳۰۰ W	۲۶۰۰ W	۲۹۰۰ W
سرعت لیزر	۳.۰ mm/s	۴.۰ mm/s	۵.۰ mm/s

۴- نتایج و بحث:

۴-۱- هندسه حوضچه جوش

همانطور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، در

۳-۴-۲- مدل حرارتی با توزیع شار حجمی دو-مخروطی علی‌رغم وجود منبع حرارتی مخروطی، نیاز به مدل حرارتی با توزیع شار حجمی دو-مخروطی می‌باشد. مدل حجمی مخروطی در شکل اصلی خود قادر به مدلسازی جوش نفوذ کامل که همراه با پدیده گسترش ریشه باشد، نیست. به همین دلیل، مدل منبع حرارتی دو-مخروطی ارائه شده که متشکل از دو منبع حرارتی مخروطی مجزا می‌باشد. همچنین توسط ضریب توزیع برای رابطه مخروط پایینی می‌توان بهینه‌سازی انجام داد و توزیع شکل ساعت شنی با مخروط معکوس ایجاد کرد. این توزیع شار حرارتی در شکل (۱۰) و با رابطه پارامتری ۱۳-۱۸ بیان می‌شود [۲۵]:



شکل ۱۰- توزیع شار حجمی دو-مخروطی

$$q_{I1}(x, y, z) = \frac{9Q_{I1}e^3}{\pi(e^3-1)(z_i-z_b)(r_b^2+r_i^2+r_b r_i) \exp(-\frac{3[(x-vt)^2+y^2]}{r_1^2})} \quad (13)$$

$$q_{I2}(x, y, z) = \frac{9Q_{I2}e^3}{\pi(e^3-1)(z_t-z_i)(r_t^2+r_i^2+r_t r_i) \exp(-\frac{3[(x-vt)^2+y^2]}{r_2^2})} \quad (14)$$

$$r_1(z) = r_i - (r_i - r_b) \frac{z_i - z}{z_i - z_b} \quad (15)$$

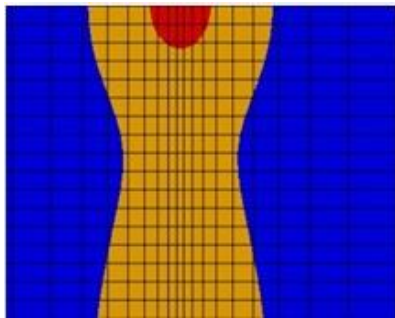
$$r_2(z) = r_t - (r_t - r_i) \frac{z_t - z}{z_t - z_i} \quad (16)$$

$$Q_{I1} = \frac{z_i - z_b}{z_t - z_b} \quad (17)$$

$$Q_{I2} = \frac{z_t - z_i}{z_t - z_b} \quad (18)$$

در معادلات بالا، $q_{I1}(x, y, z)$ و $q_{I2}(x, y, z)$ به ترتیب شار حرارتی لیزر برای مخروط بالا و پایین می‌باشند. پارامترهای $r_b, r_t, r_i, z_t, z_b, z_i$ بیانگر مختصات Z و شعاع مخروط

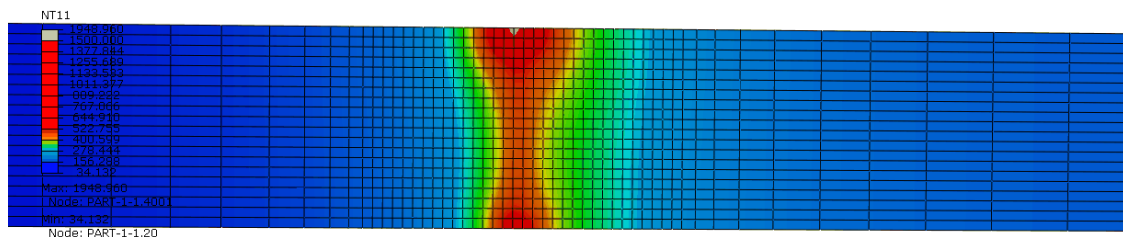
دلیل داشتن خاصیت هدایت حرارتی بالاتر ناحیه متأثر از حرارت کوچکتری را گزارش می‌دهد. بنابراین مدلی برای شبیه‌سازی این نوع جوشکاری پیشنهاد می‌شود که قابلیت ایجاد جوش نفوذ کامل و علاوه بر آن سطح مقطع ناحیه همجوشی را به شکل ساعت شنی نمایش بدهد. با برنامه نویسی توزیع شار حجمی دو مخروطی می‌توان به شکل ساعت شنی دست یافت.



شکل ۱۲- نمایش ساعت شنی توزیع شار حرارتی حجمی دو مخروطی

۴-۲- توزیع حرارت در اتصال غیر همجنس:

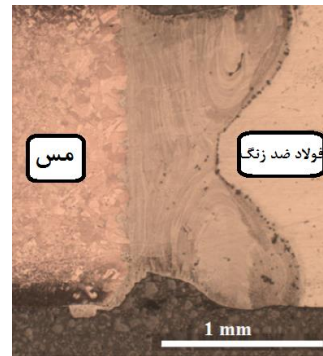
شکل (۱۳) نمایی از نحوه توزیع حرارتی در ورق‌های نامتجانس جوشکاری شده به روش لیزر را نمایش می‌دهد. به دلیل اینکه مس دارای ضریب هدایت حرارتی بیشتری نسبت به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ است، انتظار می‌رود به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بالاتر میزان حرارت بیشتری را از خود عبور دهد.



شکل ۱۳- تصویر سطح مقطع کانتور دمایی جوشکاری حاصل از شبیه‌سازی مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴

بود و در نتیجه هر چه میزان نفوذ کمتر باشد پراکندگی بیشتر بوده و ماده مورد نظر تمام حرارت را سریعاً به اطراف خود پخش می‌کند که نتیجه این عمل پایین تر بودن دما

آزمایش تجربی جوشکاری لیزری غیر همجنس فلزات مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴، حوضچه جوش نفوذ کامل بوده و پروفیل حوضچه به شکل ساعت شنی می‌باشد [۲۶]. بنابراین، مدلی برای شبیه‌سازی این نوع جوشکاری با حوضچه جوش نفوذ کامل و پروفیل سطح مقطع آن نیز به شکل ساعت شنی پیشنهاد می‌شود.

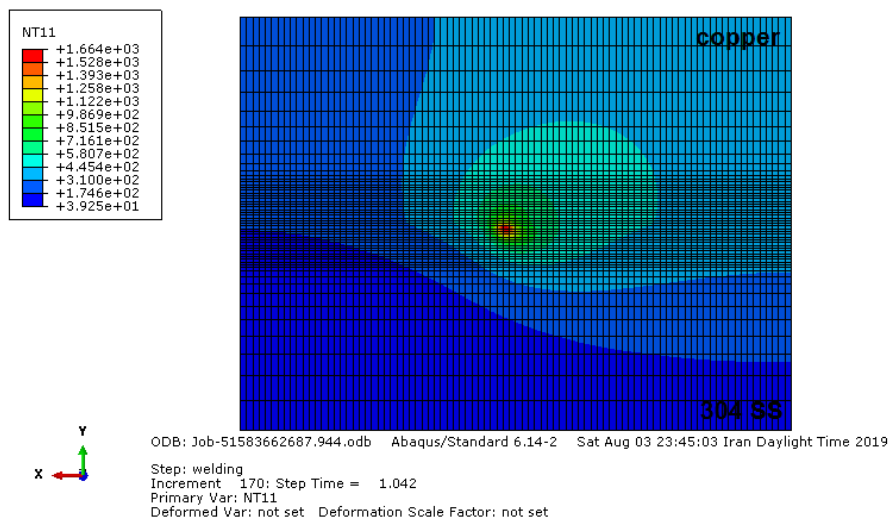


شکل ۱۴- سطح مقطع با شکل ساعت شنی مس-فولاد زنگ نزن [۱۴]۳۰۴

مطابق شکل (۱۲) و (۱۳)، سطح مقطع جوش به دست آمده از شبیه‌سازی با استفاده از مدل پیشنهادی نشان داده شده است. در جوشکاری لیزر، حوضچه مذاب بین این دو فلز شکلی کاملاً غیر متقارن در تمامی شرایط تست شده دارد. قسمت فولادی حوضچه جوش به دلیل همرفت بسیار قوی ایجاد شده ناشی از اثر مارانگونی حین فرآیند جوشکاری لیزر ظاهری به شکل ساعت شنی دارد [۲۷]. بخش مسی گرده جوش کمتر دچار تغییر شکل شده و به

به عبارت دیگر، مس نسبت به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ ضریب انتشار حرارتی بیشتری دارد. هر چه میزان ضریب انتشار حرارتی بیشتر باشد نفوذ حرارت در آن ماده کمتر خواهد

علی‌رغم وجود شرایط مرزی یکسان در دو ماده و خط جوش مرکزی نسبت به هندسه مدل، توزیع دما در راستای عمود بر خط جوش، کاملاً به صورت نامتقارن می‌باشد. طبق نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی که در شکل (۱۳) نیز آمده است، بیشینه دما در ناحیه همجوشی به سمت فولاد زنگ نزن ۳۰۴ انحراف دارد و همچنین در راستای عرضی متوسط دما نسبت به سمت مس بیشتر است که دلیل آن ضریب انتشار حرارتی بالاتر مس نسبت به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ می‌باشد.

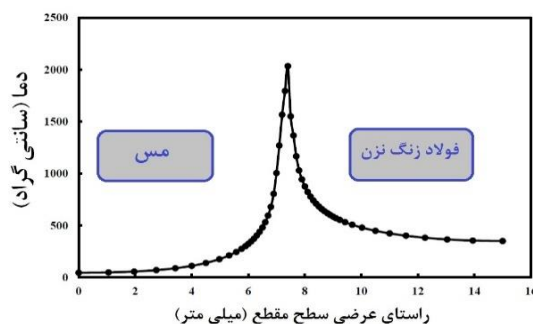


شکل ۱۴- توزیع حرارت در اتصال غیر همجنس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴

باشیم و بر روی نموداری که محور افقی‌اش نشان دهنده فاصله و محور عمودی‌اش نیز دما را نشان می‌دهد رسم کنیم. دمای نقطه ذوب برای مس ۱۰۸۵ درجه سانتی‌گراد و برای فولاد زنگ نزن ۳۰۴ نیز برابر ۱۷۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. اکنون اندازه دمای ذوب را روی محور عمودی (محور دمایی) مشخص کرده و سپس عمود بر آن خطی را رسم می‌کنیم که نمودار را در دو نقطه قطع می‌کند. از این دو نقطه بر محور افقی (محور فاصله) عمود می‌کشیم. فاصله بین این دو اندازه حوضچه مذاب بوده، زیرا در این فاصله، دمای ماده از دمای ذوب بالاتر است. اکنون عرض حوضچه مذاب برای مس ۰/۶ میلی‌متر و برای فولاد زنگ نزن ۳۰۴ ۱/۱ میلی‌متر است. از آنجایی که ضریب انتقال حرارت مس بالاتر بوده، حرارت را به خوبی از خود عبور می‌دهد و دمای آن کمتر بالا می‌رود، بنابراین در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود که حوضچه جوش کوچکتر مربوط به مس است. بنابراین دلیل بزرگتر شدن حوضچه جوش فولاد زنگ نزن این است که ضریب انتقال حرارت پایین‌تری نسبت به بقیه

در ناحیه مرکزی جوش و تشکیل ناحیه متأثر از حرارت کوچک می‌باشد.

همانطور که در شکل (۱۴) دیده می‌شود، نتایج مطابق با انتظار بود. مس حرارت بیشتری را عبور داده است که فرآیند سرد شدن را تسریع می‌بخشد و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به دلیل ضریب هدایت حرارتی کمتر، حرارت را به خود جذب می‌کند و کمتر اجازه عبور آن را می‌دهد. بنابراین لبه دیگر آن سردتر است و حرارت کمتری به آن می‌رسد.

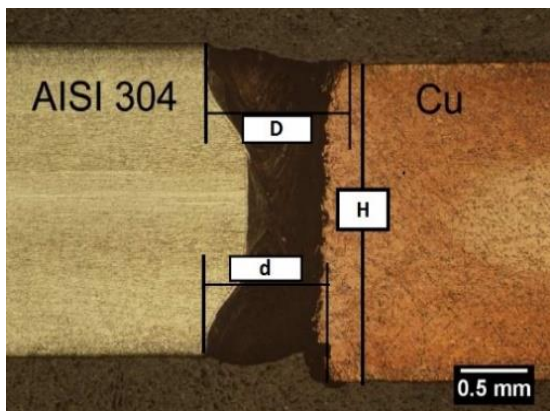


شکل ۱۵- توزیع درجه حرارت در اتصال غیر همجنس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴

۳-۴- اندازه حوضچه جوش

در این بخش ابتدا به بررسی اندازه حوضچه مذاب در شبیه‌سازی جوشکاری لیزر با پارامترهای ورودی یکسان (توان لیزر ۲۳۰۰ وات، سرعت جوشکاری ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، طول کانونی ۲۰۰ میلی‌متر و قطر پرتو ۴۰۰ میکرون) برای هر یک از دو ماده مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ می‌پردازیم. برای محاسبه اندازه حوضچه مذاب لازم است دمای نودها در راستای عرضی (عمود بر خط جوش) را داشته

بیشتر سرعت نسبت به توان در این دو آزمایش می‌باشد. در مرحله اولیه جوشکاری، مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ ذوب می‌شوند تا با یکدیگر ترکیب شده و حوضچه مذاب را تشکیل دهند. همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، اثر همرفتی مارانگونی سبب جریان فلزات مذاب به سمت خارج از مرکز حوضچه می‌شوند [۲]. در گام بعدی، حوضچه مذاب با شکل تقعر در سطح بالایی جوش، به دلیل فشار بالایی پلاسمای ایجاد شده، در تصاویر نتایج تجربی مشهود می‌باشد. این اثر همرفتی بسیار قوی باعث جدا شدن برخی از فولادها از فلز پایه و جریان یافتن آن به سمت مرکز حوضچه جوش می‌شود که ناشی از بالاتر بودن دمای ذوب فولاد زنگ نزن و بعلاوه نرخ خنک کاری بالای فرآیند جوشکاری لیزری می‌باشد. به دلایل ذکر شده تشکیل حوضچه جوش به شکل ساعت شنی اتفاقی ناگزیر است. تنها توزیع شار حرارتی که هندسه سطح مقطع جوش را شبیه به ساعت شنی تخمین و پیش بینی می‌کند، مدل حجمی دو مخروطی بهبودیافته است. مدل‌های عددی که قابلیت تخمین عرض جوش در ریشه جوش (d) را ندارند برای شبیه‌سازی جوشکاری نامتجانس بین این دو فلز مناسب نیستند. نتایج محاسبه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی به خوبی موافق بوده و دقت مدل عددی شار حرارتی حجمی دو مخروطی برای جوشکاری لیزری نامتجانس را نشان می‌دهد. ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

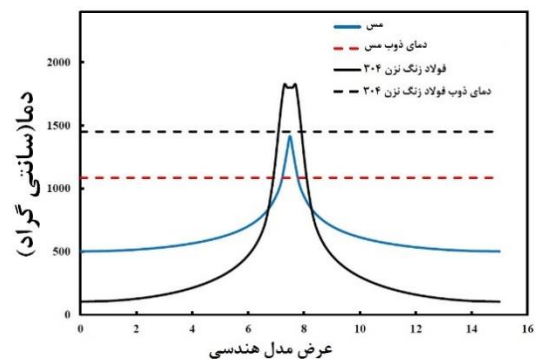


شکل ۱۷- تصویر متالوگرافی جوشکاری غیر همجنس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ [۱۳]

۳-۴- توزیع کرنش الاستیک و پلاستیک در اتصال نامتجانس

همانطور که در شکل (۱۸) نیز آورده شده و با توجه به این که میزان تنش تسلیم در فولاد زنگ نزن نسبت به مس بیشتر است، بنابراین محدوده الاستیک برای فولاد زنگ نزن

دارد و حرارت را کمتر از خود عبور می‌دهد و در خود ننگه می‌دارد. در نتیجه دمای آن بالا می‌رود و ذوب بیشتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۶- توزیع دما در راستای عرضی برای جوشکاری لیزر مجزا مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴

۶-۴- راستی آزمایشی نتایج ابعادی هندسه جوش با مدل پیشنهادی:

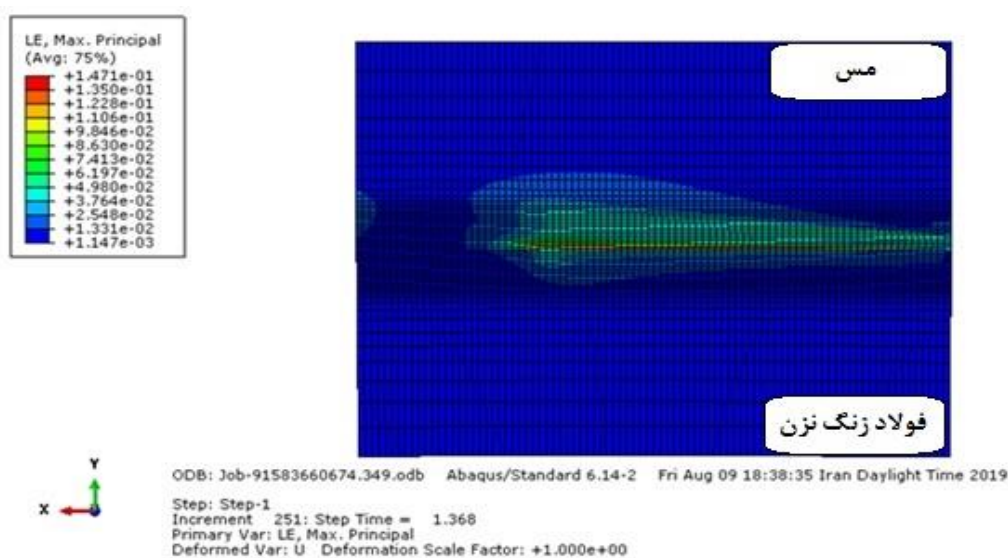
به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی جوشکاری، نتایج حاصل از مدل شار حرارتی دو مخروطی بهبودیافته با نتایج تجربی سایر محققان طبق جدول ۳ مقایسه شد. [۱۳] برای این منظور در آزمایش‌های تجربی انجام شده توسط محققان گذشته، دو ورق فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و مس با ضخامت ۲ میلی‌متر به وسیله لیزر دیسک پیوسته جوش داده شدند. اتصال دو ورق به صورت لب به لب می‌باشد. سپس فرآیند جوشکاری لیزر نفوذ عمیق (سوراخ کلیدی) با استفاده از پارامترهای ورودی که در جدول ۲ نشان داده شده است، اعمال شد. علاوه بر این، ابعاد گرده جوش در نتایج تجربی شامل عرض حوضچه جوش در سطوح بالایی و پایینی و عمق نفوذ جوش با استفاده از تصاویر متالوگرافی تعیین شدند. شکل (۱۷) تصویر نوری اتصال نامتجانس برای مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری ابعاد ذکر شده بر روی تصاویر متالوگرافی با استفاده از مقیاس و نرم افزار دیجی مایزر انجام شد. نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده با نتایج شبیه‌سازی همگرا بوده و نشان می‌دهند افزایش در توان لیزر، با سرعت روبش یکسان، افزایش اندازه حوضچه جوش را نتیجه می‌دهد. این نتیجه‌گیری با اندازه‌گیری ابعاد (d, D & H) که در شکل (۱۷) نیز مشخص است، بر روی حوضچه جوش به دست آمد. علاوه بر این، با افزایش ۳۰ درصدی در سرعت روبش لیزر، در توان ۲۹۰۰ وات لیزر، نسبت به شرایط آزمایش ۲ کوچکتر شده که به دلیل تاثیر

جدول ۳- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی ابعاد حوضچه

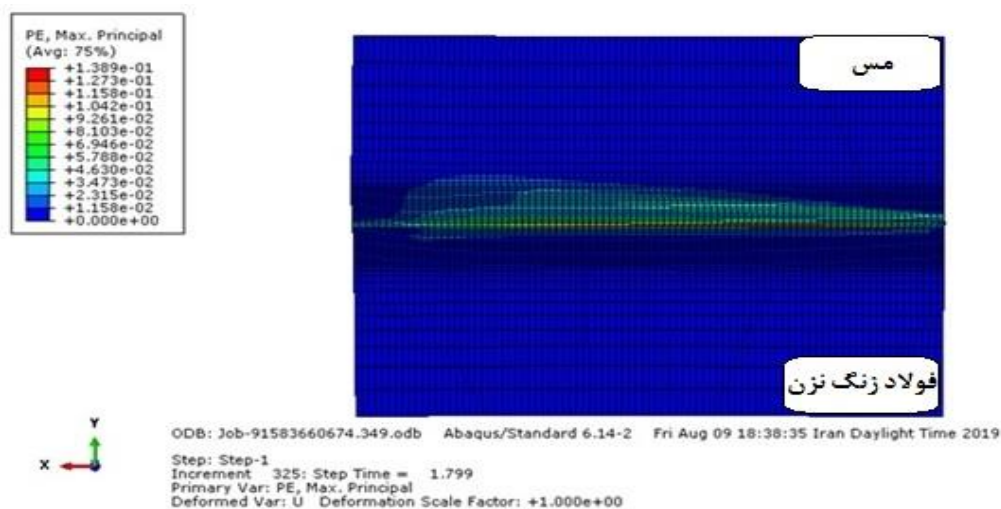
جوش

شماره آزمایش	نوع مدل حرارتی	اندازه D	اندازه d	اندازه H
آزمایش ۱	نتایج تجربی	۲/۳	۲/۱۶	۱/۹۶
	حجمی دو-مخروطی	۲/۵	۱/۸	۲
آزمایش ۲	نتایج تجربی	۲/۷	۲	۱/۸
	حجمی دو-مخروطی	۳/۲	۲/۳	۲/۵
آزمایش ۳	نتایج تجربی	۳/۲	۲/۷۵	۱/۶۸
	حجمی دو-مخروطی	۳/۲	۲/۵	۲

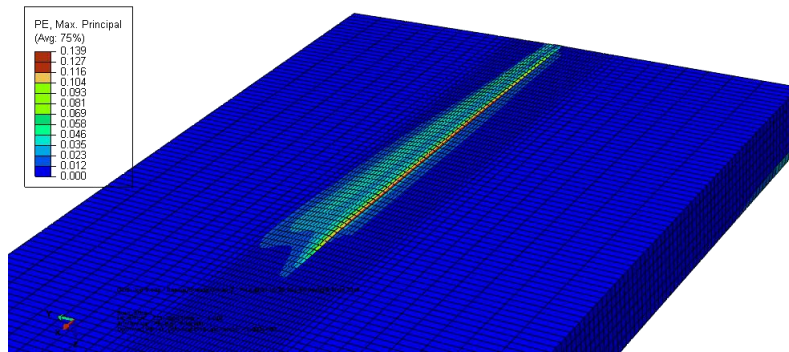
باید بیشتر از مس باشد. همچنین به دلیل متمرکز بودن منبع حرارتی در جوشکاری لیزر، در شکل (۱۹) محدوده کرنش پلاستیک برای این نوع جوشکاری بسیار کم و کاملاً متمرکز در اطراف حوضچه جوش است. دقیقاً به همین دلیل است که جوشکاری لیزر اعوجاج بسیار کمتری در فلزات نسبت به سایر روش‌ها ایجاد می‌کند. از آنجایی که تمرکز حرارت در هنگام جوشکاری در فولاد بیشتر بوده و در مس به دلیل هدایت حرارتی بالاتر، حرارت توزیع شده بنابراین به همین دلیل در بخش مس کرنش پلاستیک بیشتر از فولاد پیشروی کرده (در هنگام جوشکاری کرنش‌ها در ناحیه مرکزی جوش فشاری هستند). میزان کرنش پلاستیک در یک میلیمتری مرکز جوش سمت مس ۰/۰۴ و در بخش فولاد ۰/۰۰۴ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۸- توزیع کرنش الاستیک اتصال غیر همجنس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴



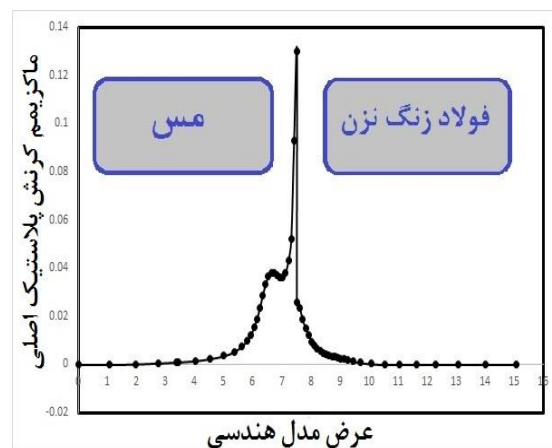
شکل ۱۹- توزیع کرنش پلاستیک اتصال غیر همجنس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴



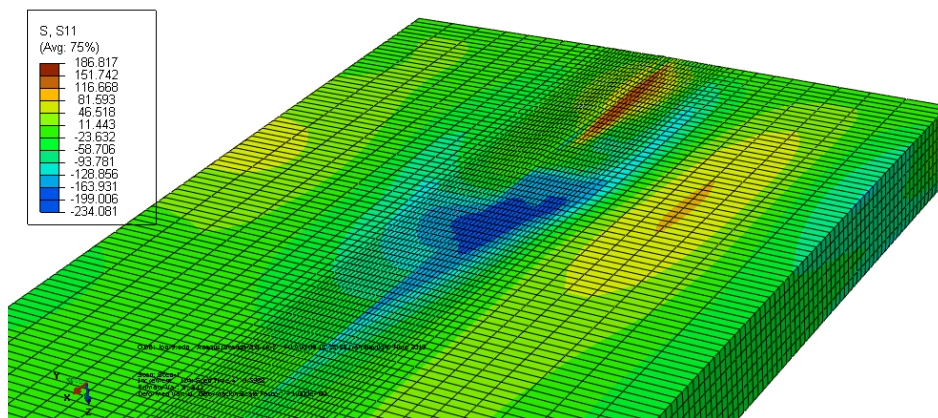
شکل ۲۰- پیشروی بیشتر کرنش پلاستیک در ناحیه مسی

۴-۴- توزیع تنش های طولی در اتصال نامتجانس

همانطور که در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نیز نشان داده شده است، در فولاد زنگ نزن به دلیل بالاتر بودن ضریب انبساط حرارتی حین جوشکاری تنش طولی در مرکز جوش در بخش فولادی فشاری تر از مس می‌باشد اما چون مس هدایت حرارتی بالاتری نسبت به فولاد دارد بنابراین در راستای عرضی با یک فاصله برابر نسبت به خط مرکزی جوش، سمت مس تنش‌ها هنوز فشاری بوده در حالیکه تنش‌ها در سمت فولاد کششی هستند. لازم به ذکر است میزان تنش در فواصل دورتر نسبت به مرکز جوش در بخش فولادی به دلیل استحکام بالاتر، بیشتر است.

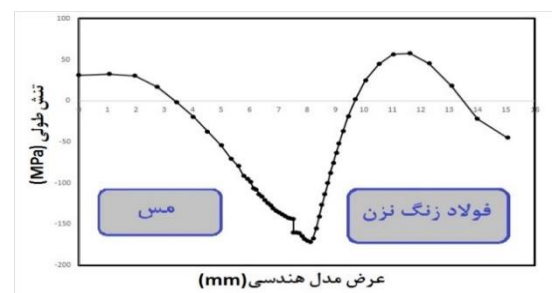


شکل ۱۹- توزیع کرنش پلاستیک در اتصال غیر همجنس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴



شکل ۲۱- توزیع تنش در جوشکاری نامتجانس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴

در نواحی که منبع حرارتی لیزر عبور کرده و سرد شده‌اند، تنش‌های پسماند شکل می‌گیرند. توزیع تنش پسماند طولی در شکل (۲۳) نشان می‌دهد تنش در مرکز جوش کششی است که در اثر انقباض ناشی از انبساط حرارتی است [۲۸] و در بخش فولادی همچنان بیشتر است که ناشی از تحمل کرنش‌های پلاستیک بالاتر در اثر ضریب انبساط حرارتی بیشتر فولاد حین جوشکاری می‌باشد.



شکل ۲۲- توزیع تنش طولی حین جوشکاری

۳- در میان خواص وابسته به دما، هدایت حرارتی و گرمای ویژه تاثیر قابل توجهی بر روی نتایج شبیه‌سازی دارند.

۴- اصلی‌ترین پارامتر موثر بر توزیع کرنش در اتصال بین دو فلز غیر یکسان، تنش تسلیم است. هر چه میزان تنش تسلیم بیشتر باشد، موجب می‌شود تا اعوجاج کمتری ایجاد شود (تنش آزاد نشود) و تنش پسماند بیشتری را در خود ذخیره کند.

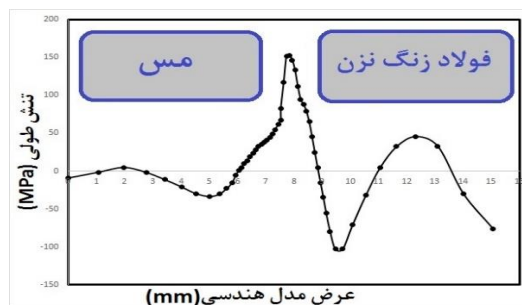
۵- از آنجایی که استحکام تسلیم فولاد زنگ نزن ۳۰۴ خیلی بالاتر از مس است (تقریباً سه برابر)، بنابراین نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده بالاتر بودن محدوده کرنش برای فولاد نسبت به مس می‌باشد.

۶- براساس نتایج میدان دمایی در راستای عرضی، مس ناحیه متأثر از حرارت باریکتری اثر مقایسه با فولاد زنگ نزن ۳۰۴ دارد.

۷- توزیع کرنش‌های پلاستیک در جوشکاری لیزر به دلیل تمرکز بیشتر منبع حرارتی بوده که نتیجه آن اعوجاج‌های کمتر در این روش جوشکاری نسبت به سایر روش‌هاست.

۸- فولاد زنگ نزن با داشتن ضریب انبساط حرارتی بالاتر نسبت به مس، کرنش‌های پلاستیک بالاتری را تجربه کرده و تنش‌های فشاری بیشتر حین جوشکاری و تنش‌های پسماند بالاتر پس از سرد شدن را نتیجه می‌دهد. لازم به ذکر است در ورق مسی به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بیشتر نسبت به فولاد، عرض بیشتری از ورق کرنش و تنش‌های فشاری را حین جوشکاری تحمل می‌کنند.

۹- با مقایسه شکل هندسی و ابعاد هندسه جوش اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های تجربی و ابعاد هندسه جوش حاصل از شبیه‌سازی، استنباط می‌شود که برای شبیه‌سازی جوشکاری لیزری از نوع سوراخ کلیدی مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴، در سطوح مختلف انرژی مدل حجمی دو مخروطی نسبت به سایر مدل‌ها مناسب‌تر است. در نتیجه مدل حجمی دو مخروطی به عنوان مدل برتر در شبیه‌سازی جوشکاری لیزر عمیق ورق‌های ضخیم مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ انتخاب می‌شود.



شکل ۲۳- توزیع تنش پسماند طولی پس از اتمام جوشکاری

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش اجزای محدود برای مقایسه اتصال نامتجانس بین مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ استفاده شد. تطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی با انتظاراتی که از خواص مواد می‌رفت و با استفاده از اعتبار سنجی نتایج سایر محققان نشان داد که می‌توان اطمینان بسیار بالا از روش اجزای محدود ارائه شده در تحلیل حرارتی و مکانیکی جوشکاری استفاده نمود. در ادامه به عنوان پیشنهاد برای کارهای آتی می‌توان تاثیر پارامترهای جوشکاری پالسی لیزری از جمله فرکانس، زمان روشنی و خاموشی پالس، میزان همپوشانی و سرعت روبش پرتو را بر روی تنش‌های پسماند و کرنش‌های الاستیک-پلاستیک اندازه‌گیری و تحلیل کرد. همچنین سایر نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- براساس تحلیل به دست آمده از سطح مقطع اتصال جوش، می‌توان بیان کرد که سرعت بالاتر جوشکاری، عرض کمتر جوش را نتیجه می‌دهد. بیشترین عرض جوش در شرایط سرعت جوشکاری ۳۵ میلی‌متر بر ثانیه (با توان لیزر ۲۶۰۰ وات و فاصله کانونی صفر) گزارش شده است. کمترین عرض جوش نیز با سرعت جوشکاری ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه با توان ۲۹۰۰ وات و فاصله کانونی صفر ثبت شد.
- ۲- تأثیر پارامترهای توان لیزر و سرعت روبش لیزر از طریق آزمایشات تجربی و همچنین با اعمال مدل حرارتی-مکانیکی مبتنی بر روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. دقت مدل عددی با ترکیب شدن اثر لیزر و سرعت اسکن که به تفسیر رفتار حرارتی-مکانیکی فرآیند جوشکاری لیزر نامتجانس کمک می‌کند، بیشتر می‌شود.

مراجع

- [1] Z. Malekshahi Beiranvand, F. Malek Ghaini, H. Naffakh Moosavy, M. Sheikhi, M. J. Torkamany, and M. Moradi, "The relation between magnesium evaporation and laser absorption and weld penetration in pulsed laser welding of aluminum alloys: Experimental and numerical investigations," *Optics and Laser Technology*, Vol. 128, pp. 106170, Aug. 2020.
- [2] W. Huang, H. Wang, T. Rinker, and W. Tan, "Investigation of metal mixing in laser keyhole welding of dissimilar metals," *Materials and Design*, Vol. 195, pp. 109056, 2020.
- [3] M. S. Akella, M. V. Harinadh, M. Y. Krishna, and M. R. K. Buddu, "A Welding Simulation of Dissimilar Materials SS304 and Copper", *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 2440–2449, 2014.
- [4] S. T. Auwal, S. Ramesh, F. Yusof, and S. M. Manladan, "A review on laser beam welding of copper alloys", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 96, No. 1–4, pp. 475–490, 2018.
- [5] A. Shamsolhodaei, J. P. Oliveira, N. Schell, E. Maawad, B. Panton, and Y. N. Zhou, "Controlling intermetallic compounds formation during laser welding of NiTi to 316L stainless steel", *Intermetallics*, Vol. 116, pp. 106656, Jan. 2020.
- [6] S. A. G.H. Majzoobi, and R. Seifi, "Experimental and numerical study of temperature distribution and determination of residual stresses due to welding of plates", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 9, No. 27, 2012.
- [7] L. Wang et al., "Simulation of dendrite growth in the laser welding pool of aluminum alloy 2024 under transient conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 246, pp. 22–29, 2017.
- [8] Z. Lei et al., "Finite-element inverse analysis of residual stress for laser welding based on a contour method", *Optics and Laser Technology*, Vol. 129, pp. 106289, Sep. 2020.
- [9] C. Heinze, C. Schwenk, and M. Rethmeier, "Effect of heat source configuration on the result quality of numerical calculation of welding-induced distortion", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 20, No. 1, pp. 112–123, 2012.
- [10] S. Meco, L. Cozzolino, S. Ganguly, S. Williams, and N. McPherson, "Laser welding of steel to aluminium: Thermal modelling and joint strength analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 247, pp. 121–133, 2017.
- [11] M. Mohammadpour, N. Yazdian, G. Yang, H. P. Wang, B. Carlson, and R. Kovacevic, "Effect of dual laser beam on dissimilar welding-brazing of aluminum to galvanized steel", *Optics and Laser Technology*, Vol. 98, pp. 214–228, 2018.
- [12] Q. Nguyen, A. Azadkhou, M. Akbari, A. Panjehpour, and A. Karimipour, "Experimental investigation of temperature field and fusion zone microstructure in dissimilar pulsed laser welding of austenitic stainless steel and copper", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 56, pp. 206–215, Aug. 2020.
- [13] M. Sahul, M. Sahul, M. Turňa, and P. Zacková, "Disk Laser Welding of Copper to Stainless Steel", *Advanced Materials Research*, Vol. 1077, No. August 2015, pp. 76–81, 2014.
- [14] A. Mannucci, I. Tomashchuk, V. Vignal, P. Sallamand, and M. Duband, "Parametric study of laser welding of copper to austenitic stainless steel", *Procedia CIRP*, Vol. 74, pp. 450–455, 2018.
- [15] Y. Geng, M. Akbari, A. Karimipour, A. Karimi, A. Soleimani, and M. Afrand, "Effects of the laser parameters on the mechanical properties and microstructure of weld joint in dissimilar pulsed laser welding of AISI 304 and AISI 420", *Infrared Physics and Technology*, Vol. 103, p. 103081, Dec. 2019.
- [16] C. Heinze, C. Schwenk, and M. Rethmeier, "Influences of mesh density and transformation behavior on the result quality of numerical calculation of welding induced distortion", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19, No. 9, pp. 1847–1859, 2011.
- [17] Z. Xue, S. Hu, D. Zuo, W. Cai, D. Lee, and K. A. Elijah, "Molten pool characterization of laser lap welded copper and aluminum", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 46, No. 49, 2013.
- [18] H. Liu, T. E. Sparks, F. W. Liou, and D. M. Dietrich, "Numerical analysis of thermal stress and deformation in multi-layer laser metal deposition processes", *24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2013*, pp. 577–591, 2013.
- [19] H. Huang, S. Tsutsumi, J. Wang, L. Li, and H. Murakawa, "High performance computation of residual stress and distortion in laser welded 301L stainless sheets", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 135, No. July, pp. 1–10, 2017.

[20] S. Rostami, N. Ahmadi, and S. Khorasani, "Experimental investigations of thermo-exergitic behavior of a four-start helically corrugated heat exchanger with air/water two-phase flow", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 145, No. July, pp. 106030, 2019.

[21] P. Tekriwal and J. Mazumder, "Finite Element Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Transfer in Gma Welding", *Welding Journal (Miami, Fla)*, Vol. 67, No. 7, pp. 150–156, 1988.

[22] M. Baruah and S. Bag, "Influence of pulsation in thermo-mechanical analysis on laser micro-welding of Ti6Al4V alloy", *Optics and Laser Technology*, vol. 90, no. November 2016, pp. 40–51, 2017.

[23] A. Evdokimov, N. Doynov, R. Ossenbrink, A. Obrosov, S. Weiß, and V. Michailov, "Thermomechanical laser welding simulation of dissimilar Steel-Aluminum overlap joints", *International Journal of Mechanical Sciences*, pp. 106019, Aug. 2020.

[24] G. A. Moraitis and G. N. Labeas, "Prediction of residual stresses and distortions due to laser beam welding of butt joints in pressure vessels", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, No. 2–3, pp. 133–142, 2009.

[25] F. Farrokhi, B. Endelt, and M. Kristiansen, "A numerical model for full and partial penetration hybrid laser welding of thick-section steels", *Optics and Laser Technology*, Vol. 111, No. September, pp. 671–686, 2019.

[26] S. Ramchandran and A. K. Lakshminarayanan, "An insight into microstructural heterogeneities formation between weld subregions of laser welded copper to stainless steel joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, Vol. 30, No. 3, pp. 727–745, 2020.

[۲۷] رامین عابدی فرد و سیف‌الله سعدالدین، "مدل کردن جریان سیال مذاب و انتقال حرارت غیرفوری ای در جوشکاری سوراخ کلیدی با قوس پلاسما"، *نشریه مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۴، شماره ۴۴، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۳۵–۴۷.

[۲۸] رحمن سیفی، محسن موسوی ریگی و وحید آذری فر، "بررسی تجربی و عددی تأثیر شکل جوش در انتهای اتصال سپری بر تنش‌های پسماند"، *نشریه مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۰، شماره ۲۹، تابستان ۱۳۹۱، صفحه ۸۱–۹۰.