علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال اول، شماره ۱، پاییز و زمستان ۹۴، صفحه ۳۷-۲۴

شبیه سازی سیلان پلاستیک و مورفولوژی اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیرمشابه فولاد زنگ نزن به آلیاژ آلومینیوم

بهزاد صادقیان، مسعود عطاپور ، ابوذر طاهری زاده

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

پست الکترونیکی: b.sadeghian@ma.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۸ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۴/۰۸/۱۲)

چکیده

اتصالات فولادها به آلیاژهای آلومینیوم امروزه به‌منظور کاهش مصرف سوخت و سهولت حمل‌ونقل بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. این اتصالات از صنایع هسته ای، هوافضا و دریایی تا صنایع خودرو و آشپزخانه استفاده می شوند. از آن جا که در تحقیقات پیشین جوشکاری های ذوبی روش های مناسبی برای این اتصالات گزارش نشده اند. ازاین‌رو، گرایش به سمت استفاده از روش های حالت جامد از جمله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی افزایش یافته است. با این حال، استفاده از این روش نیاز به شناخت کافی از نحوه سیلان دو ماده، تغییرات دمایی و همچنین پیش بینی مورفولوژی اتصال دارد. در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود مدلی حرارتی از توزیع دما ساخته شده و نتایج آن بصورت حل پیوسته با حل دینامیک سیالات محاسباتی استفاده گردید. درنتیجه سرعت سیلان ماده، نرخ کرنش و گرانروی دینامیکی در هر نقطه بدست آمد. بعلاوه، مورفولوژی اتصال با استفاده از روش سطح تراز پیش بینی گردید. نشان داده شد که سیلان مواد به شدت به دما و نرخ کرنش وابسته است از این رو سرعت چرخشی تاثیر بسزایی در سیلان ماده دارد. بعلاوه آفست به سمت آلومینیوم خواص مورفولوژی بهتری را در منطقه اغتشاش ایجاد می نماید.

کلمات کلیدی: شبیه سازی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، اتصال غیرمشابه، سیلان پلاستیک، مورفولوژی اتصال.

Simulation of Material Plastic Flow and Morphology During Friction Stir Welding of Stainless Steel to Aluminum Alloy Dissimilar Joint

B. Sadeghian , M. Atapour , A. Taherizadeh

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology,Iran

(Received 9 September 2015 ; Accepted 3 November 2015)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

Abstract
Today, steel to aluminum joints are used to facilitate transportation and fuel consumption. These joints are applied from nuclear, aerospace and naval to automobile and kitchen industries. According to previous studies fusion welding processes are not suitable methods for these joints, solid-state welding, especially friction stir welding, is a proper way to use for these joints. However, using this method for these two metals needs adequate prediction of temperature distribution and material flow to obtain enhanced joints. In this study, a finite element method is used to predict the temperature distribution. In addition, a computational fluid dynamics solution is coupled with the thermal solution. Therefore, the flow rate, strain rate and dynamic viscosity is obtained. Also, the joint morphology is predicted using the Level Set method. It is shown the material flow depends on flow rate, strain rate and dynamic viscosity and is intensively function of rotational speed. Additionally, offset to the aluminum side improves the morphology of the stir zone.

Keywords: Simulation, Friction stir welding, Dissimilar joint, Material Plastic flow, Morphology.

۱-مقدمه

در صنعت کنونی به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی و آسان نمودن حمل و نقل، نیازمند اتصال آلیاژهای آلومینیوم به عنوان فلز سبک تر به فولادها و از جمله فولادهای زنگ نزن می باشیم. اتصالات آلومینیوم به فولاد زنگ نزن کاربردهای متنوعی از صنایع حمل و نقل دریایی گرفته تا رآکتور هسته ای و وسایل آشپزخانه دارند. گفتنی است، مقاومت به خوردگی مناسب فولاد زنگ نزن و نیز آلیاژ آلومینیوم- منیزیم باعث شده تا اتصال غیرمشابه این دوفاز مورد توجه صنایع قرار بگیرد. از آن جا که روش های ذوبی دارای نقص و کمبودهایی برای اتصالات غیرمشابه هستند از این رو روش های حالت جامد برای این اتصالات بیشتر مورد توجه واقع شده است. از جمله عیوبی که در حین جوشکاری ذوبی فولادها به آلیاژهای آلومینیوم مشاهده می شود می توان به عدم جوش خوردگی دو فلز، سیلان بیش از حد آلومینیوم و ایجاد ترک های انجمادی اشاره کرد[۱, ۲].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از فرایندهای حالت جامد می باشد که یک ابزار چرخشی غیر مصرفی داشته که این ابزار فرآیند با چرخش و وارد شدن به دو ورقی که محکم کنار هم قرار گرفته اند، تولید اصطکاک و حرارت کرده و اتصال را ایجاد می کند. در این فرآیند ابزار چرخشی با شانه و پین موجود در سر آن تولید حرارت می کند و عمل اتصال را ایجاد می نماید. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سال ۱۹۹۱ در موسسه جوشکاری انگلستان (TWI) ابداع و گسترش این فرآیند توسط لاکهید مارتیندر سال ۱۹۹۵ صورت گرفت[۳].

درطی فرایندجوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، حرارت ناشی ازاصطکاک موجب نرم شدن ماده دراطراف پین ودرنتیجه سیلان آن تحت سرعت چرخشی ابزارمی گردد.رفتار سیلان مواد در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از مهمترین عواملی است که بر کیفیت نهایی جوش تاثیر می گذارد و خواص آن را به طور چشمگیری تحت تاثیر قرار می دهد. به منظور بررسی این رفتار پژوهشگران روش های عملی مختلفی را مورد بررسی قرار دادند. از جمله این روش ها می شود به مارکر مواد، Stop-Action، روشX-Ray Transmission، Ball Tracing فولادها و نیز متالوگرافی مقاطع جوشکاری شده اشاره نمود[۳, ۴]. در حقیقت با نگاهی به این تحقیقات این نتیجه حاصل می شود که بررسی رفتار سیلان مواد در حین FSW با روش های عملی مسئله ای سخت و پیچیده به نظر می رسد. مدلسازی این فرایند با روش های عددی بسیار می تواند مفید باشد، چرا که با کمترین میزان هزینه دسترسی کامل به فرایند و پارامترهای آن داشته و امکان بهینه سازی پارامترهای فرایند نیز وجود دارد.

روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بدین منظور در پژوهش های اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. سیدل و رینولدز[۵]، یک مدل دوبعدی کوپل شده با مدل حرارتی ارائه دادند. این مدل با فرض جریان آرام، ویسکوز و غیرنیوتونی در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

اطراف پین ایجاد گردید. آن ها نشان دادند که انتقال مواد به طور عمده در RS اتفاق می افتد. بندزاک و همکاران [۶]، در تحقیقاتی عملی گرانروی[1] آلیاژ آلومینیوم را تابعی از نرخ کرنش و دما بدست آوردند. اولیس [۷]با ساخت مدل ویسکوپلاسیک سه بعدی تاثیر پارامترهای سرعت را بر دما و نیروها در حین FSW بدست آوردند. ناندان و همکاران [۸, ۹]، تاثیرسرعت های سیلان مواد در حین FSW را برای هم آلیاژ آلومینیوم و هم فولاد زنگ نزن ۳۰۴ بدست آوردند. در این تحقیق آن ها گرانروی غیرنیوتونی را تابعی از دما و نرخ کرنش درنظر گرفتند. گفتنی است حل حرارتی بکار برده در تحقیق آن ها حل حالت پایدار بود. کیم و همکاران [۱۰]، با استفاده از روش حجم محدود به بررسی توزیع حرارت و نیز سیلان ماده حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ پرداختند. آن ها نشان دادند روش CFD نسبت به روش های پیشنهاد شده دیگر مثل ALE کارایی بهتری دارد اگرچه پدیده سخت شدن مواد را نمی تواند بررسی کند[۱۱].

با بررسی مروری مقالات پیشنهاد شده برای شبیه سازی سیلان پلاستیک ماده در جوشکاری FSW این مسئله استنباط می گردد که بررسی این پدیده در جوشکاری غیرمشابه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که در یک جوشکاری غیرمشابه از جمله فولاد زنگ نزن به آلومینیوم که اختلاف دانسیته و نقطه ذوب بسیار زیاد است، بررسی این پدیده به منظور جلوگیری و یا کاهش عیوب احتمالی بسیار احساس می گردد. روش های کنونی که از معادله مرسوم نویر- استوکس استفاده می کنند عدم توانایی در نمایش نحوه در هم آمیختن شده دو فاز مجزا را دارند. توماشوک و همکاران [۱۲]،با بهره گیری از روش سطح تراز(Level set)، مورفولوژی اتصال در مرز مشترک فولاد و مس را در جوشکاری لیزر بررسی نمودند. در این روش ، آن ها مضاف بر بدست آوردن سرعت سیلان مواد و خطوط جریان، نحوه مخلوط شدن مذاب فولاد و مس را حین جوشکاری در یک حل کوپل با حل حرارتی حالت پایدار بدست آوردند. روش Level set توسط اوشر و ستیان ابداع گردید و رسالت اصلی آن تعقیب مرز مشترک بین دوفاز می باشد[۱۳].

در این پژوهش، با توجه به اهمیت بررسی سیلان ماده حین جوشکاری FSW فولاد زنگ نزن به آلومینیوم، هدف بررسی پارامترهای جوشکاری از جمله سرعت چرخشی و افست بر سیلان پلاستیک این مواد حین جوشکاری با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. گفتنی است از آن جا که گرانروی وابستگی شدیدی به دما دارد، از این رو استفاده از یک حل حرارتی بصورت کوپل با حل مورد نظر بسیار ضروری می باشد. در این پژوهش از دیگر اهداف، استفاده از یک حل حرارتی حالت پایدار به صورت کوپل با حل دینامیک سیالات مورد نظر و نیز ارتقا و بهبود حل حرارتی حالت پایدار در قیاس با روش های روتین با استناد به نتایج عملی می باشد. همچنین هدف دیگر این تحقیق، بررسی اثر پارامترهای مذکور بر مورفولوژی اتصال حین فرایند FSW دو فاز فولاد زنگ نزن به آلومینیوم به روش Level Set می باشد.

۲- شبیه سازی حرارتی

۲-۱- معادله انتقال حرارت

از آن جا که مدل سازی عددی سیلان پلاستیک ماده نیازمند محاسبه گرانروی می باشد و نیز گرانروی به شدت وابسته به توزیع دمایی در قطعه است، از این رو نیازمند حل حرارتی هستیم که دما را در هر نقطه در یک لحظه از زمان جوشکاری محاسبه کند. بدین منظور از معادله انتقال حرارت در حالت پایدار و عدم وابسته به زمان استفاده می گردد. طبق این معادله در این حل زمان تغییر نمی کند اما در عوض یک پارامتر سرعت در جهت x در معادله وارد می گردد و عملا یک حرکت انتقالی برای منبع حرارتی درنظر گرفته می شود. مزیت این حل نسبت به حالت گذرا پایین تر بودن زمان حل آن است.درروابط فوق، k (W/m^3) ضریب انتقال حرارت درجهات x, y, z ρ (Kg/m^3) چگالی، C_p (J/Kg.K)می باشد. بعلاوه ترم$\dot{Q}(W/m2.s)$ که برابرمجموع حرارت های ایجادشده ناشی ازاصطکاک بین ابزاروقطعه وبعلاوه حرارت ناشی

1 Viscosity

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

ازتغییرشکل پلاستیک درواحدسطح برثانیه می باشد[۴, ۸, ۹].

$$\rho Cp\ U(\nabla T)=\nabla(k\nabla T)+Q^{\cdot} \quad (۱)$$

در این پژوهش به منظور افزایش دقت حل حرارتی در نقاط ابتدایی و انتهایی قطعه، از المان های نامحدود در دو سر قطعه استفاده گردید. ر روش المان های نامحدود[1] (IEM)، المان ها چنان فرض می شوند که مواد مورد استفاده در آن ها تا بینهایت ادامه داشته و دمای آن ها در بینهایت صفر فرض می گردد. با این کار اثر حرارت دیدن بیش از حد لبه ها حذف می گردد. در این پژوهش به منظور اعمال المان های نامحدود در مسئله از المان های نامحدود نگاشت شده[2] استفاده گردید. در این روش مختصات محلی از محدوده المان محدود تا محدوده بی نهایت ادامه می یابد، درنتیجه مرزها تا بی نهایت کشیده می شوند و اثر منفی آن ها بر نتایج کمتر می گردد[۱۴-۱۶].

۲-۲- شرایط مرزی

مهمترین مسئله در یک حل حرارتی انتخاب درست شرایط مرزی می باشد. معادلات زیر شرایط مرزی مختلف را در یک قطعه نشان می دهند، در این معادلات، دمای اولیه قطعه معادل ۳۰۰ K (مطابق معادله (۲))، شرط مرزی همرفت با ضریب همرفت $h=10\ (W/m^2K)$ برای سطح بالا مطابق معادله (۳) و کناره های قطعه و نیز $hb=50\ (W/m^2K)$ برای سطح زیرین قطعه درنظر گرفته می شود(مطابق معادله (۴)) همچنین شرط انتقال حرارت از طریق تشعشع نیز برای سطح بالایی و کناری قطعه مطابق معادله (۵) درنظر گرفته شد که شامل ضریب تشعشع و ضریب استفان بولتزمن می باشد[۱۷, ۱۸].

$$T(x,y,z,t)=T_0 \quad (۲)$$

$$k\frac{\partial T}{\partial n}=h(T-T_a) \quad (۳)$$

$$k\frac{\partial T}{\partial n}=h_b(T-T_a) \quad (۴)$$

$$k\frac{\partial T}{\partial n}=\varepsilon B(T^4-T_0{}^4) \quad (۵)$$

مهمترین شرط مرزی که دریک مسئله جوشکاری می بایست درنظر گرفت، حرارت ایجاد شده بین قطعه و ابزار می باشد. در این تحقیق،این حرارت بصورت حرارت بین شولدر و قطعه درنظر گرفته می شود و از حرارت پین و قطعه به علت کم بودن مقدار صرف نظر می گردد. این حرارت شامل حرارت ناشی از اصطکاک و نیز تغییر شکل پلاستیک می باشد. حرارت درنظر گرفته شده برای این پژوهش مطابق رابطه (۶) می باشد. در این رابطه، γ برابر ۱، f نسبت حرارت ورودی به قطعه به کل حرارت است که مطابق رابطه (۷) بدست می آید. F پارامتر حرارت خالص تولید شده ناشی از اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک می باشد. در رابطه (۸)S پارامتر لغزش می باشد. و نیز δ پارامتر مربوط به چسبندگی می باشد. در واقع در رابطه مربوط به F بین حرارت ناشی از اصطکاک که از فشار و ضریب اصطکاک حاصل می شود و نیز حرارت ناشی از تغییر شکل پلاستیک که به تنش برشی تسلیم مواد وابسته است تفکیک قائل شده است. در این رابطه μ ضریب اصطکاک برابر ۰/۴، PN فشار حاصل از نیروی عمودی، τ تنش تسلیم برشی ماکزیمم می باشد و S برابر ۰/۷ بدست آمده است. گفتنی است روابط مربوط به محاسبه S و μدر تحقیقات گذشته آمده است[۱۸]. بعلاوه مطابق تحقیق لیو و همکاران [۱۹]، می بایست برای معادله حرارت تولید شده در اتصال غیرمشابه، میانگین حرارت های تولیدی با درنظر گرفتن نسبت سطوح مدنظر گرفته شود.

$$Q=\frac{1}{A_t}((\gamma.f.F(\omega r-u\psi Sin\theta)\int dA_1)_{SS}+(\gamma.f.F(\omega r-u\psi Sin\theta)\int dA_2)_{Al}) \quad (۶)$$

$$f=\frac{\sqrt{(k\rho Cp)_\omega}}{\sqrt{(k\rho Cp)_\omega}+\sqrt{(k\rho Cp)_T}} \quad (۷)$$

$$F=(1-S)\tau\eta+S(\delta\tau\eta+(1-\delta)\mu P_T) \quad (۸)$$

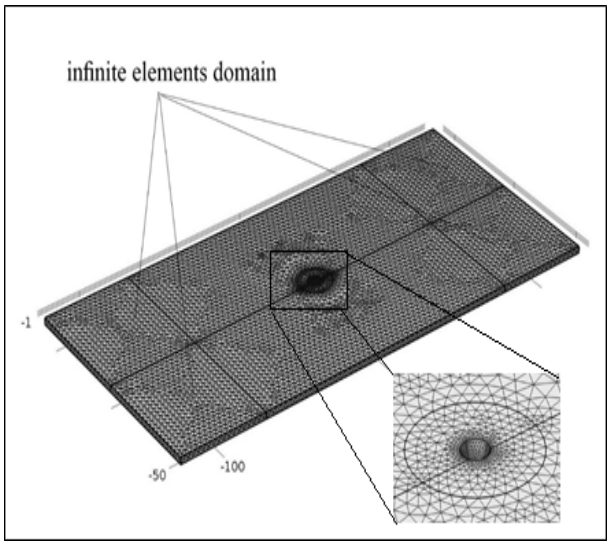
۲-۳- هندسه ومش بندی قطعه

ابعاد قطعه بصورت۳mm ×۶۰×۱۵۰ و شعاع ها۹ mm برای شولدر و۳mm برای پین درنظر گرفته شدند. برای مش بندی پین و شولدر المان های چهاروجهی و برای مابقی قطعه المان های شش وجهی درنظر گرفته شد. در این تحقیق از المان های نامحدود به منظور رفع مشکل دما در مرز استفاده

1 Infinite Element Method
2 Mapped Infinite Elements

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

شده است (شکل(۱)). المان های نامحدود چنان فرض می شوند که مواد مورد استفاده در آن ها تا بینهایت ادامه داشته و دمای آن ها در بینهایت صفر فرض می گردد. تمامی مراحل ساخت مدل، مش بندی و حل مسئله از نرم افزار کامسول[1] ورژن a۴.۳ استفاده گردید. ارزیابی استقلال شبکه با استفاده از جدول (۱) بررسی شد. نشان داده شد که اندازه مش ها طبق الگوی ردیف ۵ مناسب ترین حالت برای این تحقیق می باشد.



شکل۱-نمای مدل شبکه بندی شده برای حل حرارتی با استفاده از المان های نامحدود

۳- شبیه سازی سه بعدی سیلان پلاستیک مواد

۳-۱- معادلات مورداستفاده

در این تحقیق به منظور مدلسازی سیلان پلاستیک ماده، مواد مورد استفاده در حین جوشکاری بصورت سیالاتی با گرانروی غیرنیوتونی درنظر گرفته می شوند. معادله پیوستگی برای ماده تک فاز بصورت رابطه (۹) نشان داده شده است که U نمایشگر سرعت سیلان پلاستیک می باشد.

معادله ممنتوم تک فاز حالت پایدار بصورت رابطه (۱۰) استفاده گردیده است. که ρ دانسیته و μگرانروی غیرنیوتونی و P فشار سیال، Uو Xسرعت و جابجایی می باشند. گفتنی است در این مدل از یک حل حالت پایدار استفاده گردیده است که معادله انرژی آن مطابق رابطه (۱۱) می باشد. همچنین برای محاسبه نرخ کرنش روابط (۱۲) و (۱۳) استفاده شدند[۳, ۸-۱۰].

$$\nabla . U = 0 \quad (۹)$$

$$\rho U . \nabla U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U \quad (۱۰)$$

$$\rho C_p U(\nabla T) = \nabla(k \nabla T) + \dot{Q} \quad (۱۱)$$

$$\dot{\varepsilon} = (\frac{2}{3}\varepsilon_{xy}\varepsilon_{xy})^{1/2} \quad (۱۲)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}(\frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y}) \quad (۱۳)$$

۳-۲- شرایط مرزی مورد استفاده

از آن جا که فلزهای مورد استفاده سیال درنظر گرفته می شوند که در زیر یک ابزار درحال چرخش سیلان می کنند، از این رو قسمت شولدر، دیواره و کف پین به عنوان دیوار در حال چرخش درنظر گرفته شدند. سرعت چرخش این دیوار در جهات x و y در روابط (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است که r شعاع مختصات قطبی با اندازه بین شعاع پین و شولدر می باشد [۸, ۹]. مابقی سطوح به عنوان دیوار متحرک با سرعت برابر سرعت خطی جوشکاری و جهت خلاف آن مدنظر قرار گرفتند. بعلاوه سرعت درنظر گرفته شده برای پین بصورت روابط (۱۶) و (۱۷) که در آن یک ضریب چسبندگی درنظر گرفته شده است[۲۰].

$$u=\omega r\sin\theta - U \quad (۱۴)$$

$$v=\omega r\cos\theta \quad (۱۵)$$

$$u=\delta\omega r\sin\theta - U \quad (۱۶)$$

$$v=\delta\omega r\cos\theta \quad (۱۷)$$

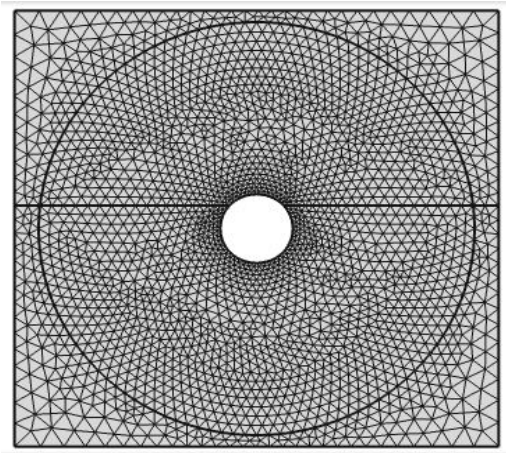
۴- بررسی مورفولوژی اتصال فلزات حین جوشکاری

به منظور بررسی مورفولوژی تشکیل اتصال بین دو فلز، از روش Level set در عین استفاده از معادلات دینامیک سیالات محاسباتی استفاده گردید. در این تحقیق به منظور کاهش زمان محاسبات از یک مدل دوبعدی استفاده گردید. هندسه مدل در واقع مقطعی عرضی از قطعه درحال جوشکاری بوده و شامل نمونه های فولاد و آلومینیوم و پین می باشد. مطابق شکل (۲) هندسه قطعه درنظر گرفته شده و المان های مثلثی برای قطعه درنظر گرفته شده است. گفتنی است نتایج حرارتی حالت

1 COMSOL Multiphysics 4.3a

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

سه بعدی در این مقطع از قطعه به عنوان پیش فرض به مدل اعمال گردیده است.



شکل ۲- هندسه شبکه بندی شده مدل برای شبیه سازی با روش سطح تراز

معادلات مورد استفاده برای سیلان ماده مشابه معادلات پیشین بوده اما مسئله بسیار مورد اهمیت در این مدل بررسی حرکت فصل مشترک بین دو ماده در حین جوشکاری می باشد. تابع Level setمطابق رابطه (۱۸)، حد بین دو فاز را در فصل مشترک قائل می شود. این روش حرکت مرز و فصل مشترک را در عین ثابت بودن نودها امکان پذیر می کند[۱۳, ۲۱].∅ تابع Level set بوده و از ۰ به عنوان محدوده فاز فولاد تا ۱ که محدوده فاز آلومینیوم می باشد تغییر می کند. در این تابع ε ضخامت منطقه مرز مشترک را وقتی تابع از ۰ تا ۱ تغییر کند نشان می دهد. همچنین γطبق (۱۹) میزان شروع مجدد تابع را نشان می دهد که تابعی از سرعت سیستم و نیز تنش بین دو سیال است. گفتنی است مرز ابتدایی بین دوفاز آلومینیوم و فولاد مطابق رابطه (۲۰) و (۲۱) می باشد. در این مدل حل به دو مرحله تقسیم می گردد اول Initialization سیستم هست که مرز ابتدایی را بین دو فلز قائل می گردد و یک حل حالت پایدار می باشد و پس از آن حل حالت گذرا برای سیلان پلاستیک و نیز حرکت فصل مشترک بین دو فلز اجرا می گردد[۱۲].

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial t} + \overrightarrow{U_r}.\vec{\nabla}\emptyset = \gamma.\vec{\nabla}(\varepsilon.\vec{\nabla}\emptyset - \emptyset.(1-\emptyset).\frac{\vec{\nabla}\emptyset}{|\vec{\nabla}\emptyset|}) \quad (۱۸)$$

$$\gamma = \frac{u}{\sigma} \quad (۱۹)$$

$$\vec{n}.(\overrightarrow{N_1} - \overrightarrow{N_2}) = 0 \quad (۲۰)$$

$$\vec{N} = \varepsilon.\vec{\nabla}\emptyset - \emptyset.(1-\emptyset).\frac{\vec{\nabla}\emptyset}{|\vec{\nabla}\emptyset|} - \emptyset.\overrightarrow{U_r} \quad (۲۱)$$

۵-خواص فیزیکی مواد مورد استفاده

در این تحقیق از فلز فولاد رنگ نزن ۳۰۴ و نیز آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ استفاده گردید. با توجه به معادلاتی اشاره شده در بخش های پیشین، ضرایب و پارامترهای مورد استفاده از جمله هدایت حرارتی، چگالی، ظرفیت حرارتی و نیز پارامترهای کاربردی برای محاسبه حرارت ایجاد شده از جمله تنش تسلیم برشی بر حسب دما برای هر دو فلز در شکل های (۳) تا (۴) آمده است. گفتنی است مهمترین پارامتر برای یک مدل سیلان پلاستیک ماده گرانروی دینامیکی است که تابع دما و نرخ کرنش می باشد. معادله (۲۲) نشان دهنده گرانروی مورد استفاده در این تحقیق می باشد. در این رابطه تابع، σ تنش سیلان ماده بوده و خود از رابطه (۲۳) پیروی می کند که در آن Z رابطه زنر- هولومن می باشد و ثوابت ماده برای فولاد زنگ نزن و آلیاژ آلومینیوم از مراجع استخراج گردیده اند[۳, ۸-۱۰].

$$\mu = \frac{\sigma(T,\dot{\epsilon})}{3\dot{\epsilon}} \quad (۲۲)$$

$$\sigma(T,\dot{\epsilon}) = \frac{1}{\alpha}\ln\left[\left(\frac{Z(T,\dot{\epsilon})}{A}\right)^{\frac{-1}{n}} + \left[1+\left(\frac{Z(T,\dot{\epsilon})}{A}\right)^{\frac{2}{n}}\right]^{1/2}\right] \quad (۲۳)$$

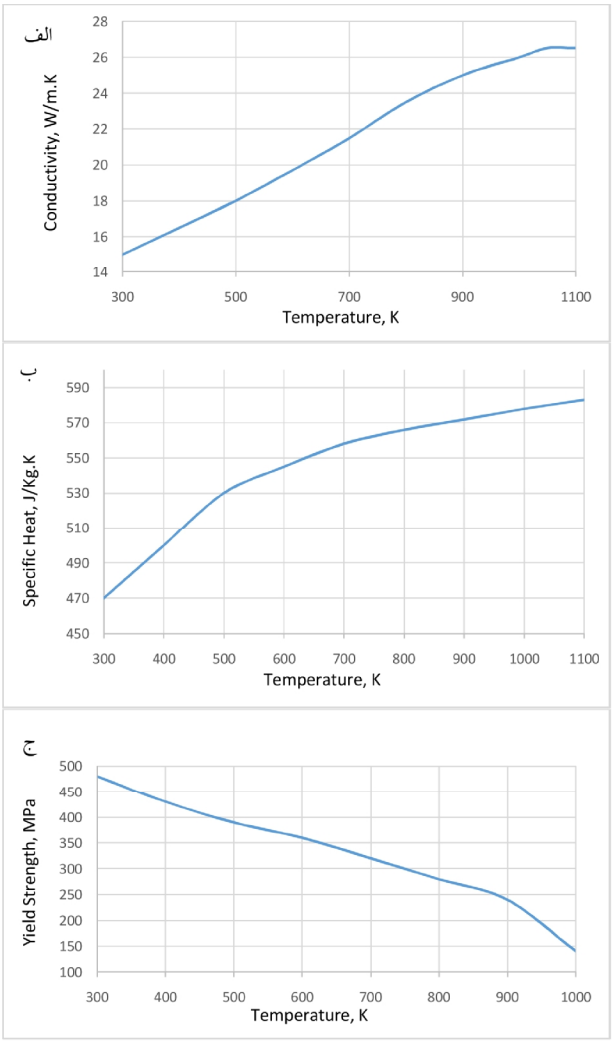
$$Z(T,\dot{\epsilon}) = \dot{\epsilon}\exp(\frac{-Q}{RT}) \quad (۲۴)$$

۶-مواد و روش تحقیق

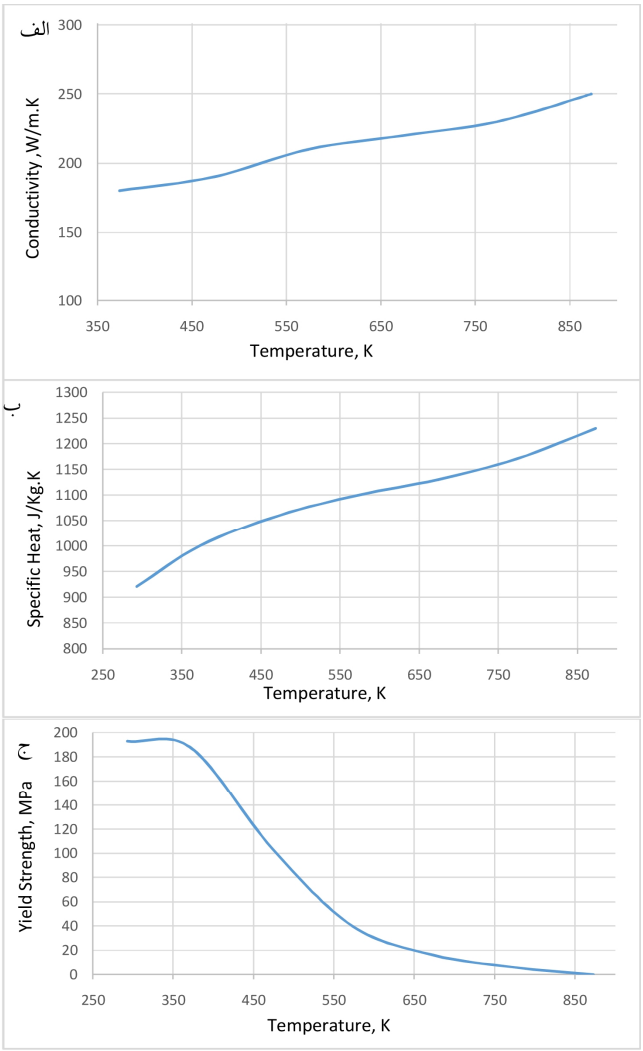
در این تحقیق به منظور صحت سنجی نتایجی که از شبیه سازی،جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به ابعاد3 mm ×60×150 انجام شد. پس از آماده سازی نمونه ها دو ترموکوپل نوع K در قسمت میانی قطعه عمود بر خط جوش به عمق1/5 mm قرار داده شد و روی ترموکوپل ها عایق حرارتی قرار داده شد تا هدر رفت حرارت و ایجاد خطا در اندازه گیری حداقل گردد. ترموکوپل ها هرکدام به فاصله9 mm در سمت فولاد و11 mm در سمت آلومینیوم از خط مرکزی جوش قرار گرفتند.

ابزار مورد استفاده WC-Co بوده و شعاع شولدر برابر 9 mm و پین مخروطی با شعاع ۴ به ۲و نیز ارتفاع پین معادل 2/7 mm بود و شولدر به اندازه ۳ درجه تقعر داده شد. بعلاوه آفستی به اندازه 1 mm به سمت آلومینیوم داده شد، این کار موجب می گردد که از ورود ذرات درشت فولاد به داخل آلومینیوم تا

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]



شکل ۳. تغییرات ضریب هدایت حرارتی وظرفیت حرارتی بادما برای فولاد زنگ نزن ۳۰۴.



شکل ۴. تغییرات ضریب هدایت حرارتی وظرفیت حرارتی بادما برای آلومینیوم ۵۰۸۳.

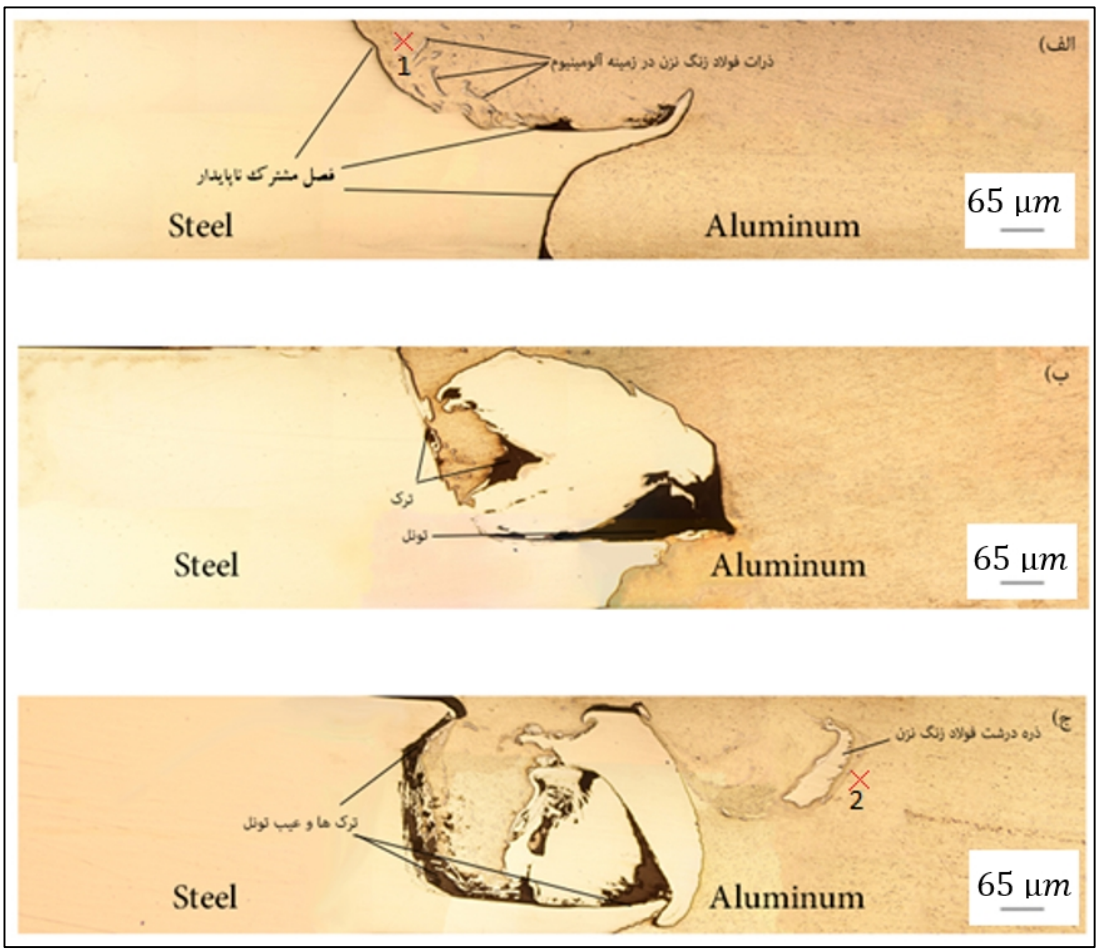
حد امکان جلوگیری بعمل آید و کیفیت جوش بالاتر برود. برای جوشکاری قطعه از دستگاه فرز عمودی استفاده شد. نیروی فرز معادل 30 KN بوده و سرعت چرخشی500 RPM درنظر گرفته شد. گفتنی است، جوشکاری در دو سرعت خطی 40 mm/min و ۸۰ در سرعت های چرخشی مختلف از 350 RPM تا700RPM صورت گرفت.

۷- نتایج و بحث

۷-۱- بررسی ساختار فلز جوش

شکل (۵) نشان دهنده مقطع عرضی منطقه اتصال فولاد زنگ نزن به آلومینیوم جوشکاری شده در سرعت چرخشی 350 RPM و سرعت خطی 80mm/min می باشد. مطابق این شکل، ملاحظه می شود که منطقه اتصال فولاد زنگ نزن به آلومینیوم در جوشکاری حالت جامد می تواند به ایجاد عیوب و ترک ها حساس باشد. در واقع در پارامترهای فوق دما به اندازه کافی بالا نرفته و سیلان و نفوذ ماده به خوبی صورت نخواهد گرفت از این رو اتصال فصل مشترک ناپایدار می شود. از طرفی با افزایش سرعت چرخشی عیوب بیشتری مشاهده می شوند. این افزایش عیوب ناشی از بالا رفتن دما بوده، سیلان بیشتر شده اما از طرفی ذرات بیشتری از فولاد در زمینه آلومینیوم پراکنده شده اند و عیوب افزایش یافته اند[۲, ۲۲, ۲۳].از این رو کنترل پارامترها حین جوشکاری و کنترل حرارت ورودی بسیار

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]



شکل ۵- تصویر میکروسکوپی نوری اتصال فولادزنگ نزن به آلومینیوم درسرعت الف) RPM350، ب) RPM 500 و ج) RPM 700

می تواند موثر باشد. مسئله مهمی که در این تصویر دیده می شود کشیدگی فولاد به سمت آلومینیوم در داخل و نیز سیلان آلومینیوم در سطح قطعه به سمت فولاد در منطقه اغتشاش است. از این رو مسئله نحوه سیلان مواد حین جوشکاری و تاثیر پارامترها بر این پدیده بسیار مهم است.

مسئله دیگری که در شکل (۶) دیده می شود این است که فولاد بصورت ذرات پراکنده در زمینه آلومینیوم پخش می شود و منشا ترک ها و عیوب می باشد. از این رو کنترل پارامترهای جوشکاری از جمله دما، سیلان و مورفولوژی اتصال به شدت در کنترل اندازه و توزیع این ذرات می تواند تاثیرگذار باشد.

۷-۲- بررسی نتایج حرارتی

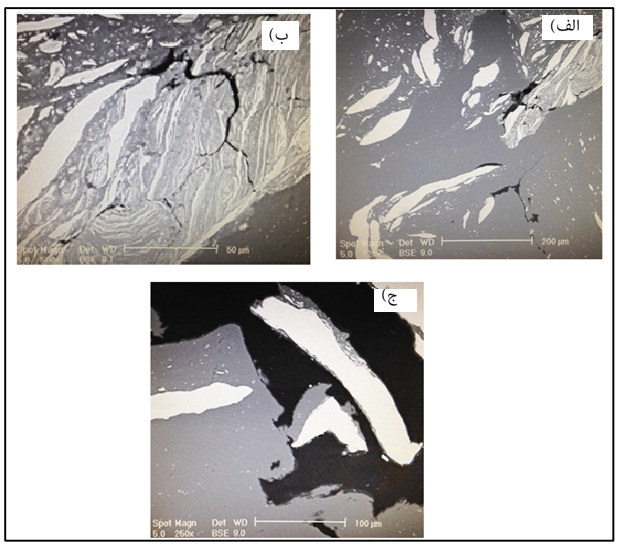
همانطور که از شکل (۷) تا (۸) مشخص است، ارتباط مناسبی مابین نتایج تاریخچه حرارتی اندازه گیری شده در روش عملی جوشکاری و نتایج حاصل از شبیه سازی وجود دارد. این مسئله هم برای فولاد و آلومینیوم و هم برای سرعت های متفاوت صادق است. شکل (۹) نشان دهنده توزیع حرارت در سه بعد برای اتصال غیرمشابه فولاد به آلومینیوم را نشان می دهد. مطابق این شکل، حرارت بیشتری در آلومینیوم پخش شده است و این درحالی است که حرارت بیشتری نیز در فولاد در قسمت زیر ابزار تجمع نموده است. علت این پدیده اولا پایین تر بودن توانایی انتقال حرارت در فولاد زنگ نزن نسبت به آلومینیوم است. بعلاوه، اینکه حرارت بیشتری در سمت فولاد به دلیل بالاتر بودن تنش تسلیم ایجاد می شود، همچنین فولاد به عنوان سمت پیشرو درنظر گرفته شده است و حرارت بیشتری در این سمت تولید می گردد. همچنین مطابق شکل (۱۰) نمودارهای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

مربوط به تغییرات دما در عرض جوش در سرعت های چرخشی مختلف نمایش داده شده است مشاهده می گردد که با افزایش سرعت چرخشی حرارت بیشتر شده و نیز عدم تقارن حرارت به دلایلی که ذکر گردید در این نمودارها مشهود است.

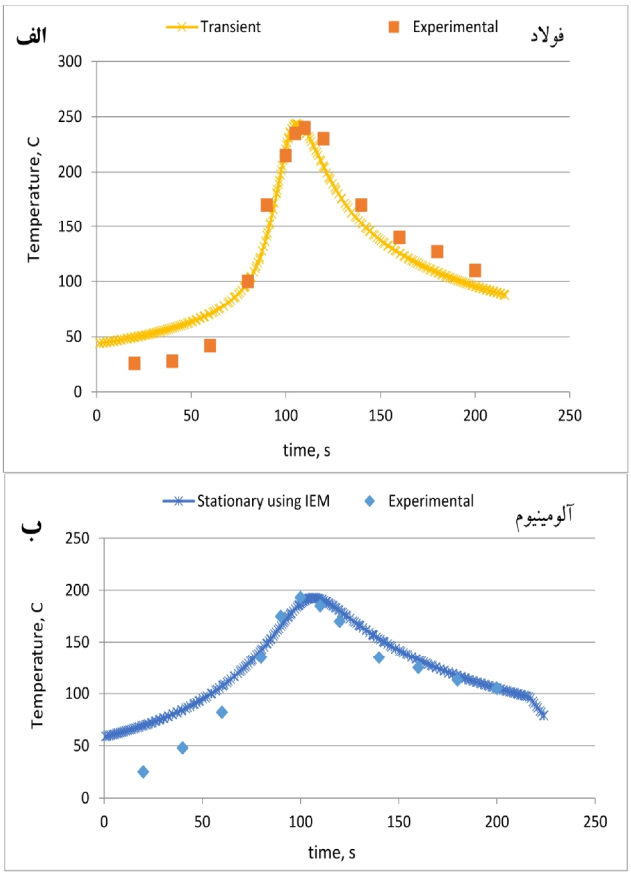
۷-۳- بررسی سیلان پلاستیک مواد

شکل (۱۱) خطوط جریان در حین جوشکاری را نشان می دهد. مطابق این شکل، خطوط پیوسته، نشان از وجود یک جریان دایره ای در زیر شانه و اطراف پین دارد. سرعت سیلان ماده مطابق شکل (۱۲) در سه سرعت چرخشی مختلف بررسی گردید. مشاهده می شود که افزایش سرعت چرخشی به علت افزایش سرعت شرط مرزی موجب افزایش کلی سرعت در مقطع قطعه شده. دلیل دیگر این مسئله افزایش کلی دما در قطعه می باشد. در واقع علت این رفتار را می شود تحت تاثیر بودن مواد از دما و نرخ کرنش بیشتر در این سطوح استدلال نمود.



شکل ۶- تصاویر SEM در حالت الکترون بازگشتی برای بررسی توزیع ذرات فولاد و عیوب در منطقه اغتشاش

بعلاوه بیشترین سرعت در شعاع های بیشتری از جوش سرعت بیشتری می گردد و این مسئله بخاطر افزایش حرارت و نیز سرعت حرکت دیوار و درنتیجه نرخ کرنش می باشد که موجب افزایش گرانروی و سرعت گردیده است. همچنین، افزایش بالاتر رفتن دمای قطعه، موجب افزایش گرانروی و درنتیجه افزایش سرعت سیلان گردیده است.

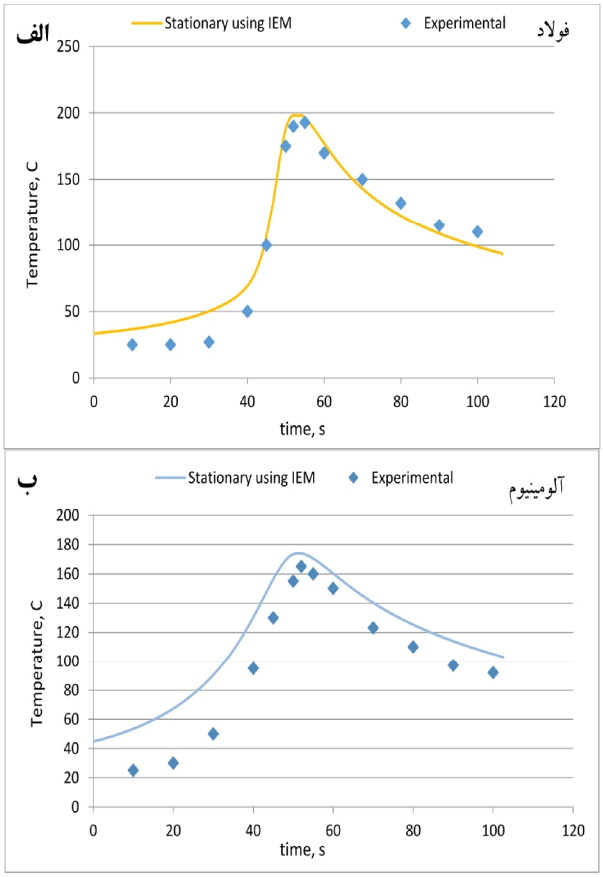


شکل ۷-مقایسه نتایج تاریخچه دمایی شبیه سازی شده با نتایج واقعی در سرعت خطی 40 mm/min

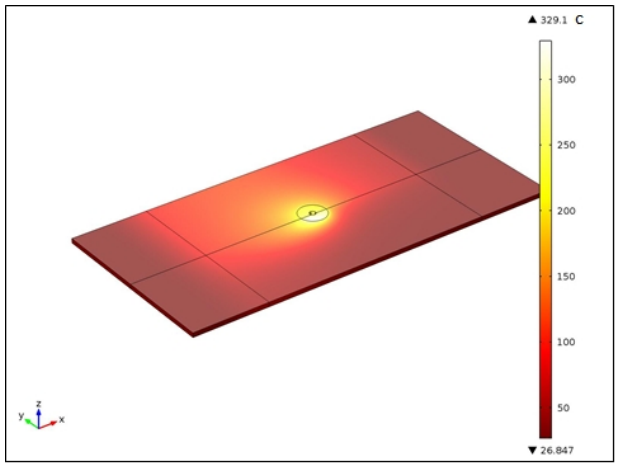
شکل (۱۳) کانتور توزیع نرخ کرنش در عرض قطعه را نشان می دهد. ملاحظه می شود که نرخ کرنش در سمت آلومینیوم بیشتر از فولاد است به این دلیل که آلومینیوم ذاتا سیال تر از فولاد است. مشاهده می شود که با فاصله گرفتن از پین نرخ کرنش افزایش می یابد دلیل این امر افزایش سرعت مماسی در شرط مرزی زیر ابزار است که روی کل مقطع جوش تاثیر می گذارد. بعلاوه، افزایش سرعت چرخشی افزایش کلی نرخ کرنش را به همراه دارد که علت آن یکی افزایش سرعت مماسی در مرز و دیگری افزایش دما می باشد.

شکل (۱۴) کانتور توزیع گرانروی را نشان می دهد. ملاحظه می شود که گرانروی در سمت فولاد بیشتر از سمت آلومینیوم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

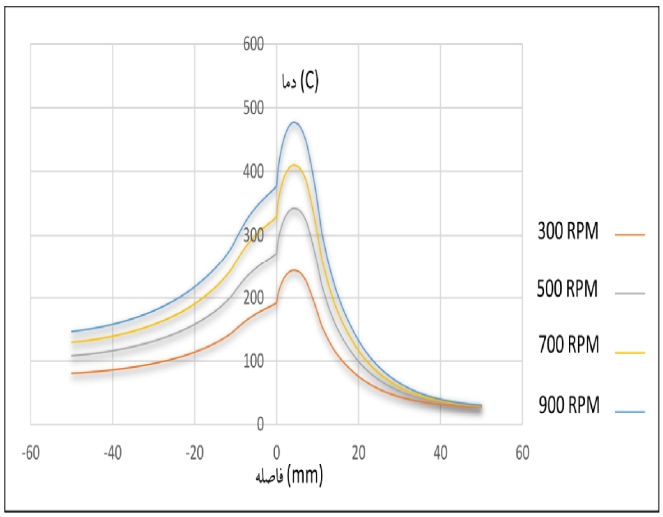


شکل ۸- مقایسه نتایج تاریخچه دمایی برای شبیه سازی و نتایج واقعی در سرعت خطی 80 mm/min

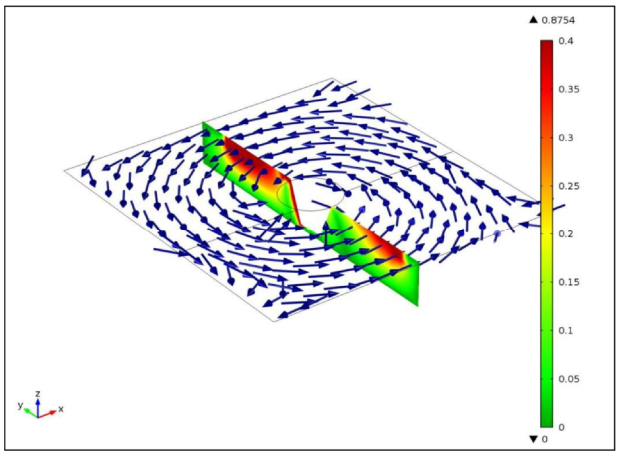


شکل ۹- کانتور توزیع دما شبیه سازی شده در سه بعد

است. این یکی از دلایلی است که ذرات فولاد در زمینه آلومینیوم پراکنده می شوند. همچنین با مشاهده شکل ملاحظه می شود که گرانروی تاثیر بسزایی در تعیین هندسه منطقه



شکل ۱۰- نمودار تغییرات دما در عرض قطعه در سرعت های چرخشی مختلف



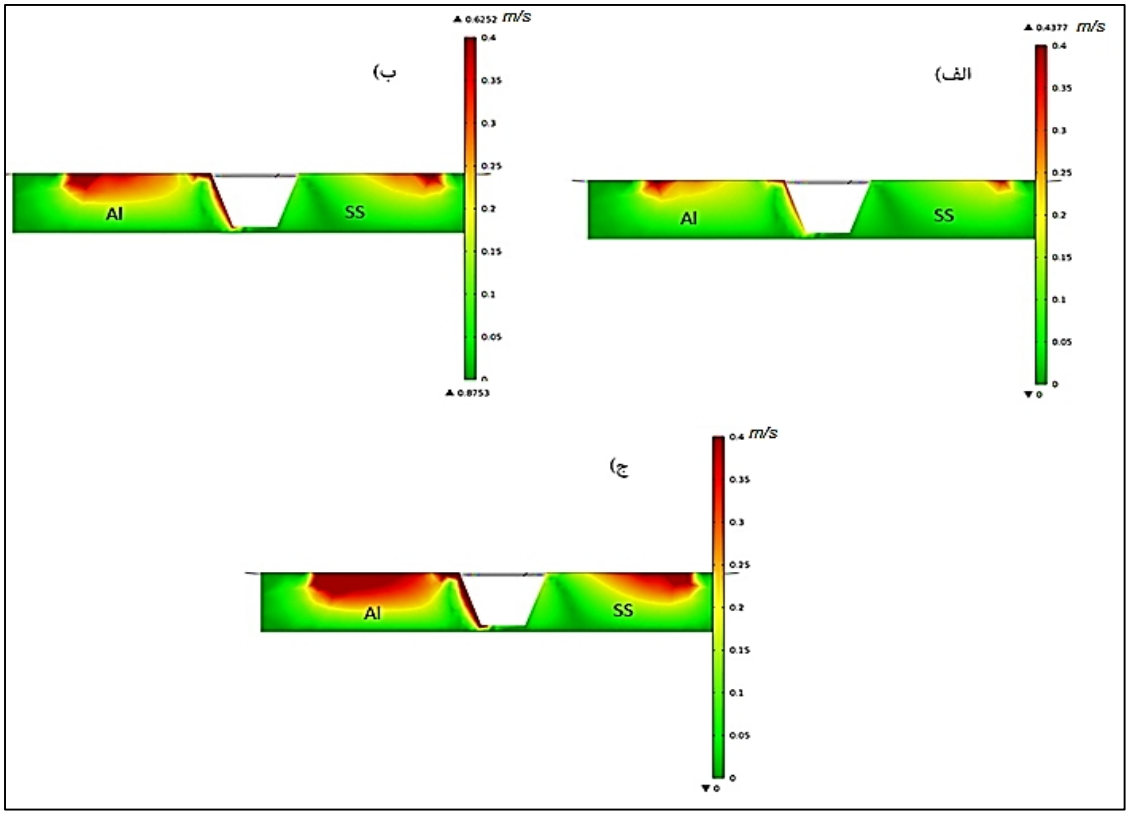
شکل ۱۱- خطوط جریان شبیه سازی شده حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

TMAZدارد. مشاهده می شود که فاصله گرفتن از پین کاهش گرانروی را به همراه دارد زیرا که سرعت مماسی و دما افزایش یافته است. همچنین افزایش سرعت چرخشی کاهش گرانروی را به همراه دارد که این مسئله نیز به دلایلی که ذکر شد می باشد.

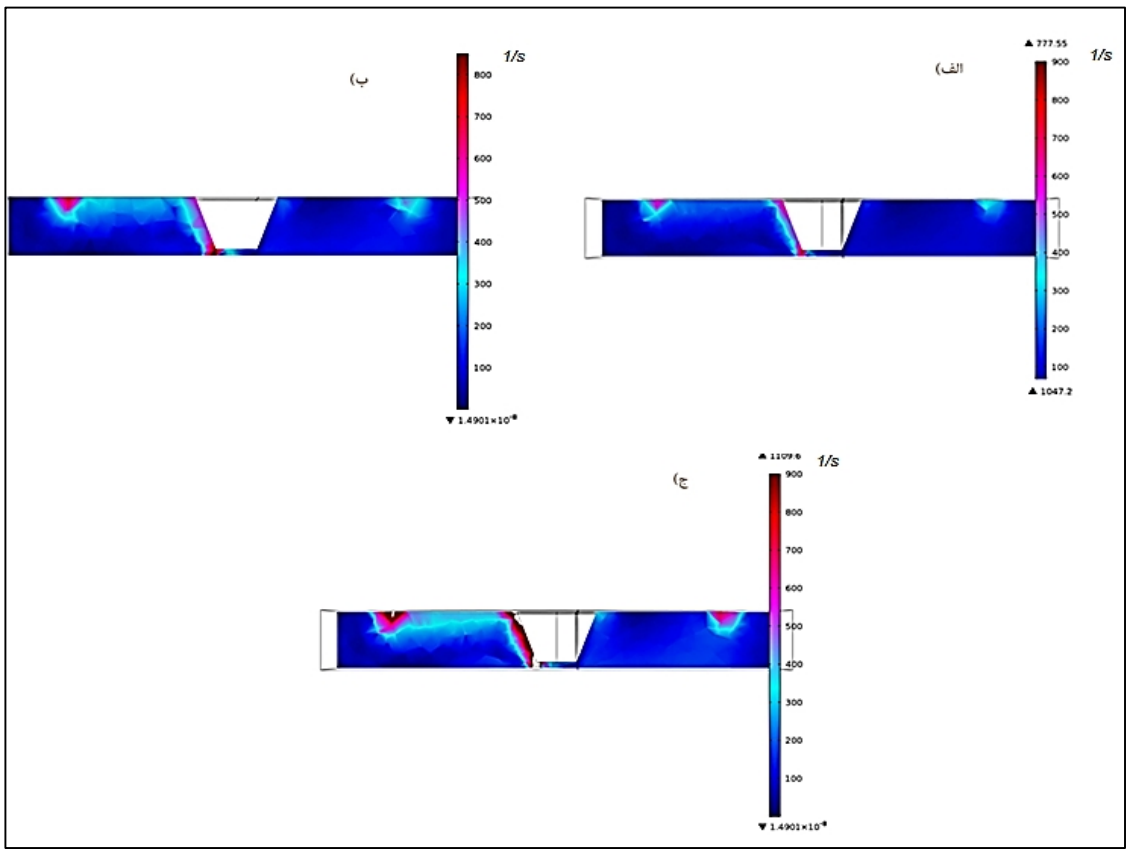
۷-۴- بررسی مورفولوژی مواد حین جوشکاری

نتایج حاصل از بررسی مورفولوژی نشان می دهد که به‌مرور زمان مواد از سمت فولاد به عنوان قسمت پیشرو به سمت آلومینیوم که پسرو می باشد سیلان می کنند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

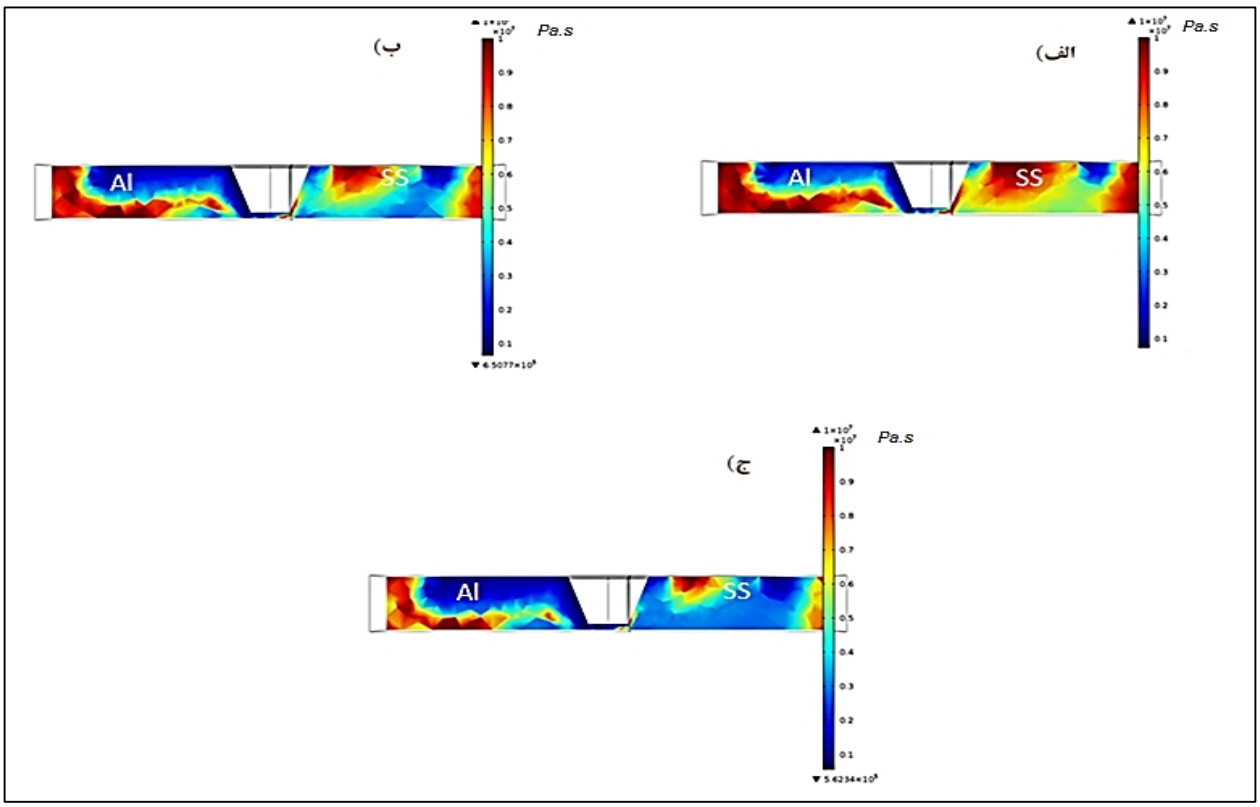


شکل ۱۲- کانتورهای توزیع سرعت سیلان درمقطع قطعه در سرعت های چرخشی مختلف. سرعت350 RPM (الف)، سرعت500 RPM (ب) و سرعت700 RPM (ج)

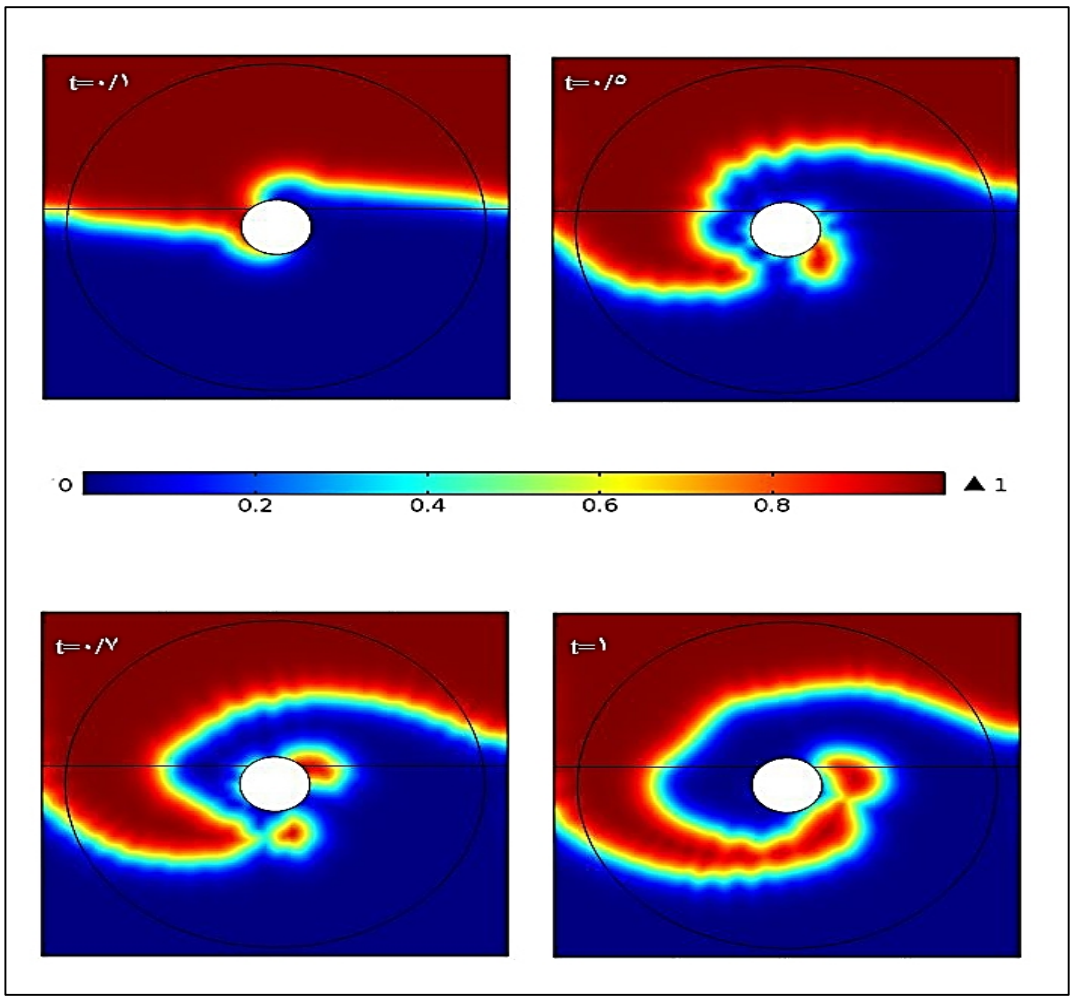


شکل ۱۳- کانتورهای توزیع نرخ کرنش در مقطع عرضی قطعه در سرعت های چرخشی مختلف. سرعت RPM 350 (الف)، سرعت500 RPM (ب) و سرعت700 RPM (ج)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]



شکل ۱۴- کانتورهای توزیع گرانروی دینامیکی در عرض مقطع جوش در سرعت های چرخشی متفاوت. سرعت350 RPM (الف)، سرعت500 RPM (ب) و سرعت700 RPM (ج)



شکل ۱۵- کانتورهای تغییرات مورفولوژی اتصال با زمان در سرعت چرخشی350 RPM

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

این درحالی است که سیلان آلومینیوم به سمت فولاد نیز به تبع سیلان فولاد مشاهده می شود. همانطور که از شکل (۱۵) مشاهده می شود، با گذشت زمان فولاد به سمت آلومینیوم سیلان کرده و مواد در پشت ابزار تجمع می کنند. این شکل تغییرات مورفولوژی در سرعت های مختلف را در یک زمان ثابت نشان می دهد. مطابق این شکل دیده می شودکه سیال فولاد تمایل بیشتری به از دست دادن پیوستگی و ایجاد ذرات فولاد در زمینه آلومینیوم دارد.این مسئله در واقعیت می تواند منجر به ایجاد عیوب بیشتری در قطعه گردد و در تحقیقات گذشته اثبات گردیده است [۲]. گفتنی است مطابق شکل (۱۶) تغییر اثر آفست بر سیلان بررسی شده مطابق این شکل، آفست صفر موجب ایجاد ساختار بریده بریده تری از فولاد در زمینه آلومینیوم می گردد که این مسئله عیوب را افزایش می دهد، این موضوع در مطالعات پیشین به طور عملی به اثبات رسیده است[۱, ۲]. مشاهده می گردد که با حرکت آفست به سمت آلومینیوم، پیوستگی سیال بیشتر می گردد، این درحالی است که آفست بیش از اندازه عدم سیالیت و حرکت فولاد و درنتیجه عدم اختلاط را به همراه دارد. این مسئله بسیار حائز اهمیت است که مطابق شکل (۱۷) افزایش سرعت چرخشی افزایش ذرات جدا شده از فولاد در زمینه آلومینیوم را به همراه دارد. این ذرات همانطور که پیش تر اشاره شد مناطقی برای ایجاد ترک ها و فصل مشترک پایدار می باشند. علت پراکندگی ذرات این است که در یک زمان ثابت سیال بیشتر در معرض سیکل های چرخشی قرار می گیرد و درنتیجه ذرات بیشتری جدا می شوند.

۸- نتیجه گیری

در این تحقیق بررسی سیلان پلاستیک ماده بصورت کوپل با یک مدل حرارتی، با المان های محدود و نامحدود و حل حالت پایدار، در سه بعد برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیر مشابه فولاد زنگ نزن به آلومینیوم بررسی گردید. بعلاوه به بررسی مورفولوژی اتصال در حین جوشکاری برای یک مدل دوبعدی با استفاده از روش Level set پرداخته شد. نتایجی که از این تحقیق حاصل گردید بدین شرح است:

استفاده از المان های نامحدود برای یک حل حرارتی حالت پایدار دقت بیشتر نتایج را برای نقاط ابتدایی و انتهایی جوش امکان پذیر می سازد.

سیلان پلاستیک در این اتصال غیرمشابه به شدت وابسته به دما و نرخ کرنش می باشد و با افزایش دما و حرارت ورودی بر اثر افزایش سرعت چرخشی سرعت سیلان افزایش می یابد.

روش Level set تکنیک مناسبی برای تعیین مرز بین دوفاز متفاوت در یک مدل سیلانی از جمله حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می باشد. با این روش بررسی اثر پارامترها بر مورفولوژی اتصال انجام گردید.

آفست صفر در حین جوشکاری موجب سیلان بیش از حد فولاد شده و آفست بیش از حد به فولادسیلان بیش از حد آن را بهمراه دارد.

مراجع

1.Bang, H., Bang, H., Jeon, G., Oh, I., and Ro, C., "Gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel", Materials & Design, Vol. 37, pp. 48-55, 2012.

2.Watanabe, T., Takayama, H., and Yanagisawa, A., "Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 178, pp. 342-349, 2006.

3.Ji, S., Shi, Q., Zhang, L., Zou, A., Gao, S., and Zan, L., "Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry", Computational Materials Science, Vol. 63, pp. 218-226, 2012.

4.Nandan, R., Computational modeling of heat transfer and visco-plastic flow in friction stir welding, ProQuest, 2008.

5.Seidel, T., and Reynolds, A.P., "Two-dimensional friction stir welding process model based on fluid mechanics", Science and Technology of Welding & Joining, Vol. 8, pp. 175-183, 2003.

6.Bendzsak, G., North, T., and Smith, C., "An experimentally validated 3D model for friction stir welding," Proc. Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, 2000.

7.Ulysse, P., "Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

1549-1557, 2002.

8.Nandan, R., Roy, G., and Debroy, T., "Numerical simulation of three-dimensional heat transfer and plastic flow during friction stir welding", Metallurgical and materials transactions A, Vol. 37, pp. 1247-1259, 2006.

9.Nandan, R., Roy, G., Lienert, T., and DebRoy, T., "Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel", Science and Technology of Welding & Joining, Vol. 11, pp. 526-537, 2006.

10.Kim, D., Badarinarayan, H., Kim, J.H., Kim, C., Okamoto, K., Wagoner, R., and Chung, K., "Numerical simulation of friction stir butt welding process for AA5083-H18 sheets", European Journalof Mechanics-A/Solids, Vol. 29, pp. 204-215, 2010.

11.Reddy, J.N., and Gartling, D.K., The finite element method in heat transfer and fluid dynamics, CRC press, 2010.

12.Tomashchuk, I., Sallamand, P., Jouvard, J., and Grevey, D., "The simulation of morphology of dissimilar copper–steel electron beam welds using level set method", Computational Materials Science, Vol. 48, pp. 827-836, 2010.

13.Osher, S., and Fedkiw, R., Level set methods and dynamic implicit surfaces, Springer Science& Business Media, 2006.

14.Gerdes, K., "A review of infinite element methods for exterior Helmholtz problems", Journal of Computational Acoustics, Vol. 8, NO. 01, pp. 43-62, 2000.

15.Toshiyuki, M., and Giedt, W.H., "Heat transfer from an elliptical cylinder moving through an infinite plate applied to electron beam welding", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, NO. 6, pp. 807-814, 1982.

16.Zienkiewicz, O., Emson, C., and Bettess, P., "A novel boundary infinite element", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, NO. 3, pp. 393-404, 1983.

17.Song, M., and Kovacevic, R., "Numerical simulation and experimental analysis of heat transfer process in friction stir welding process", Proceeding of Institution ofMechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 216, NO. 12, pp. 73-85, 2002.

18.Darvazi, A.R., and Iranmanesh, M., "Prediction of asymmetric transient temperature and longitudinal residual stress in friction stir welding of 304Lstainless steel", Materials & Design, Vol. 55, NO., pp. 812-820, 2014.

19.Liu, X., Lan, S., and Ni, J., "Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel", Materials & Design, Vol. 59, NO., pp. 50-62, 2014.

20.Schmidt, H., Hattel, J., and 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, 2004.

21.Sussman, M., and Puckett, E.G., "A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows", Journal of Computational Physics, Vol. 162, NO. 2, pp. 301-337, 2000.

22.Coelho, R., Kostka, A., Dos Santos, J., and Kaysser-Pyzalla, A., "Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure", Materials Science and Engineering: A, Vol. 556, NO., pp. 175-183, 2012.

23.Dehghani, M., Amadeh, A., and Mousavi, S.A., "Investigations on the effects of friction stir welding parameters on intermetallic and defect formation in joining aluminum alloy to mild steel", Materials & Design, Vol. 49, NO., pp. 433-441, 2013.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]