

شبیه‌سازی ترمومکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

محمد ریاحی^۱ و حمیدرضا نظری^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۱۹)

چکیده

در مقاله حاضر اثر حرارتی و مکانیکی ابزار به‌طور کامل در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) مدل شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده است که جریان ماده از سمت پیشروی به سمت پسروی زیاد است در حالی که مواد از سمت پسروی به سمت پیشروی کمتر کشیده می‌شوند. دمای بیشینه در محلی در سمت پیشروی در پشت ابزار و در نزدیکی لبه ابزار شولدر است. مقدار دما در پشت ابزار و با فاصله گرفتن از ابزار به سرعت کاهش می‌یابد. مقدار بیشینه دما در فرایند FSW به‌طور مشخص پایین‌تر از دمای بیشینه در فرایندهای جوشکاری ذوبی است که به دلیل ماهیت حالت جامد فرایند است. یکی از ویژگی‌های این شبیه‌سازی، توانایی در پیش‌بینی احتمال ایجاد حفره در پشت ابزار می‌باشد. برای شبیه‌سازی فرایند FSW از نرم‌افزار تجاری ABAQUS استفاده شده و خواص ماده مورد استفاده (Al 6061-T6) به‌صورت وابسته به دما به نرم‌افزار داده شده است.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مدل‌سازی المان محدود، سرعت دورانی

Thermo-Mechanical Modeling of the Friction Stir Welding Process

M. Riahi

H.R. Nazari

Mechanical Engineering Department

Iran University of Science & Technology

(Received: 27/November/2012; Accepted: 10/November/2014)

ABSTRACT

In the present paper, a three-dimensional thermo-mechanical model for friction stir welding is presented. Friction stir welding (FSW) is a relatively new welding process that may have significant advantages compared to the fusion processes. Although originally intended for aluminium alloys, reach of FSW has now extended to a variety of materials including steels and polymers. This study aims to numerically explore the thermal histories and temperature distributions in a work piece during a friction stir welding process involving the butt joining of aluminum 6061-T6. In this regard ABAQUS commercial software was utilized. The process is solid state and as such, temperatures experienced near the weld are lower than those experienced during fusion welding and there are no large density changes due to a solid-liquid transformation.

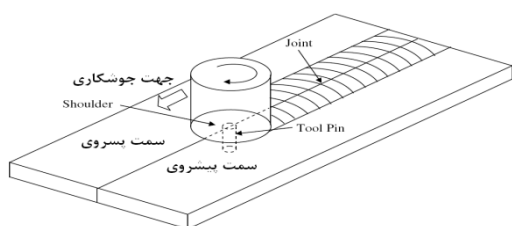
Keywords: Friction Stir Welding, Finite Element Modelling, Thermo-Mechanical Modeling

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): riahi@iust.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: hrnazari@iust.ac.ir

۱- مقدمه

جوش می‌شود [۳]. مشخصه منحصر به فرد جوش اصطکاکی اغتشاشی این است که جریان پلاستیکی لایه نزدیک به ابزار در حال چرخش به انتقال حرارت کمک می‌کند. انتقال حرارت به خواص مواد، متغیرهای جوش شامل سرعت چرخشی و سرعت جوش و هندسه ابزار بستگی دارد. فهم کامل فرایند انتقال حرارت در قطعه کار می‌تواند در پیش بینی سیکل‌های حرارتی و توزیع دمایی در قطعه کار و متعاقباً در محاسبه تنش پسماند و کیفیت جوش بسیار مفید باشد [۴]. شکل ۱ شماتیکی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در اتصال لب به لب دو صفحه تخت را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شماتیکی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در اتصال لب به لب دو صفحه تخت [۳].

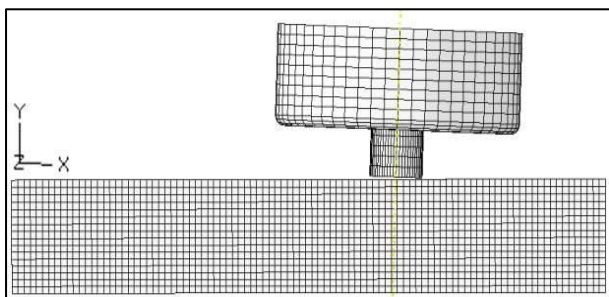
برای انجام جوشکاری باید بتوان بر مقاومت موجود در برابر ابزار غلبه کرد بنابراین به یک نیروی رو به پایین نیاز است تا موقعیت ابزار را نسبت به سطح قطعه ثابت نگه دارد. برای پیشروی ابزار، نیرویی به سمت جلو به ابزار وارد می‌شود تا بر مقاومت مواد غلبه گردد. این نیرو، نیروی پیشروی نامیده می‌شود و موازی با حرکت ابزار وارد می‌گردد. از یک گشتاور نیز برای چرخش ابزار استفاده می‌شود که مقدار آن به نیروی رو به پایین و ضریب اصطکاک (اگر اصطکاک از نوع اصطکاک لغزنده باشد) و مقاومت جریان مواد (اگر اصطکاک از نوع اصطکاک چسبنده باشد) بستگی دارد. برای افزایش نفوذ شولدر در سطح و در نتیجه افزایش اصطکاک و حرارت، ابزار و قطعه کار را به اندازه θ نسبت به هم و در خلاف جهت پیشروی انحراف می‌دهند. زاویه دادن به ابزار باعث اعوجاج شدید مش در شبیه‌سازی فرایند می‌شود، بنابراین در تحلیل حاضر، این زاویه صفر در نظر گرفته شده است.

در میان مقالاتی که در یک دهه گذشته در ارتباط با فرایند FSW به چاپ رسیده است، برخی از محققین مدل‌های تحلیلی و روش‌های تجربی برای بیان توزیع دمایی در قطعه کار در حین فرایند ارائه داده‌اند. هرچند که می‌توان از دوربین‌های مادون قرمز^۲ برای اندازه‌گیری دمایی سطحی قطعه کار در

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) فرایند جوشکاری حالت جامد نسبتاً جدیدی است که نسبت به روش‌های جوشکاری ذوبی مزایایی دارد. مهم‌ترین مزیت آن را می‌توان توانایی این روش در جوشکاری آلیاژهای دانست که با روش‌های جوشکاری سنتی جوش نمی‌شوند (آلیاژهای آلومینیوم سری‌های 2xxx و 7xxx) [۱]. از دیگر مزایا می‌توان به اعوجاج انقباضی و پسماند کمتر و وجود عیوب کمتر اشاره کرد [۲]. این فرایند اولین بار توسط موسسه جوش TWI در سال ۱۹۹۱ اختراع شد. با وجود اینکه این فرایند جوشکاری نسبتاً جدید می‌باشد، توسط محققین بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است. وجود پارامترهای مستقل فراوان در این فرایند باعث شده است مقالات زیاد عددی و تجربی در این زمینه در سطح جهان به چاپ برسد ولی همچنان تأثیر واقعی برخی از پارامترها در حال بررسی می‌باشد. مطالعه عددی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ابزاری بسیار موثر در بهینه‌سازی فرایند و به دست آوردن تأثیر پارامترهای مختلف محسوب می‌شود. بسیاری از محققین با حذف ابزار پین، متقارن در نظر گرفتن فرایند نسبت به خط اتصال و یا دیگر ساده‌سازی‌ها در شبیه‌سازی فرایند بر مشکل ناشی از اعوجاج شدید مش فائق آمده‌اند هر چند آنها نتیجه گرفته‌اند که این ساده‌سازی‌ها تأثیر کمی در نتایج حاصله دارد، ولی شبیه‌سازی کامل فرایند نتیجه‌گیری را راحت‌تر خواهد کرد.

ابزار مورد استفاده در این فرایند دارای یک شولدر^۱ است که در انتهای آن یک پین رزوه شده وجود دارد. ابزار دارای چرخش پس از فرو رفتن در قطعه کار و کمی مکث، در امتداد دو ورقه که به طور کامل کلمپ شده‌اند حرکت می‌کند. قطعات باید به روی یک زیرکاری قرار گرفته و طوری مهار شوند که از جدا شدن صفحات جلوگیری شود. اغتشاش ایجاد شده در مواد توسط شولدر، تماس محکمی بین دو ورق ایجاد می‌کند. حرارت تولیدشده توسط اصطکاک بین شولدر و قطعه کار و تا مقدار کمتری در اثر اصطکاک سطح پین و قطعه کار، موادی که باید جوش شوند را نرم می‌کند. با حرکت ابزار در جهت جوشکاری تغییر شکل پلاستیکی زیاد و جریانی از فلز تغییر شکل یافته ایجاد می‌شود. نیم پلیتی که در آن جهت چرخش با جهت جوشکاری همانند است سمت پیشروی و طرف دیگر سمت پسروی نامیده می‌شود. این تفاوت باعث انتقال حرارت، جریان مواد، تنش پسماند و خواص جوش متفاوت در دو طرف

می‌گردد. در نهایت قطعه کار و فضای اطراف آن با ۱۹۰۹۲۰ المان EC3D8R شبکه‌بندی شده است. به دلیل تعداد زیاد المان‌های موجود در مدل زمان فرایند بسیار طولانی است که برای کاهش زمان انجام محاسبات از تکنیک مقیاس بار^۱ استفاده شده است. برای این منظور سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی هر دو ۲۰۰۰ برابر شده است تا گام جوشکاری ثابت بماند. سرعت پیشروی و سرعت دورانی حقیقی در این شبیه‌سازی به ترتیب ۶۰ mm/min و ۶۰۰ rpm بوده است. ابزار نیز به طور کامل مدل و با ۵۸۶۵ المان R3D4 شبکه‌بندی شده است. در این مقاله، سطح شانه ابزار در دو حالت تخت با لبه‌های تیز و مخروطی با زاویه ۸ درجه و لبه انحنا دار مورد مطالعه قرار گرفته است. در بررسی‌های انجام شده، محور ابزار نسبت به عمود بر سطح ۲ درجه زاویه دارد. مدل استفاده شده برای شبیه‌سازی مکانیکی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل استفاده شده برای شبیه‌سازی مکانیکی فرایند FSW.

۲-۱- کارهای تجربی مورد استناد

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق‌های آلومینیوم A17075 با ابعاد ۶×۷۵×۱۵۵ mm و با استفاده از فیکسچر مناسب طراحی شده، انجام شده است. سطوح فیکسچر فولادی سنگ زده شده تا فشار وارده بر روی نمونه‌های جوشکاری یکنواخت باشد. برای حذف اثر غیریکنواختی نورد بر روی نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند، این ورق‌ها بر اساس مرجع [۱۰] آنیل شده‌اند تا اثر نورد از بین رفته و کاملاً یکنواخت گردند. ترکیب شیمیایی برای ورق A17075 در جدول ۱ آورده شده است [۸].

از فولاد AISI H13 برای ساخت ابزار استفاده شده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این فولاد مقاومت سایشی خوب آن به دلیل وجود وانادیم بالا و تشکیل کاربید وانادیم است. این فولاد گرم کار است و سختی خود را تا دمای ۵۰۰°C حفظ

جلوی ابزار استفاده کرد [۵]، استفاده از ترموکوپل روشی مرسوم در اندازه‌گیری توزیع دمایی در قطعه کار است [۹-۶] یوونگ و همکارانش [۷] توزیع دمایی قطعه کار را در جوشکاری FSW آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 توسط چیدمان‌های متفاوتی از ترموکوپل‌ها در دو سمت جوشکاری به دست آورده‌اند. آنها نتیجه گرفتند که بیشینه دمایی در سمت پیشروی کمی بیشتر از سمت پسروی است. چائو و همکارانش [۸]، با اندازه‌گیری دما در قطعه کار و ابزار با استفاده از ترموکوپل و استفاده از یک مدل عددی نتیجه گرفته‌اند که تنها ۵٪ حرارت تولید شده توسط اصطکاک به ابزار منتقل شده و مابقی به قطعه کار انتقال می‌یابد. راجامانیکام و همکارانش [۹]، تأثیر سرعت دورانی و پیشروی ابزار را بر روی توزیع دمایی و خواص مکانیکی آلومینیوم AA2014 به صورت تجربی و عددی بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که دما بیشتر متأثر از سرعت دورانی است در حالی که سرعت پیشروی بیشتر بر خواص مکانیکی اثرگذار است.

۲- روش تحقیق

وجود ابزار غیرمصرفی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث مشکل شدن مدلسازی کامل فرایند می‌شود؛ زیرا حرکت ابزار در امتداد خط اتصال دو ورق باعث اعوجاج شدید مش در مدلسازی‌های معمول خواهد شد. در مقاله حاضر، از تکنیک اویلری و نرم‌افزار آباکوس برای مدلسازی مکانیکی فرایند استفاده شده است. در این تکنیک برای جلوگیری از اعوجاج مش، اجازه عبور ماده از درون شبکه مش‌بندی شده داده می‌شود. به عبارت دیگر، در هر گام زمانی کوچک محدوده شبکه‌بندی شده به همراه حرکت ماده حرکت می‌کند و بعد از انجام محاسبات مربوط به جریان ماده، محدوده شبکه‌بندی شده دوباره به حالت اولیه خود باز می‌گردد. در این تکنیک در هر گام زمانی محاسبه می‌شود که چه مقدار از فضای المان توسط ماده مورد نظر پر شده و چه مقدار از فضای آن توسط هوا اشغال شده است. بنابراین می‌بایست فضای بالای ورق‌ها که هوا وجود دارد نیز مدل شود.

به این ترتیب می‌توان سطوح بالای ورق‌ها که پس از جوشکاری ناهموار است و سطوح مشخص‌کننده محدوده حفره را در مدلسازی شناسایی و مشاهده کرد. در این مدلسازی برای به دست آوردن جواب‌های دقیق‌تر نیاز است که محدوده قطعه-کار با المان‌های بسیار کوچک شبکه‌بندی شود. محدوده بالای ورق‌ها که توسط المان‌های هوا اشغال می‌شود و نیازی به دقت نتایج در آن بخش نیست با المان‌های بزرگ‌تری شبکه‌بندی

شکل (۴): پایین رفتن ابزار با شانه تخت و لبه تیز در سطح ورق و ایجاد جریان ماده.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی ۷۰۷۵Al استفاده شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

میزان	عنصر	میزان	عنصر
۵/۰۵	Zn	Base	Al
۰/۰۲۴	Ti	۰/۳۳۴	Si
۰/۰۰۰۲	Be	۰/۴۶۲	Fe
۰/۰۱۱۳	Pb	۱/۴۱	Cu
۰/۰۰۳۶	Sb	۰/۰۲۱۲	Mn
<۰/۰۰۰۵	Sn	۲/۰۸	Mg
۰/۰۰۴۹	V	۰/۲۴۸	Cr
۰/۰۰۱۷	Zr	۰/۰۰۳۴	Ni

جدول (۲): نحوه عملیات حرارتی انجام شده برای ابزار AISI H13 [۱۲].

عملیات حرارتی سختکاری			عملیات حرارتی بازپخت		
دمای آستنیت‌کردن	زمان	محیط سرد کردن	دمای بازپخت	زمان	محیط سرد کردن
۱۰۱۰°C	۳۰ دقیقه	روغن	۵۴۰°C	۱۲۰ دقیقه	هوای ساکن

۳- تولید حرارت

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، حرارت در اثر اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و همچنین تغییر شکل تولید می‌شود. حرارت تولید شده توسط اصطکاک، در نتیجه نیروی اصطکاک و سرعت لغزشی است. این میزان حرارت برابر است با [۳]:

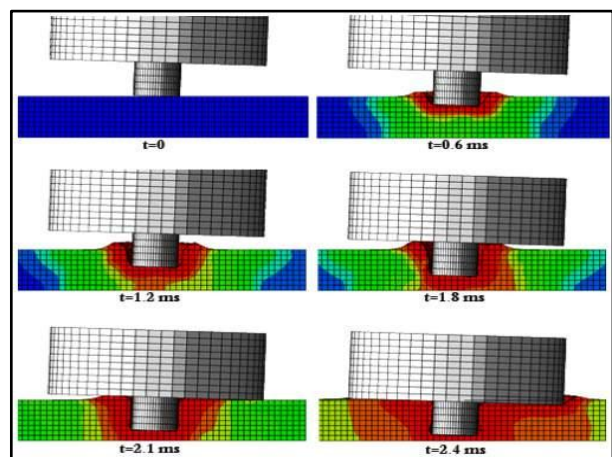
$$d\dot{e}_f = \delta(\omega r - U \sin\theta) \mu_f p dA \quad (1)$$

در این رابطه، ω ، سرعت دورانی ابزار، U سرعت جوشکاری، μ_f ضریب اصطکاک، r ، فاصله شعاعی هر نقطه در سطح اشتراک ابزار و قطعه کار تا محور ابزار و θ ، زاویه بین بردار شعاع و جهت جوشکاری است. δ ، ضریبی است که مشخص کننده سهم اصطکاک در تولید حرارت می‌باشد. در حالتی که $\delta = 1$ ، کل حرارت تولیدی ناشی از اصطکاک است. در صورتی که سرعت جوشکاری پایین باشد می‌توان از ترم $U \sin\theta$ صرف نظر کرد و تولید حرارت در دو سمت خط اتصال متقارن خواهد شد.

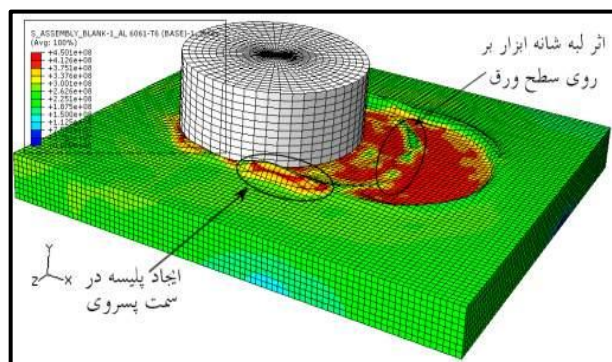
در صورتی که مواد قطعه کار به ابزار بچسبند، آنگاه حرارت تولید شده در سطح اشتراک ابزار و قطعه کار ناشی از تغییر شکل برشی است. با فرض اینکه کل کار تغییر شکل به حرارت تبدیل شود، مقدار حرارت تولیدی برابر خواهد بود با [۳]:

$$p = \frac{\epsilon_3 + \epsilon_1}{2} \quad (2)$$

می‌کند [۱۱]. قطر شانه ابزار، قطر پین و ارتفاع پین در آزمایشات انجام شده به ترتیب برابر است با: ۲۰ mm، ۲۰ mm و ۵/۷ mm. سطح شانه ابزار به شکل مخروطی با زاویه ۸ درجه و پین رزوه شده است. ابزار ابتدا به شکل تعیین شده، ماشینکاری گردیده و سپس به منظور افزایش سختی عملیات حرارتی شده است. مقدار سختی ابزار پس از انجام عملیات حرارتی حدود ۵۲ HRC است که برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیم مناسب به نظر می‌رسد [۶]. شرایط عملیات حرارتی ابزار با توجه به مرجع [۱۲] در جدول ۲ آورده شده است. برای جوشکاری، ورق‌ها بر روی پلیت فولادی محکم مهار شده و زاویه انحراف^۱ ابزار نسبت به عمود بر سطح ورق، ۳ درجه لحاظ شده است. با توجه به تست‌های مختلف انجام شده به نظر می‌رسد این تنظیمات برای به دست آوردن یک اتصال بی عیب مناسب باشد. تاریخچه دمایی در حین جوشکاری و اندازه‌گیری تنش پسماند برای دو سرعت دورانی ابزار ۶۰۰ rpm و ۱۱۱۵ rpm با سرعت پیشروی ابزار ۶۰ mm/min انجام شده است [۷].



شکل (۳): پایین رفتن ابزار با شانه تخت و لبه تیز در سطح ورق و ایجاد جریان ماده.



2-Tilt Angle

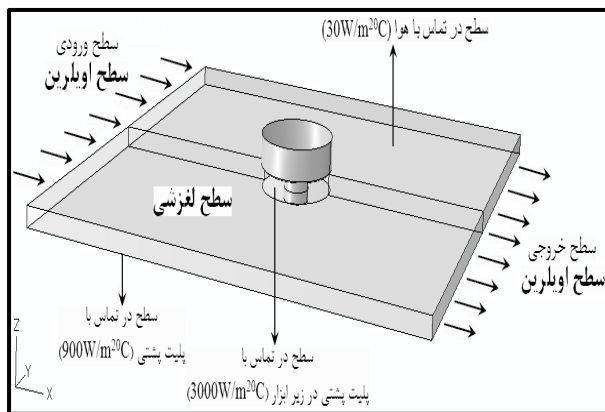
وابسته به دما به نرم‌افزار ABAQUS داده شده است. خواص حرارتی در جدول ۳ نشان داده شده است. چگالی، ضریب پواسون و مدول الاستیک برای کاهش زمان حل، ثابت در نظر گرفته شده‌اند و به ترتیب برابرند با 2700 kg/m^3 و 0.33 و 66 GPa .

جدول (۳): خواص حرارتی Al 6061-T6.

Heat Capacity (J/Kg°C)	Thermal Cond. (W/m ² °C)	Temperature (°C)
۸۹۶	۱۶۷	۲۰
۹۲۰	۱۷۰	۳۷/۸
۹۷۸	۱۷۷	۹۳/۳
۱۰۰۴	۱۸۴	۱۴۸/۹
۱۰۲۸	۱۹۲	۲۰۴/۴
۱۰۵۲	۲۰۱	۲۶۰
۱۰۷۸	۲۰۷	۳۱۵/۶
۱۱۰۴	۲۱۷	۳۷۱/۱
۱۱۳۳	۲۲۳	۴۲۶/۲

۵- شرایط مرزی

برای سطوح در تماس با هوا مقدار ضریب انتقال حرارت $30 \text{ W/m}^2\text{°C}$ در نظر گرفته شده است. سطح پایینی ورق‌ها که در تماس با پلیت پشتی می‌باشد به دو ناحیه تقسیم شده است. سطح دایره‌ای که در زیر ابزار قرار دارد، به دلیل فشرده شدن توسط ابزار، توان انتقال حرارت بیشتری دارد. در آزمایشات تجربی در زیر ابزار بر سطح پلیت پشتی فرو رفتگی دیده می‌شود که درستی این مطلب را نشان می‌دهد. مقدار ضریب انتقال حرارت اعمال شده به این سطح، $3000 \text{ W/m}^2\text{°C}$ است. برای سطح پایینی ورق که در زیر ابزار قرار ندارد ضریب انتقال حرارت پایین‌تر $200 \text{ W/m}^2\text{°C}$ اعمال شده است. شرایط مرزی اعمال شده در مدل‌سازی در شکل ۸-۶ نشان داده شده است.

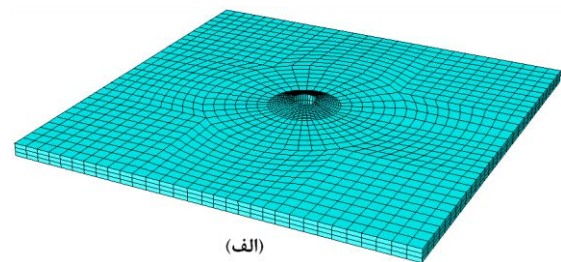


شکل (۶): شرایط مرزی اعمال شده در شبه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

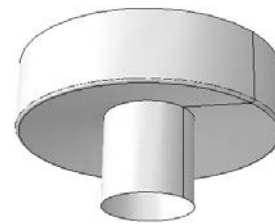
$$d\dot{\epsilon}_f = (1 - \delta)(\omega r - U \sin\theta)\tau_\gamma dA. \quad (3)$$

۴- مدل‌سازی

وجود ابزار غیر مصرفی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث مشکل شدن مدل‌سازی کامل فرایند می‌شود؛ زیرا حرکت ابزار در امتداد خط اتصال دو ورق باعث اعوجاج شدید مش خواهد شد. هرچند تأثیر ابزار بین در تولید حرارت ناچیز است، مدل‌سازی کامل ابزار در فهم بهتر جریان ماده و توزیع دمایی مفید خواهد بود. در مقاله حاضر، برای غلبه بر اعوجاج مش، از تکنیک ALE استفاده شده است. ورق‌ها به کمک ۷۸۱۸ المان شش‌وجهی C3D8RT و 10256 گره به صورت یکپارچه به ابعاد $100 \times 100 \times 3/18 \text{ mm}$ مدل شده است. در شکل ۵، ورق مش‌بندی شده و ابزار مورد استفاده در مدل‌سازی نشان داده شده است. ابزار دارای شولدری به قطر ۱۸ میلی‌متر و پینی به قطر $6/35$ میلی‌متر است. سرعت جوشکاری 1 mm/s و زمان مکث پس از پایین رفتن ابزار ۲ ثانیه است. به دلیل طولانی بودن زمان حل شبه‌سازی، فرایند در مدت زمان ۱۱ ثانیه بعد از زمان مکث بررسی می‌شود.



(الف)



(ب)

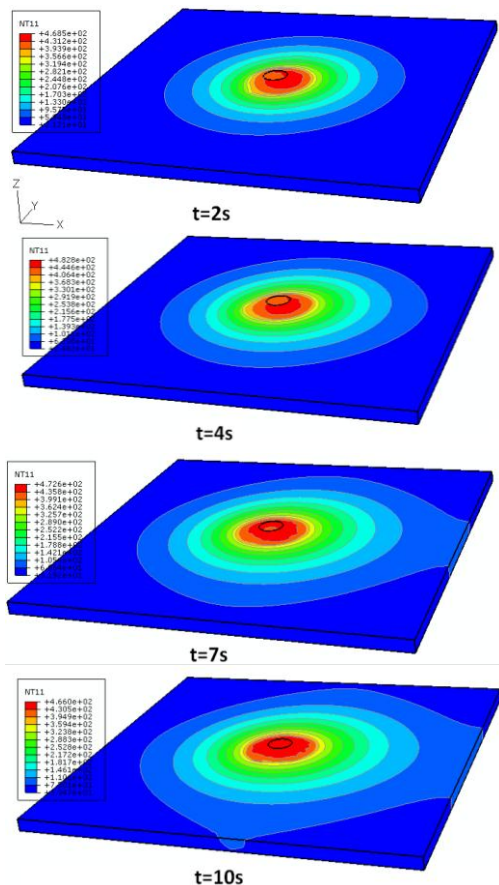
شکل (۵): (الف) ورق مش‌بندی شده (ب) ابزار مورد استفاده در مدل‌سازی.

تاکنون مطالعه تجربی دقیقی بر روی چگونگی شرایط تماسی بین ابزار و قطعه و مقدار ضریب اصطکاک در حین فرایند، انجام نشده است. در مقاله حاضر، مقدار اصطکاک ثابت 0.4 در نظر گرفته شده است که با توجه به نتایج مقدار مناسبی به نظر می‌رسد. مقدار نیروی عمودی اعمالی به ابزار 17 KN است که برای ثابت نگه داشتن موقعیت ابزار نسبت به سطح قطعه کار ضروری است. خواص حرارتی آلومینیوم ۶۰۶۱-T6 به صورت

استفاده نشده است. در شکل ۳ وضعیت سطوح اوپلری و سطوح لغزشی مشخص شده است. برای اینکه در سطح پایینی ورق تغییر شکل ناخواسته مش ایجاد نشود، طول ابزار پین بزرگتر از حالت واقعی در نظر گرفته شده است.

۷- نتایج و بحث

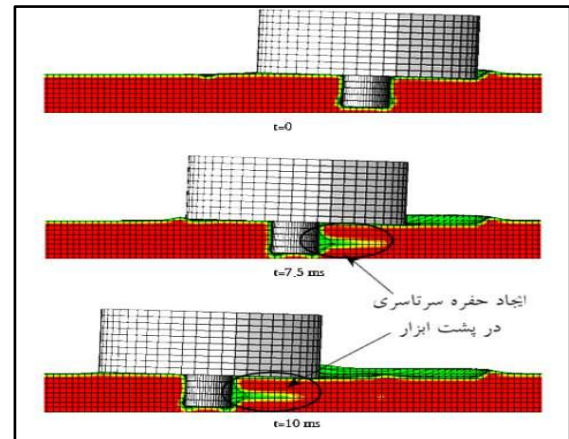
برای مطالعه تأثیر سرعت دورانی در توزیع دمایی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، چهار سرعت دورانی متفاوت ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ دور بر دقیقه بررسی می‌شود. بقیه پارامترها در شبیه‌سازی ثابت نگه داشته می‌شوند. شکل ۹ توزیع دمایی به دست آمده در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی با سرعت دورانی ۸۰۰ rpm را نشان می‌دهد. بیشینه دمایی در پشت ابزار و در سمت پیشروی وجود دارد. که با نتایج تجربی انتشار یافته تطابق خوبی دارد. بیشترین مقدار دما ۴۸۶ درجه سانتیگراد در زمان ۵ ثانیه به دست آمده است که حدوداً ۱۰۰ درجه پایین‌تر از دمای ذوب ماده می‌باشد.



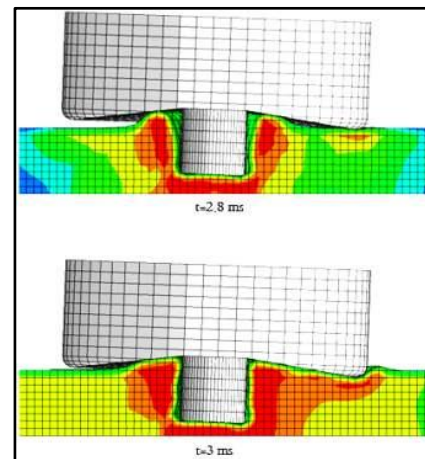
شکل (۹): توزیع دمایی در ورق در زمان‌های مختلف

شبیه‌سازی (سرعت دورانی ۸۰۰ rpm).

توزیع دمایی در طول ضخامت در امتداد خط جوش (الف) و عمود بر آن (ب) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. سطح بالایی ورق که در تماس با سطح شولدر است دمای بالاتری



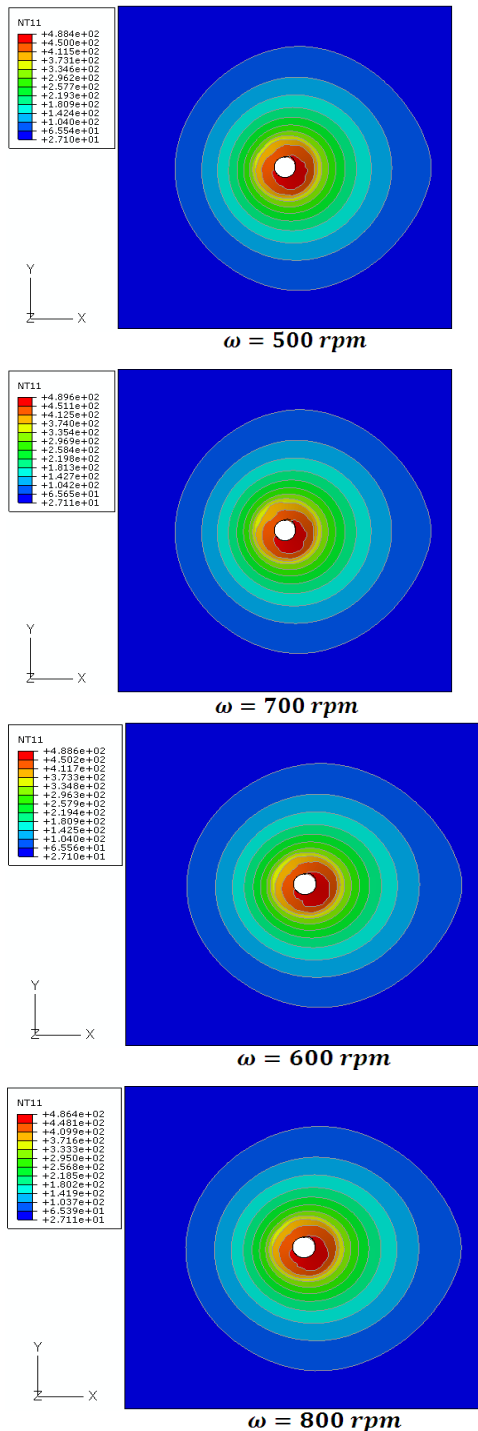
شکل (۷): پیشروی ابزار با شانه تخت و لبه تیز و ایجاد حفره تونلی در سمت پیشروی.



شکل (۸): پایین آمدن ابزار با سطح شانه مخروطی و ایجاد جریان ماده.

۶- تکنیک ALE

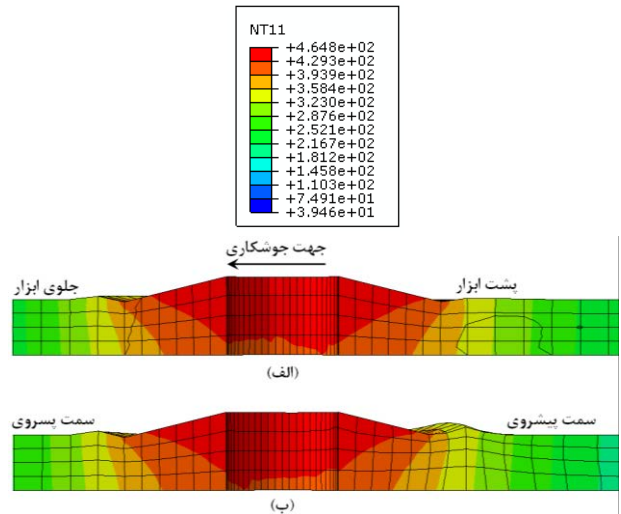
در شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، وجود ابزار غیر مصرفی که حول محور خود دارای دوران است، باعث اعوجاج شدید مش می‌شود. در این مقاله، برای غلبه بر این مشکل از تکنیک ALE موجود در نرم‌افزار استفاده شده است. در این حالت، ابزار تنها حرکت دورانی دارد و ماده در جهت خلاف جهت جوشکاری از زیر ابزار عبور داده می‌شود. برای استفاده صحیح از این تکنیک، سطوح ورودی و خروجی ماده به صورت سطوح اوپلری در نظر گرفته شده و در جهات مناسب مقید شده‌اند. سطوح اوپلری اجازه عبور ماده از درون سطح را می‌دهند. سطوح بالا و پایین ورق به صورت سطوح لغزشی هستند. سطوح لغزشی را می‌توان در جهت مماس بر سطح ثابت کرد در حالی که در جهت عمود بر سطح مجبور به حرکت با ماده هستند. نوع دیگر سطح، سطح لاگرانژی است که گره‌های موجود روی سطح در همه جهات با ماده حرکت می‌کنند. این نوع سطح به دلیل ویژگی که دارد در شبیه‌سازی



شکل (۱۱): توزیع دمایی در قطعه کار در سرعت‌های دورانی مختلف در زمان ۵ ثانیه پس از شروع حرکت پیشروی.

در صورتی که نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی (گام جوشکاری) کم باشد، احتمال بوجود آمدن عیوب افزایش می‌یابد. این عیوب می‌توانند به صورت حفره در سطح پایینی یا بالایی ورق در پشت ابزار بین اتفاق ایجاد شوند. در شبیه‌سازی انجام قابلیت پیش‌بینی این عیوب وجود دارد. شکل ۱۳ وجود حفره در سطح پایینی ورق در پشت ابزار بین را نشان می‌دهد که در سرعت دورانی ۴۰۰ rpm و با سرعت پیشروی ۲ mm/s

دارد. مقدار دما در طول ضخامت کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، دما توزیع «V» دارد که به علت نقش کمتر ابزار بین در تولید حرارت است.



شکل (۱۰): توزیع دمایی در صفحه اتصال (الف) و عمود بر آن (ب) ۱۰ ثانیه پس از شروع حرکت جوشکاری (سرعت دورانی ۶۰۰ rpm).

با تغییر سرعت دورانی، بیشینه دما تغییر چندانی نکرده است که با نتایج تجربی ارائه شده توسط دیگر محققین مغایرت دارد دلیل آن می‌تواند ثابت در نظر گرفتن ضریب اصطکاک و شرایط تماسی باشد. توزیع دمایی به‌دست‌آمده در سرعت‌های مختلف در زمان ۵ ثانیه پس از شروع حرکت جوشکاری در شکل ۱۱ نشان داده شده است. دمای بیشینه به‌دست‌آمده برای سرعت‌های ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ به ترتیب برابر است با ۴۸۸/۴، ۴۸۸/۶، ۴۸۹/۶ و ۴۸۶/۴.

در جریان اغتشاشی که در فصل مشترک ابزار و قطعه کار ایجاد می‌شود، حرکت ماده از سمت پیشروی به سمت پسروی بیشتر از حرکت ماده از سمت پسروی به سمت پیشروی است. در عمل، این تفاوت جریان ماده، باعث تفاوت در خواص جوش در دو سوی خط اتصال می‌شود. شکل ۱۲ پروفایل سرعت در صفحه اتصال (الف) و عمود بر صفحه اتصال (ب) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت حرکت ماده در سمت پسروی و در سطح بالایی ورق بیشتر است که به دلیل اثر سطح شولدر ابزار می‌باشد. در طول ضخامت سرعت کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد سطح بین تأثیر کمتری در ایجاد جریان ماده دارد. جریان ماده به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج ارائه شده توسط دیگر محققین دارد.

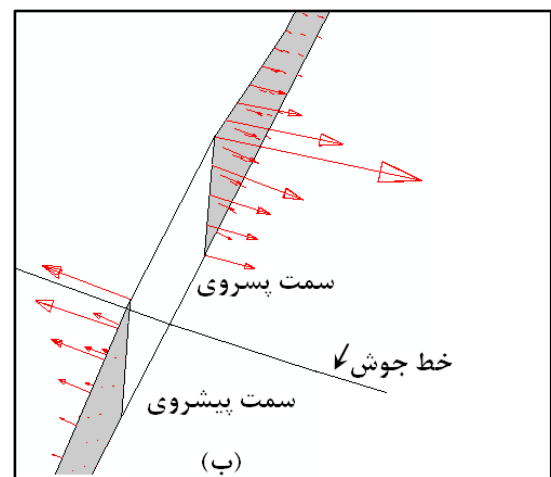
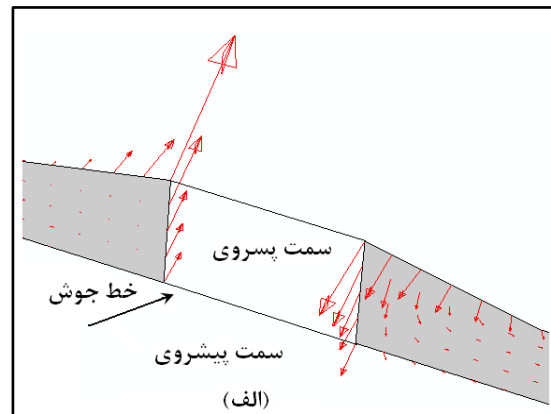
سازگار نیست. در آزمایشات عملی انتشار یافته، بیشینه دمایی با افزایش سرعت دورانی

افزایش می‌یابد. یکی از دلایل این عدم تطابق را می‌توان مناسب نبودن شرایط تماسی دانست. اعمال ضریب اصطکاک وابسته به دما و لحاظ کردن اثر چسبندگی در تولید حرارت و جریان ماده می‌تواند در به دست آوردن نتایج بهتر مفید باشد. بیشینه دمایی در پشت ابزار و در سمت پیشروی وجود دارد. نتایج نشان دادند که پروفایل سرعت در دو سمت اتصال متفاوت است که دلیل اصلی متفاوت بودن خواص در دو سمت جوش است.

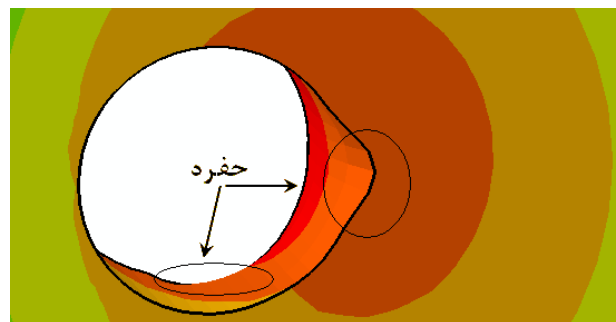
۹- مراجع

1. Heurtier, P. "Mechanical and Thermal Modeling of Friction Stir Welding", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 171, No. 3, pp. 348–357, 2006.
2. Cho, J.H., Donald, E.B. and Dawson, P.R. "Modeling Strain Hardening and Texture Evolution in Friction stir Welding of Stainless Steel", Materials Science and Engineering, Vol. 11, No. 8, pp.146–163, 2005.
3. Nandan, R., DebRoy, T. and Bhadeshia, H.K.D.H. "Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties", Wiley & Sons, New York, 2008.
4. Song, M. and Kovacevic, R. "Thermal Modeling of Friction Stir Welding in a Moving Coordinate System and its Validation", Int. J. of Machine Tools & Manufacture Vol. 43, No. 6, pp.605–615, 2003.
5. Nandan, R., DebRoy, T. and Bhadeshia HKDH "Recent Advances in Friction-Stir Welding—Process, Weldment Structure and Properties", Journal of Progress in Materials Science, Vol. 53, No. 2, pp. 980–1023, 2008.
6. Yeong-Maw H., Zong-Wei K., Yuang-Cherng Ch., and Hung-Hsiou H., "Experimental Study on Temperature Distributions within the Work piece During Friction Stir Welding of Aluminum Alloys", Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, No. 1, pp.778–787, 2008.
7. Chao, Y.J., Qi, X., and Tang, W. "Heat Transfer in Friction Stir Welding—Experimental and Numerical Studies". Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, Vol. 125, No. 3, pp.138–145, 2003.
8. Rajamanickam, N., Balusamy, V., Madhusudhanna Reddy, G., and Natarajan K. "Effect of Process Parameters on Thermal History and Mechanical

ایجاد شده است. به دلیل وجود حفره و اعوجاج شدید مش تحلیل متوقف شده است.



شکل (۱۲): پروفایل سرعت در (الف) صفحه اتصال (ب) صفحه عمود بر خط جوش (سرعت دورانی ۶۰۰ rpm).



شکل (۱۳): ایجاد حفره در سطح پایینی و بالایی ورق (سرعت دورانی ۴۰۰ rpm و سرعت جوشکاری ۲mm/s).

۸- نتیجه‌گیری

اثر حرارتی و مکانیکی ابزار در تولید حرارت و ایجاد جریان در شبیه‌سازی بررسی شد. هرچند جریان ماده ایجاد شده حول ابزار و توزیع دمایی به دست آمده از تحلیل المان محدود تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد اما، افزایش سرعت دورانی تغییر چندانی در بیشینه دمایی ایجاد نمی‌کند که با نتایج تجربی

- Properties of Friction Stir Welds". Journal of Materials and Design, Vol. 30, No. 4, pp. 2726–2731, 2008.
9. Upadhyay, P. and Reynolds A.P., "Effects of Thermal Boundary Conditions in Friction Stir Welded AA7050-T7 Sheets". Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 52, No. 7, pp. 1537–1543, 2010.
 10. Crawford, R., Cook, G.E., Strauss, A.M., Hartman, D.A., and Stremler, M.A. "Experimental Defect Analysis and Force Prediction Simulation of High Weld Pitch Friction Stir Welding", Journal of Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 11, No. 2, pp. 657–665, 2006.
 11. ASM Handbook, Vol. 4, "Heat treating", ASM International, Metals Park, Ohio, 2002.