

مدلسازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی اتیلن با چگالی بالا و مقایسه آن با نتایج تجربی

حامد آقاجانی درازکلا

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، h.aghajany@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۷

چکیده

در این مقاله آثار سرعت خطی و دورانی ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر توزیع و تولید حرارت در سطح و درون اتصال، سیلان مواد و هندسه محل اغتشاش یک قطعه کار پلیمری از جنس پلی اتیلن با چگالی بالا مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور شبیه سازی فرایند از روش دینامیک سیالات محاسباتی از مجموعه نرم افزار تجاری سی. اف. دی. فلونت^۱ استفاده شد. برای بالا بردن دقت شبیه سازی، خط جوش که در مرز بین قطعه کارها قرار داشت، به عنوان یک سیال غیرنیوتنی با رفتار شبه مذاب در اطراف پین ابزار مدلسازی شد. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که با افزایش نسبت سرعت چرخشی به سرعت خطی ابزار، جریان مواد در جلو ابزار اندکی بیشتر می شود و ابعاد منطقه اغتشاش بزرگتر می گردد. بیشینه درجه حرارت تولید شده و اغتشاش مواد در سمت پیشرو اتصال مشاهده شد. نتایج حاصل از مدل توسط نتایج تجربی سایر محققان مورد مقایسه قرار گرفت و حداکثر ۳ درصد اختلاف با نتایج عملی داشت. براساس پارامترهای جوشکاری مورد بررسی، نتایج حاصل از شبیه سازی حداکثر حرارت تولید شده ۱۲۶ درجه سانتی گراد، بیشینه سرعت جابه جایی مواد ۰/۶ متر بر ثانیه در شانه ابزار و بیشینه فشار ایجاد شده روی سیال ۱۰ مگاپاسکال در محل اتصال پیش بینی شد.

واژگان کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه سازی حرارتی، جریان مواد، پلی اتیلن با چگالی بالا^۲

۱. مقدمه

گستره بیشتری از مواد را تحت پوشش قرار دهد [۳]. مندرس و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی و بهینه سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اکریلو نیتریل بوتادین استایرن^۴ پرداختند [۴-۵]. سیموس و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی PMMA پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مناطق شکل یافته در اتصال این ماده با جوشکاری اصطکاکی فلزات بسیار متفاوت است [۶]. در پژوهشی دیگر، آزارسا (۲۰۱۴) به

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۳ یک فرایند جدید اتصال دهی در مقایسه با دیگر روش های جوشکاری به حساب می آید که مزایای زیادی چون قیمت کم، انعطاف پذیری بالا، بی نیاز از مهارت جوشکار و بدون آلودگی دارد [۱]. این فرایند عموماً جهت جوشکاری انواع فلز در تولید اتصالات همجنس و غیرهمجنس به کار می رود [۲]. به تازگی این روش جهت اتصال مواد غیرفلزی نیز استفاده و سبب شده تا این روش اتصال

فرایند، جریان مواد و هندسه محل اغتشاش در هنگام اغتشاش در اتصال پلی اتیلن با چگالی بالا است.

۲. شبیه سازی فرایند

۲-۱. معادلات حاکم بر فرایند

در تحلیل ریاضی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، گرمای اصطکاکی تولیدشده توسط ابزار، نیروهای واردشده بر قطعه کارها و آمیختن جریان مذاب اصلی ترین معادلات حاکم بر فرایند به شمار می روند. اگر سرعت خطی و سرعت دورانی ابزار در طول فرایند ثابت باشد، مقدار گرمای تولیدشده نیز در خط جوش پایدار می ماند. در شبیه سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به روش مکانیک سیالات محاسباتی، جریان و دمای مذاب با حل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی برای مذابی که به عنوان سیالات غیرنیوتنی (تراکم ناپذیر) فرض شده است، به دست می آید. براساس فرضیات فوق معادله پیوستگی را می توان به صورت ۱ نوشت [۱۸]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

به طوری که در این معادله، i بیانگر جهت های اصلی X ، Y و Z است و پارامتر u به سرعت جریان مواد خمیری اشاره دارد. معادله بقای ممنتوم ابزار که در خط اتصال (محور x) دارای سرعت ثابت رو به جلو می باشد، به صورت ۲ تعریف می شود [۱۸]:

$$\rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho U_1 \frac{\partial u_j}{\partial x_1} \quad (2)$$

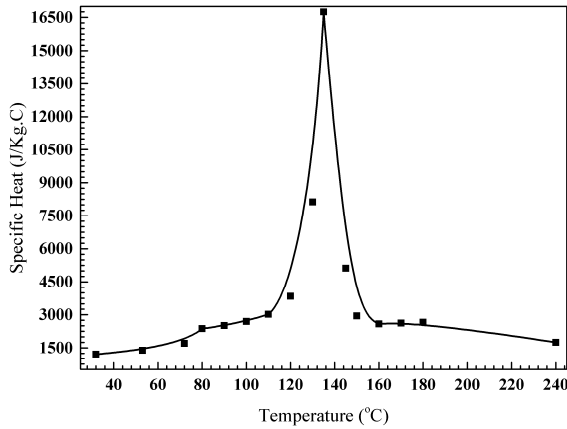
در معادله ۲، u_i سرعت خطی ابزار در خط جوش، ρ چگالی و P فشار حرکت دهنده جریان تعریف می شود. در این معادله μ ضریبی برای سیال غیرنیوتنی است. این ضریب نسبت تنش سیلان مؤثر (σ_e) به نرخ کرنش مؤثر ($\dot{\epsilon}$) را نشان می دهد و به صورت ۳ تعریف می شود [۱۸]:

$$\mu = \frac{\sigma_e}{3\dot{\epsilon}} \quad (3)$$

مقادیر σ_e تنش سیلان مؤثر و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش مؤثر هستند که با توجه به خواص فلزات، با ارتباط بین تنش سیلان و روابط زرنر - هولمن تعریف می شوند [۱۵-۱۶]. چون تغییر ساختار کریستالی و ضریب زرنر - هولمن در ساختار پلیمرها (آمورف)

اتصال پلی اتیلن با چگالی بالا پرداختند و دریافتند که در سرعت دورانی بالا و سرعت خطی کم عیوب جوش کمتر می شوند و استحکام اتصال بالا می رود [۷]. بوتسکورت (۲۰۱۲) نیز به بررسی و بهینه سازی اتصال غیرهمجنس پلی اتیلن با چگالی بالا و پلی پروپیلن پرداختند [۸]. پانرسیلووم و همکاران (۲۰۱۴) به امکان سنجی اتصال نایلون ۶ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداختند [۹]. بسیاری از محققان برای درک بهتر فاکتورهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اقدام به شبیه سازی و توسعه آن به روش مکانیک سیالات محاسباتی کردند. پژوهشگرانی چون اسمیت [۱۰] و نورث [۱۱] اولین محققانی بودند که روش دینامیک سیالات محاسباتی را در شبیه سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به کار بردند. آنها قطعه کارها را به عنوان نوعی از سیال غیرنیوتنی در شبیه سازی خود مدل کردند. سایدل و رینولدز نیز مدلی دوبعدی برای پیش بینی جریان مواد در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه و مشاهده کردند که در سرعت دورانی و خطی کم ترکیب قابل ملاحظه ای به صورت افقی در سیال رخ می دهد [۱۲]. این اثر خود نشان دهنده نیاز بیشتر به تحلیل سه بعدی فرایند بود. ژانگ و همکاران (۲۰۰۵) نیز با توسعه مدل دوبعدی جریان مواد به این نتیجه رسیدند که مواد پشت ابزار نسبت به دیگر نقاط فلز پایه، بیشترین تغییر شکل را در اطراف پین دارد [۱۳]. این بازه تغییر شکل در زاویه ای بین ۳۳۰ تا ۳۶۰ درجه اتفاق می افتد. جریان مواد در اتصال فولاد کربنی با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط ناندان و همکاران (۲۰۰۶) با ارائه مدلی سه بعدی بررسی شد [۱۴-۱۵]. آنها معادلات فرایند را براساس انتقال حجم گشتاور و انرژی تعریف کردند و ویسکوزیته سیال غیرنیوتنی را براساس نرخ کرنش، دما و خواص ماده به دست آوردند. ناسار و همکاران (۲۰۱۲) جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ AZ31B Mg را براساس مدل جریان اویلری کوپل شده^۶ و مسائل انتقال حرارت مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت دورانی دمای منطقه جوش بالا می رود و با افزایش سرعت خطی کاهش می یابد [۱۶]. در پژوهش دیگری، جی و همکاران (۲۰۱۲) اثر شکل پین ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر جریان مواد بررسی کردند [۱۷]. هدف این مقاله، بررسی آثار سرعت خطی و سرعت دورانی ابزار بر تولید گرمای اصطکاکی

پارامترهای مکانیکی و حرارتی وابسته به دما برای ابزار مورد استفاده در طول شبیه‌سازی ضروری به‌نظر می‌رسد. با توجه به توضیحات فوق ضرایب گرمای ویژه و انتقال حرارت پلی‌اتیلن با چگالی بالا را می‌توان از شکل ۲ استفاده کرد [۱۹].



شکل ۲. ضرایب گرمای ویژه و انتقال حرارت پلی‌اتیلن با چگالی بالا

تعیین شده است. شرایط مکانیکی بین قطعه‌کارها و ابزار تنها در فصل مشترک بین آنها حاکم است و بقیه مرزها از این قانون مستثنا هستند. در شکل ۴ نمایی شماتیک از ابزار و نواحی مرزی مختلف بین ابزار و قطعه‌کار نمایش داده شده است. معادله حرارت تولیدشده در فصل مشترک شانه ابزار و قطعه‌کار به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

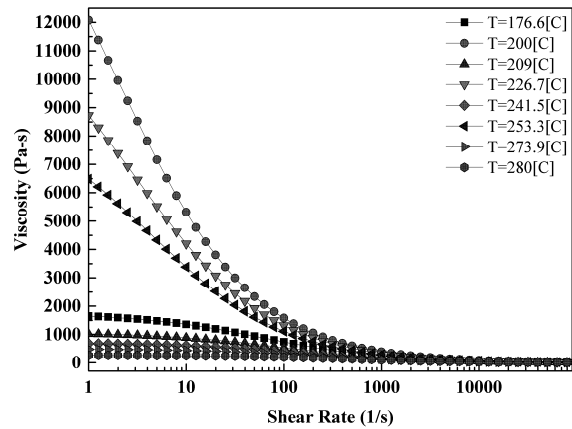
$$Q_{ss} = \delta \omega \int_{R_2}^{R_1} \tau \cdot 2\pi r^2 dr + (1-\delta) \omega \int_{R_2}^{R_1} \mu P \cdot 2\pi r^2 dr = [\delta \tau + (1-\delta) \mu P] \cdot \frac{2}{3} \pi \omega (R_1^3 - R_2^3) \quad (11)$$

شار حرارتی در فصل مشترک بین شانه ابزار و قطعه‌کار به صورت رابطه ۱۲ تعریف می‌شود [۲۰]. در این روابط δ و μ به ترتیب ثابت چرخش مواد و ضریب اصطکاک وابسته به دما که ۰/۰۱، ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شد [۱۹]. حرارت تولیدشده توسط بدنه بین ابزار به صورت ۱۳ تعریف می‌شود [۲۰].

$$q_{ss} = \frac{Q_{ss}}{\pi(R_1^2 - R_2^2)} = \frac{[\delta \tau + (1-\delta) \mu P] \cdot 2\omega(R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2)}{3(R_1 + R_2)} \quad (12)$$

شار حرارتی در فصل مشترک بین بدنه بین ابزار و قطعه‌کار به صورت رابطه ۱۴ تعریف می‌شود [۲۰].

وجود ندارد، می‌توان ضریب μ را نسبت ویسکوزیته مذاب به نرخ برشی تعریف کرد [۱۹]. نمودار ویسکوزیته به نرخ برشی پلی‌اتیلن با چگالی بالا در شکل ۱ آورده شده است [۱۹]. با توجه به تغییرات خواص فیزیکی فلزات با بالا رفتن دما، دستیابی به



شکل ۱. نمودار ویسکوزیته به نرخ برشی پلی‌اتیلن با چگالی بالا

برای خواص حرارتی ابزار جوشکاری (فولادی) داریم [۱۸]:

$$C_p = 468.3 - 8.5T + 3.0 \times 10^{-4} T^2 + 1.8 \times 10^{-7} T^3 \quad (8)$$

$$K = 3.8 + 0.092T - 1.8 \times 10^{-4} T^2 + 7.8 \times 10^{-8} T^3 \quad (9)$$

معادله بقای انرژی حرارتی برای سیال غیرنیوتنی در جهت‌های X ، Y و Z به صورت زیر معرفی می‌شود [۱۸]:

$$\rho C_p \frac{\partial(u_i T)}{\partial x_i} = -\rho C_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q \quad (10)$$

در معادله فوق ρ چگالی سیال، c_p ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت، u_i سرعت مواد در جهت‌های X ، Y و Z دما، k ضریب انتقال حرارت تعریف می‌شوند. پارامتر K وابسته به دما برای این ماده در شکل ۳ آمده است. در معادله ۱۰ مجموع گرمای تولیدشده از تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک در فلزات در دو مولفه Q_b و Q_i خلاصه می‌شوند، اما در ساختارهای آمورف Q_b صفر در نظر گرفته می‌شود. معادلات فوق پس از کدنویسی، توسط سربرگ Define و User-Defined Function به نرم‌افزار فلونتت وارد شد.

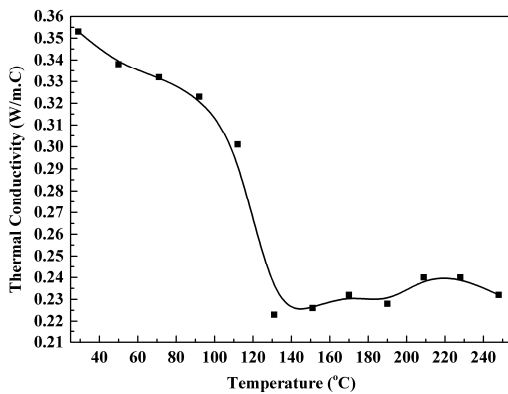
۲-۲. شرایط مرزی و اولیه

در این مدل‌سازی، دمای هوا و دمای اولیه هر کدام از سیال‌ها ۳۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است. ورود و خروج هر یک از سیال‌ها از نوارهای مرزی ورودی و نوارهای خروجی

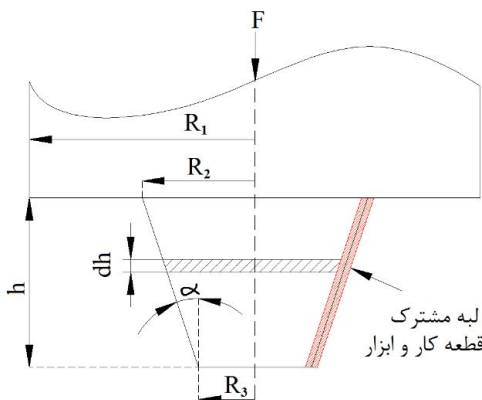
در این رابطه، B ضریب استفان بولتزمن، T_a دمای محیط و h ضریب انتقال حرارت در سطح است که در این شبیه‌سازی ۳۰۰ وات بر متر مربع درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت در کف نیز به صورت زیر تعریف می‌شود که در آن h_b بیانگر ضریب انتقال حرارت در کف قطعه کار است که ۳۰۰ وات بر متر مربع درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد [۱۸]:

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{Bottom} = h_b (T - T_a) \quad (20)$$

در طول شبیه‌سازی، سرعت دورانی و خطی پین و شانه ابزار به صورت جداگانه انجام شد. به همین منظور مجموع سرعت‌های دورانی و خطی به صورت مؤلفه‌های جداگانه در سیستم مختصاتی کارترین تعریف شدند. در شکل ۵ تجزیه نیروهای دورانی و خطی را به یک سیستم واحد نمایش داده شده است.



شکل ۳. تغییرات ضریب انتقال حرارت پلی اتیلن با چگالی بالا با حرارت



شکل ۴. شماتیک نواحی مختلف ابزار

جهت ساده‌سازی معادلات و با توجه به شکل ۵ سرعت دورانی پین ابزار را می‌توان به مؤلفه‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۱۸]:

$$Q_{pss} = \delta \omega \int_0^H 2\pi (R_3 + h \tan \alpha)^2 \tau dh + (1-\delta) \omega \int_0^H \pi P_1 \cdot 2\pi (R_3 + h \tan \alpha)^2 \frac{dh}{\cos \alpha} \quad (13)$$

$$= \frac{2\delta\pi\omega\tau}{3 \tan \alpha} (R_2^3 - R_3^3) + \frac{2}{3} (1-\delta) \frac{\pi\mu P_1 \omega}{\sin \alpha} (R_2^3 - R_3^3)$$

$$q_{ss} = \frac{Q_{pss}}{\int_0^H 2\pi (R_3 + h \tan \alpha) \frac{dh}{\cos \alpha}} = \frac{2\delta\omega\tau (R_2^3 - R_3^3) \cdot \cos \alpha}{3(R_2^2 - R_3^2)} \quad (14)$$

$$+ \frac{2(1-\delta)\mu P_1 \omega (R_2^3 - R_3^3)}{3(R_2^2 - R_3^2)}$$

در نهایت حرارت تولیدشده توسط کف پین ابزار برابر است با [۲۰]:

$$Q_{pbs} = \delta \omega \int_0^{R_3} \tau \cdot 2\pi r^2 dr + (1-\delta) \omega \int_0^{R_3} \mu P \cdot 2\pi r^2 dr = \frac{2\delta\pi\tau\omega R_3^3}{3} + \frac{2(1-\delta)\pi\mu P\omega R_3^3}{3} \quad (15)$$

شار حرارتی در فصل مشترک بین کف پین ابزار و قطعه کار به صورت ۱۶ تعریف می‌شود [۱۹]:

$$q_{pbs} = \frac{Q_{pbs}}{\pi R_3^2} = \frac{2\omega R_3}{3} (\delta\tau + (1-\delta)\mu P) \quad (16)$$

در نهایت مقدار حرارت کلی تولیدشده برابر است با [۲۰]:

$$Q_T = Q_{ss} + Q_{pss} + Q_{pbs} \quad (17)$$

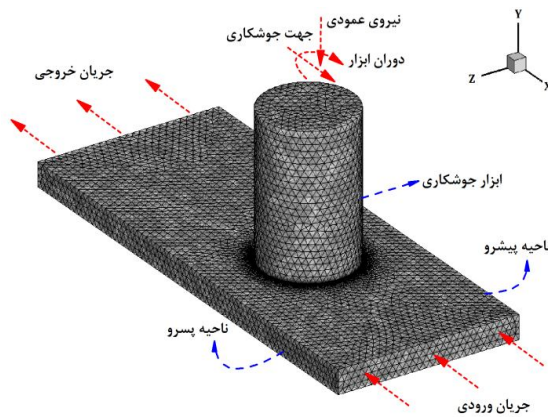
در طول فرایند مقداری از گرمای تولیدشده در فصل مشترک ابزار و قطعه کار به هدر می‌رود. این پدیده ناشی از انتقال حرارت بین ابزار و قطعه کار است. به منظور بالابردن دقت شبیه‌سازی، این پارامتر به صورت یک ضریب در معادله ۱۷ قرار می‌گیرد. در نهایت معادله ۱۷ در فصل مشترک ابزار و قطعه کارها به شکل ۱۸ در خواهد آمد [۱۸]:

$$q_T = \frac{(\sqrt{k\rho C_p})_{workpiece}}{(\sqrt{k\rho C_p})_{workpiece} + (\sqrt{k\rho C_p})_{tool}} Q_T \quad (18)$$

انتقال حرارت بین سطح قطعه کارها و محیط اطراف ابزار به صورت تشعشی و رسانایی انجام می‌شود که آنها را نیز به صورت زیر می‌توان تعریف کرد [۱۸]:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{Top} = B(T^4 - T_a^4) + h(T - T_a) \quad (19)$$

کف قطعه کار قرار گرفت. فلز پایه به عنوان سیال غیرنیوتنی، تراکم‌ناپذیر، با رفتار ویسکوپلاستیک و چگالی مطابق با پلی‌اتیلن با چگالی بالا تعریف شد. برای تولید المان‌های حجمی از T-grid combination با شکل Tetrahedral/Hybrid استفاده شد.



شکل ۶. مدل مش‌بندی شده فرایند

با توجه به اهمیت فصل مشترک ابزار و قطعه‌کارها، فضای اطراف ابزار و خود ابزار نیاز به تعریف دقیق‌تری نسبت به دیگر نقاط داشت. به همین خاطر، یک تابع اندازه که دارای اندازه کمینه، نرخ رشد و اندازه بیشینه است در تولید المان‌ها استفاده شد. پس از چندین مرتبه شبیه‌سازی به روش آزمون و خطا، بهترین حالت مش‌بندی برای انجام تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت. حجم کوچکترین المان تولیدشده در مدل، ۰/۱ میلی‌متر مکعب و حجم بزرگترین المان ۲/۰ میلی‌متر مکعب بود. در نهایت ۱۵۶۸۰۰ عدد المان با نرخ رشد ۱/۴ جهت شبیه‌سازی تولید شد. شکل ۶ مدل مش‌بندی شده فرایند را نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به پارامترهای فرایند که در جدول ۱ گنجانده شده است، متناسب با مراحل آزمایشگاهی انتخاب شدند.

۴-۲. مراحل آزمایشگاهی

به منظور تصدیق نتایج حاصل از مدل‌سازی جوشکاری، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با تست عملی تصدیق شد. ایناویا و همکاران (۲۰۱۳) به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی‌اتیلن با چگالی بالا با ابعاد ۵×۴۰×۱۰۰ میلی‌متر با ابزار فولادی پرداختند [۲۱]. ابزار بکار برده شده توسط آنها دارای رزوه راستگرد مطابق با پیچ M10 بود که در شکل ۷ نمایش داده شده است.

$$u = (\omega R_p \sin \theta - U_1) \quad (21)$$

$$v = (\omega R_p \cos \theta) \quad (22)$$

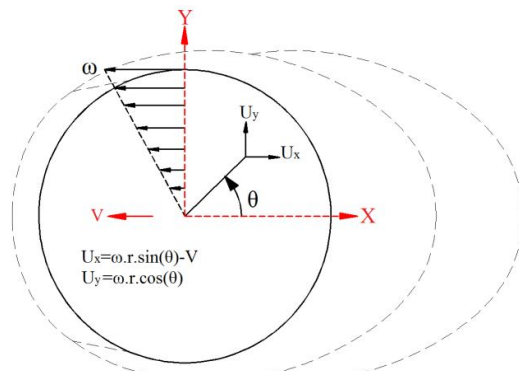
$$w = k \left(\frac{\omega}{2\pi} \right) R_p \quad (23)$$

در معادله ۲۳، ضریب k بیانگر گام رزوه روی پین ابزار است که در صورت رزوه‌دار بودن پین در معادله اعمال می‌شود. به طور مشابه می‌توان مؤلفه‌های سرعت شانه ابزار را نیز به صورت زیر نوشت [۱۸]:

$$u = (\omega r \sin \theta) \quad (24)$$

$$v = (\omega r \cos \theta) \quad (25)$$

با توجه به یکپارچگی ابزار تعریف‌شده در این مدل، می‌توان مقدار r را فاصله بین سطح خارجی پین تا سطح خارجی ابزار در نظر گرفت.



شکل ۵. تجزیه نیروهای دورانی و خطی ابزار

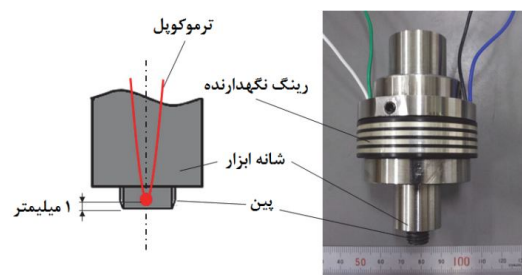
۲-۳. مدل‌سازی و مش‌بندی فرایند

بر اساس تعریف فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزار این فرایند با حرکت دورانی، ابتدا در خط اتصال نفوذ کرده و پس از آن حرکت روبه جلو را در امتداد خط جوش آغاز می‌کند و در انتها از محل اتصال خارج می‌شود. در این مقاله از حالت‌های اولیه و انتهایی ابزار صرف‌نظر شده است و تحلیل فرایند در زمان پیشروی روبه جلوی ابزار انجام شد. در حالت پایدار و در هنگامی که ابزار روبه جلو حرکت می‌کند، گرمای اصطکاکی به‌طور یکنواخت و منسجم در سطح و درون دو قطعه‌کار ایجاد می‌شود. در این وضعیت شانه و پین ابزار به‌طور همزمان، با سرعت برابر و در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌چرخند. در این مدل یک ابزار با پین مخروطی شکل که بدون درجه انحراف نسبت به بردار نرمال فلزات پایه است، مورد استفاده قرار گرفته شد. موقعیت کف ابزار ۰/۱ میلی‌متر بالاتر از

جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی

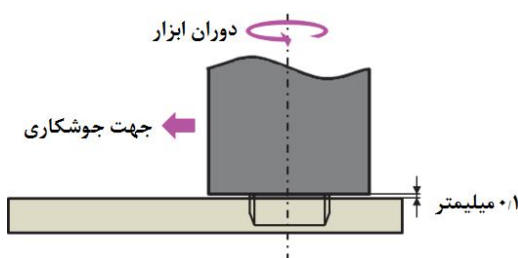
مقدار	پارامترهای مورد استفاده
۱۰۰×۴۰×۵	ابعاد قطعه کار (میلی متر)
۱۰	شعاع شانه ابزار (میلی متر)
۵	شعاع بین ابزار (میلی متر)
۴٫۸	ارتفاع بین ابزار (میلی متر)
.	زاویه انحراف ابزار (درجه)
۸۰۰، ۱۲۴۰	سرعت دورانی (دور در دقیقه)
۴۵، ۳۰، ۱۵	سرعت خطی (میلی متر بر دقیقه)

دورانی و خطی مختلف نمایش داده شده است. مشابه رفتار حرارت در فلزات، در این پلیمر نیز با افزایش سرعت دورانی تولید حرارت بیشتر و با افزایش سرعت خطی مقدار حرارت تولید شده کاهش می یابد. بیشینه دمای تولید شده در این شبیه سازی ۱۲۶ درجه سانتی گراد بود که در سرعت دورانی ۱۲۴۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۱۵ میلی متر بر دقیقه حاصل شد. دمای واقعی ثبت شده در پارامترهای مذکور ۱۲۲/۶ درجه سانتی گراد اندازه گیری شده بود. مقایسه این دو مقدار نشان از نزدیکی قابل قبول نتایج شبیه سازی شده با نتایج واقعی دارد. در شکل ۱۰ نتایج حاصل از شبیه سازی دمای حداکثر برحسب کانتورهای رنگی نمایش داده شده است. چون جهت حرکت ابزار پادساعتگرد انتخاب شد، نفوذ حرارت نیز در سمت پیشرو بیشتر از سمت پسرو بود. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، به دلیل ضریب انتقال حرارت کم و ساختار آمورف پلیمرها، منطقه تغییر شکل یافته و متأثر از حرارت کوچک است. در شکل ۱۱ توزیع حرارت تولید شده در سرعت دورانی ۱۲۴۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۱۵ میلی متر بر دقیقه بر روی سطح قطعه کار نمایش داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، توزیع حرارت در سمت پیشرو اندکی بیشتر از پسرو است و گسترش حرارت در سطح قطعه کار کم است. این مسئله به دلیل کم بودن ضریب انتقال حرارت پلی اتیلن با چگالی بالا است.



شکل ۷. ابزار استفاده شده در فرایند [۲۱]

در پژوهش ایناویا و همکاران (۲۰۱۳)، یک ترموکوپل k جهت ثبت دما درون ابزار کار گذاشته شد و ابزار جوشکاری نیز دارای ۴/۷ میلی متر عمق فروروی بود [۲۱]. در این وضعیت شانه ابزار از سطح قطعه کار ۰/۱ میلی متر فاصله داشت که این مطلب نشان دهنده عدم تماس شانه ابزار با سطح قطعه کار بود. در شکل ۸ نمایی شماتیک از عمق فروروی ابزار نمایش داده شده است. ابزار جوشکاری دارای سرعت های دورانی ۸۰۰ و ۱۲۴۰ دور بر دقیقه و سرعت های خطی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ میلی متر بر دقیقه بود و ابزار بدون زاویه انحراف بود. به منظور بررسی استحکام و جریان داخلی مواد از تست کشش، میکروسکوپ نوری و دوربین SEM استفاده شد.



شکل ۸. عمق فروروی ابزار در قطعه کار

۳-۲. بررسی نرخ کرنش و تنش سیلان مواد

آنالیز دقیق تنش اعمال شده توسط ابزار اطلاعات مفیدی از فورج مواد خمیری می دهد که براساس آن پیش بینی و بررسی شکل گیری عیوب راحت تر انجام می گیرد. در شکل ۱۲ توزیع تنش اعمال شده توسط ابزار روی صفحه خارجی قطعه کار نشان داده شده است که در سرعت دورانی ۱۲۴۵ دور در دقیقه و سرعت خطی ۴۵ میلی متر بر دقیقه حاصل شده است. به دلیل

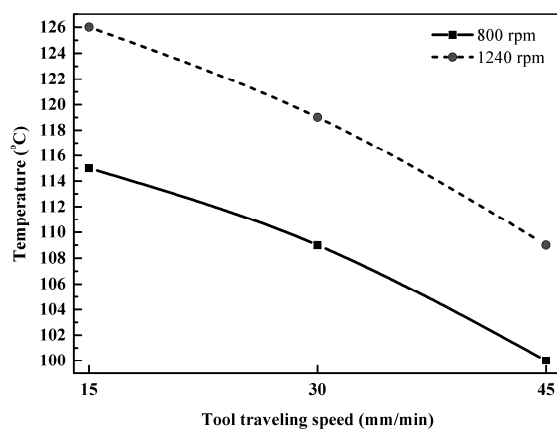
۳. بحث و نتایج

۳-۱. بررسی تولید حرارت

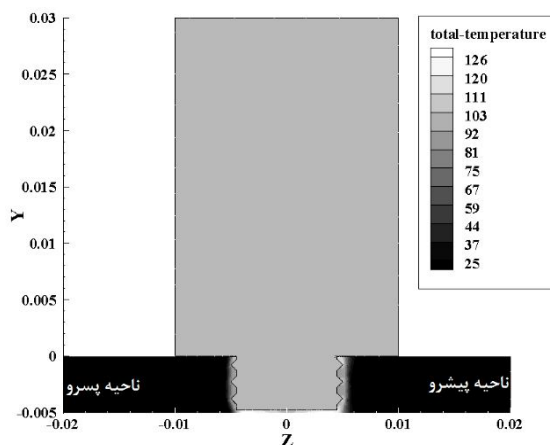
تولید حرارت در طول فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عوامل مکانیکی فراوانی وابسته است. در شکل ۹ بیشینه حرارت های تولید شده توسط ابزار در شبیه سازی و در سرعت های

عدم وجود زاویه انحراف بین محور ابزار و بردار نرمال صفحه خارجی قطعه کار، تنش اعمال شده در جلو ابزار با پشت آن برابر است. این پدیده نشان از برابری نیروی روبه جلو و فورج ابزار روی مواد در جلو و پشت ابزار دارد. به اعتقاد برخی از محققان این توزیع تنش ناشی از حرکت خطی ابزار به سمت جلو است که باعث تنش کششی در قسمت جلو و فشاری در پشت ابزار می‌گردد [۴، ۲۶، ۲۷]. بیشینه تنش ایجاد شده ۱۰ مگاپاسکال به صورت کششی و کمینه مقدار آن ۱۰ مگاپاسکال به صورت

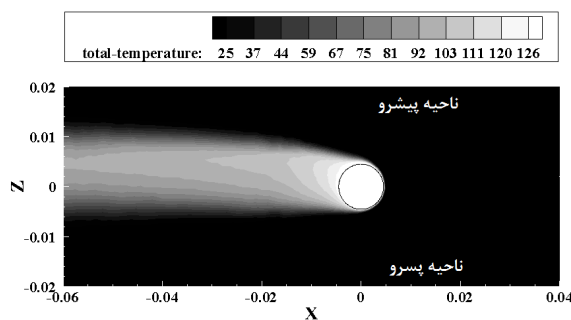
فشاری در پشت ابزار بود. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت مقدار تنش در ناحیه پسرو بیشتر فشاری و در ناحیه پیشرو بیشتر کششی است. به دلیل اینکه سطح قطعه کار با شانه ابزار در تماس نیست، نرخ کرنش و چرخه حرارتی کمتری را متحمل می‌شوند و به همین دلیل تنش بیشتری نیاز است تا مواد این نواحی به اغتشاش درآیند. دلیل این مسئله این است که نواحی در تماس با شانه ابزار، چرخه حرارتی و کرنشی کمتری را متحمل می‌شوند.



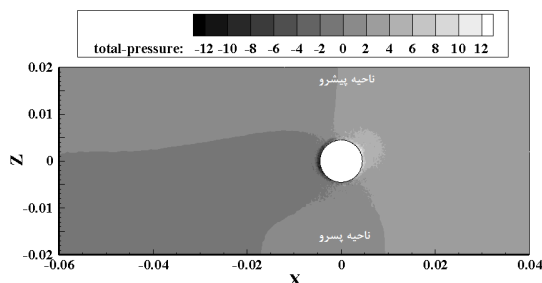
شکل ۹. نتایج شبیه‌سازی تولید حرارت (برحسب سانتی‌گراد)



شکل ۱۰. تولید دما در مقطع عرضی اتصال (برحسب سانتی‌گراد)

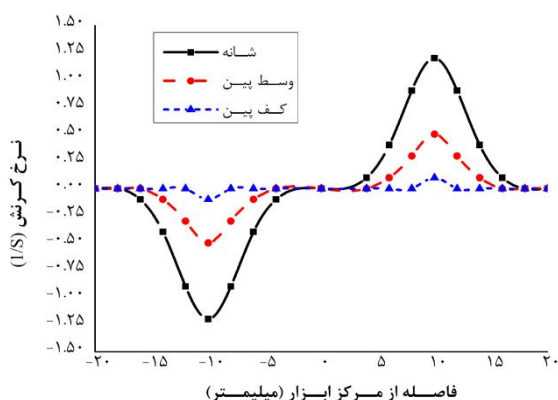


شکل ۱۱. توزیع سطحی دما روی قطعه کار (برحسب سانتی‌گراد)



شکل ۱۲. توزیع تنش در حین فرایند (برحسب مگاپاسکال)

نیز نمونه واقعی که توسط اینابویا و همکارانش [۲۱] در سرعت دورانی ۱۲۴۰ دور بر دقیقه گزارش شد، آمده است. به دلیل عدم وجود ساختار کریستالی و ضریب انتقال حرارت کم در این پلیمر، منطقه اغتشاش و تغییر شکل یافته توسط پین ابزار کوچک است. وجود ساختار آمورف و خواص حرارتی کم سبب می شود تا تمرکز حرارت و جریان مواد خمیری تنها در منطقه نازک در اطراف ابزار به وجود آید. به منظور بررسی تغییرات جریان مواد خمیری روی ابزار، نتایج حاصل از شکل قبل مورد استفاده قرار گرفت. کشیدگی مناسب مواد توسط ابزار در درون محل اغتشاش بیانگر تولید اتصال بی عیب و جریان داخلی کافی در محل اغتشاش است. به سختی کم این پلیمر حتی در سرعت دورانی کم هم حرارت تولید شده توسط ابزار کافی بود و سبب شد تا ترکیب مناسب مواد در محل اتصال شکل گیرد. به طور نمونه جریان داخلی منطقه اغتشاش توسط ابزار، که در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه ایجاد شده است، به همراه نمونه واقعی در شکل ۱۶ به نمایش گذاشته شده است. همان طور که مشاهده می شود، به دلیل تولید حرارت کافی، ابزار جریان کامل را در اطراف خود ایجاد کرد و بر همین اساس عیب خاصی در منطقه اغتشاش ایجاد نشد.



شکل ۱۳. نرخ کرنش مواد در حین جوشکاری

با افزایش سرعت دورانی تا ۱۲۴۰ دور بر دقیقه ترکیب مواد در اطراف ابزار کامل بود و جریان داخلی مواد در منطقه اغتشاش نیز بدون ایجاد عیب و نقص انجام گرفت. در شکل ۱۷ نمای عرضی از جریان مواد در اطراف ابزار و نمونه جوش داده شده واقعی در سرعت خطی ۱۵ میلی متر بر دقیقه نمایش داده شده است. شکل ۱۸ جریان مواد را در صفحه طولی اتصال در زمان

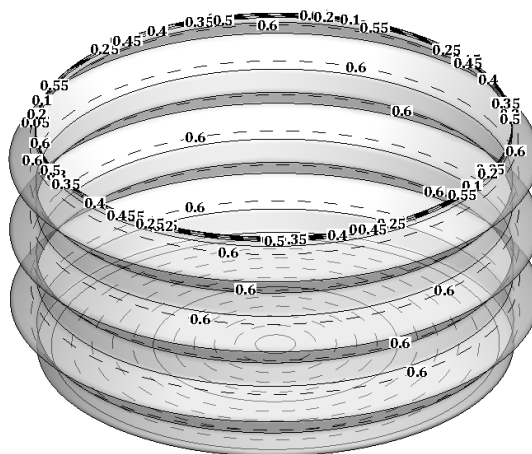
در شکل ۱۳ نتایج حاصل از نرخ کرنش محل اتصال آمده است. مقدار عددی که در پایین خط افقی قرار دارند، نرخ کرنش محل اتصال را در پشت ابزار نشان می دهند و عددی که در بالای خط افقی قرار دارند، نرخ کرنش محل اتصال را در جلو ابزار نشان می دهند. به دلیل اینکه جریان مواد خمیری از سمت پسرو به سمت پیشرو است، گرادیان سرعت خطی مواد در جهت X ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. این تغییرات تأثیر مستقیم در ضریب گرادیان سرعت دارد و سبب می شود تا نرخ کرنش نیز در جلو ابزار مقداری مثبت و در پشت ابزار مقداری منفی داشته باشد. این روند جریان در جهت Y به صورت عکس است. گرادیان سرعت خطی در این محور، با افزایش Y در جلو ابزار، کاهش می یابد و با کاهش Y در پشت ابزار، افزایش می یابد. این پدیده سبب می شود تا نرخ کرنش روندی معکوس نسبت به حالت قبل داشته باشد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، برآیند مقدار کرنش توسط شانه ابزار در جهت X و Y ، $-1.2(S^{-1})$ در پشت ابزار و $+1.2(S^{-1})$ در جلو ابزار به دست آمد.

۳-۳. بررسی شکل گیری عیوب و جریان داخلی مواد

در شکل ۱۴ نتایج حاصل از حل عددی سرعت مواد در اطراف ابزار آمده است؛ که در سرعت دورانی ۱۲۴۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۱۵ میلی متر بر دقیقه به دست آمد. به دلیل تولید گشتاور و سطح تماس بیشتر نوک رزوه پین ابزار نسبت به محیط داخلی فرورفته آن، چرخش مواد خمیری در سطح خارجی رزوه پین ابزار بیشتر از دیگر مناطق است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، بیشینه مقدار سرعت مواد در لبه بیرونی رزوه پین با مقدار $0/6$ متر بر ثانیه و کمینه آن $0/05$ متر بر ثانیه در کف ابزار به دست آمد. در شکل ۱۵ منطقه تغییر شکل یافته حاصل از جریان داخلی مواد که با شبیه سازی پیش بینی شد و

حرکت روبه جلو ابزار در سرعت دورانی ۱۲۴۰ نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که جریان مواد خمیری در پشت ابزار بیشتر از جلوی آن است. علت این مسئله در ضریب انتقال حرارت و ناپیوستگی ساختار پلی‌اتیلن با چگالی بالاست. به دلیل ضریب انتقال حرارت کم، نفوذ گرما در سمت جلو ابزار ناچیز است. از طرف دیگر آمورف بودن پلی‌اتیلن با

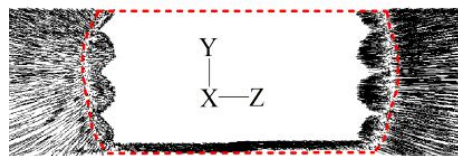
چگالی بالا سبب می‌شود تا منطقه خمیری جلو ابزار به اندازه کوچک شکل گیرد. برخلاف رفتار فلزات در هنگام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، منطقه جلوی ابزار به جای آنکه تحت تغییرات پلاستیک قرار بگیرند، بیشتر حالت الاستیک را تجربه می‌کنند. نتیجه این رفتار پلی‌اتیلن با چگالی بالا نازک شدن منطقه تغییر شکل یافته جلو ابزار را به دنبال دارد.



شکل ۱۴. سرعت مواد در اطراف ابزار (متر بر ثانیه)



(الف)



(الف)



(ب)



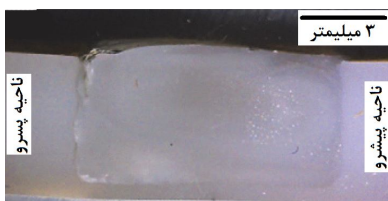
(ب)

شکل ۱۶. نمایی از الف) جریان شبیه‌سازی شده مواد در اطراف ابزار

شکل ۱۵. نمایی از الف) جریان داخلی مواد شبیه‌سازی شده

ب) نمونه واقعی در سرعت دورانی ۸۰۰ [۲۱]

ب) نمونه واقعی [۲۱]



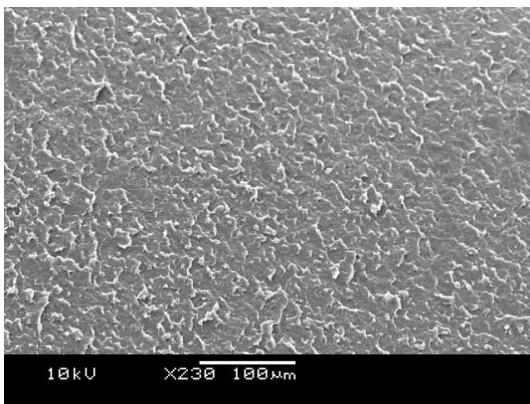
(ب)



(الف)

شکل ۱۷. نمایی از الف) جریان شبیه‌سازی شده مواد در اطراف ابزار، ب) نمونه واقعی در سرعت دورانی ۱۲۴۰ [۲۱]

سطح مقطع شکست بیانگر وقوع شکست ترد در منطقه اتصال است. جهت گیری جریان مواد با یک زاویه تقریباً یکسان، به دلیل بسیار الیاف پلی اتیلن با چگالی بالا در هنگام اغتشاش است که در زمان تست کشش رفتاری یکسان دارند. در عکسبرداری با بزرگنمایی بالاتر از سطح مقطع شکست نیز هیچ گونه عیب میکروسکوپی مشاهده نشد [۲۱]. این پدیده نیز بیانگر ترکیب مناسب مواد در منطقه اتصال است. شکل ۲۱ تصویر بزرگنمایی شده منطقه ۱ را که در شکل ۲۰ مشخص شده نشان می دهد.

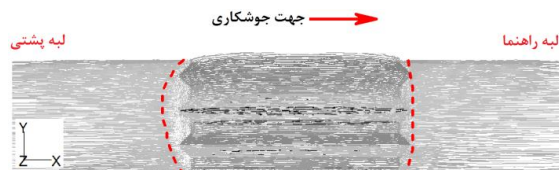


شکل ۲۱. تصویر بزرگنمایی شده منطقه ۱ از شکل ۲۰

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی اتیلن با چگالی بالا به روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی شد. از بررسی تغییرات حرارت و جریان مواد در سرعت های دورانی و خطی مختلف نتایج حاصل به صورت زیر عنوان می گردد. با توجه به پارامترهای انتخاب شده در این پژوهش، بیشترین دما (۱۲۶ درجه سانتی گراد) در سرعت دورانی ۱۲۴۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۱۵ میلی متر بر دقیقه تولید شد. مقدار دمای پیش بینی شده توسط شبیه سازی ۳/۴ درجه سانتی گراد با مقدار دمای واقعی ثبت شده اختلاف داشت. براساس نتایج شبیه سازی ماکزیمم تنش کششی در ناحیه جلو و عقب ابزار به اندازه ۱۰ مگاپاسکال در ضمن جوشکاری به دست آمد. همچنین تنش ضمن جوشکاری در سمت پیشرو کششی و در سمت پسرو به صورت فشاری پیش بینی شد. نتایج حاصل از بررسی جریان مواد نشان داد که برخلاف رفتار فلزات در این پلیمر، جریان مواد خمیری در پشت ابزار تقریباً برابر با جلوی آن است. علت این مسئله ناپیوستگی ساختار پلی اتیلن با چگالی بالا و به دنبال آن کم رنگ بودن اثر کشیدگی و فورج مواد از سمت جلو به عقب

با توجه به نتایج شبیه سازی به دلیل وجود عدم عیب در اتصال انتظار می رود تا منطقه اتصال در زمان تست کشش از استحکام مناسبی برخوردار باشد. نمونه واقعی جوشکاری شده پس از اتصال تحت آزمون کشش قرار گرفت که در شکل ۱۹ آورده شده است. ایناویا و همکاران [۲۱] گزارش داد که محل شکست از ناحیه کناری منطقه اغتشاش بود. این مسئله بیانگر ترکیب مناسب مواد در منطقه اغتشاش است.

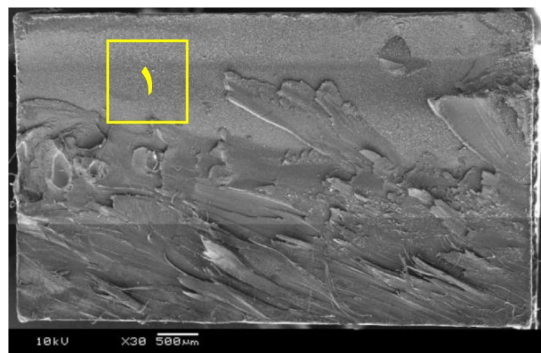


شکل ۱۸. جریان شبیه سازی شده مواد در سطح مقطع طولی اتصال



شکل ۱۹. نمونه تست کشش اتصال [۲۱]

در عکسبرداری SEM از سطح مقطع نمونه جوشکاری شده شکل ۱۹ پس از تست کشش، هیچ گونه خلل و فرجی مشاهده نشد. این مسئله بیانگر این موضوع بود که هیچ گونه عیب و نقصی از لحاظ ماکروسکوپی در محل اتصال به وجود نیامده است. شکل ۲۰ سطح مقطع شکست نمونه تست کشش را نشان می دهد که توسط دوربین SEM عکسبرداری شده است.



شکل ۲۰. سطح مقطع شکست نمونه تست کشش

همان گونه که در شکل مشاهده می شود، سطح مقطع شکست دارای رگه های همسو با زاویه تقریباً برابر است. بررسی

ابزار است. با افزایش سرعت دورانی ابزار، گرمای ورودی به محل اتصال افزایش یافته و سبب خواهد شد تا گستره بیشتری از مواد جلوی ابزار به حالت خمیری برسند. این مسئله سبب بزرگتر شدن مقدار اندک منطقه اغتشاش و خط اتصال می‌شود. به علت کشیدگی کم مواد از سمت پسرو به سمت پیشرو، مرز بین ناحیه تغییر شکل یافته پلاستیکی - حرارتی و ناحیه متأثر از

حرارت بسیار اندک بود و بر همین اساس عیب و ترک‌های ریز مشاهده نشد. سطح مقطع شکست نمونه تست کشش دارای رگه‌های همسو با زاویه تقریباً برابر بود که وقوع شکست ترد در منطقه اتصال را نشان می‌داد. در عکسبرداری با بزرگنمایی بالا از سطح مقطع شکست هیچگونه عیب میکروسکوپی مشاهده نشد.

۵. مآخذ

[۱] ح. آقاجانی درازکلا، م. الیاسی، م. حسین‌زاده. بررسی تاثیر حرارت تولیدشده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی کیفیت اتصال آلومینیوم به فولاد، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۵، شماره ۴، ص ۳۷۹-۳۹۰، تیر ۱۳۹۴.

- [2] H. A. Derazkola, H. J. Aval, M. Elyasi, Analysis of process parameters effects on dissimilar friction stir welding of AA1100 and A441 AISI steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 20, No. 7, pp. 553-562, 2015.
- [3] A. Bagheri, T. Azdast, A. Doniavi, An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets, *Materials & Design*, Vol. 43, pp. 402-409, 2013.
- [4] N. Mendes, P. Neto, M. A. Simão, A. Loureiro, J. N. Pires, A novel friction stir welding robotic platform: welding polymeric materials, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-10, 2014.
- [5] N. Mendes, A. Loureiro, C. Martins, P. Neto, J. N. Pires, Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds, *Materials & Design*, Vol. 58, pp. 457-464, 2014.
- [6] F. Simões, D. M. Rodrigues, Material flow and thermo-mechanical conditions during friction stir welding of polymers: literature review, experimental results and empirical analysis, *Materials & Design*, Vol. 59, pp. 344-351, 2014.
- [7] E. Azarsa, A. Mostafapour, Experimental investigation on flexural behavior of friction stir welded high density polyethylene sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 1, pp. 149-155, 2014.
- [8] Y. Bozkurt, The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets, *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 440-445, 2012.
- [9] K. Panneerselvam, K. Lenin, Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile, *Materials & Design*, Vol. 53, pp. 302-307, 2014.
- [10] C. B. Smith, J. S. Noruk, G. B. Bendzsak, T. H. North, J. F. Hinrichs, R. J. Heideman, A. O. Smith, Heat and material flow modeling of the friction stir welding process, *NIST SPECIAL PUBLICATION SP*, pp. 475-488, 2000.
- [11] T. H. North, G. J. Bendzsak, C. Smith, Material properties relevant to 3-D FSW modeling, In *Friction Stir Welding, Proceedings of the 2nd International Conference*, 2000.
- [12] T. U. Seidel, A. P. Reynolds, Two-dimensional friction stir welding process model based on fluid mechanics, *Science and technology of welding and joining*, Vol. 8, No. 3, pp. 175-183, 2003.
- [13] W. Zhang, T. DebRoy, T. A. Palmer, J. W. Elmer, Modeling of ferrite formation in a duplex stainless steel weld considering non-uniform starting microstructure, *Acta Materialia*, Vol. 53, No. 16, pp. 4441-4453, 2005.
- [14] R. Nandan, G. G. Roy, T. Debroy, Numerical simulation of three-dimensional heat transfer and plastic flow during friction stir welding, *Metallurgical and materials transactions A*, Vol. 37, No. 4, pp. 1247-1259, 2006.

- [15] R. Nandan, G. G. Roy, T. J. Lienert, T. DebRoy, Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel, *Science and Technology of Welding & Joining*, 2013.
- [16] H. W. Nassar, M. K. Khraisheh, Simulation of material flow and heat evolution in friction stir processing incorporating melting, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 134, No. 4, p. 041006, 2012.
- [17] S. D. Ji, Q. Y. Shi, L. G. Zhang, A. L. Zou, S. S. Gao, L. V. Zan, Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry, *Computational Materials Science*, Vol. 63, pp. 218-226, 2012.
- [۱۸] ح. آقاجانی درازکلا، ح. جمشیدی اول، م. حبیب‌نیا، بررسی رفتار حرارت حاصل از اصطکاک و جریان مواد در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم AA1100، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۱۴، ص ۲۵۱-۲۶۱، اسفند ۱۳۹۳.
- [19] J. E. Mark, *Polymer data handbook*, Oxford university press, 2009.
- [20] J. Zhang, Y. Shen, B. Li, H. Xu, X. Yao, B. Kuang, J. Gao, Numerical simulation and experimental investigation on friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy, *Materials & Design*, Vol. 60, pp. 94-101, 2014.
- [21] S. Inaniwa, Y. Kurabe, Y. Miyashita, H. Hori, Application of friction stir welding for several plastic materials, In *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding: Osaka, Japan, 6-8 November 2013*, p. 137, Woodhead Publishing, 2014.
- [22] J. R. Davis, *Surface engineering for corrosion and wear resistance*, No. 751, ASM international, 2001.

پی‌نوشت

1. CFD Fluent 6.4
2. HDPE
3. FSW
4. ABS
5. PA6
6. coupled Eulerian flow



واحد صنعتی امیرکبیر
(پل تکاب تهران)

مرکز آموزش های تخصصی جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر

www.jdamirkabir.ac.ir

خیابان حافظ، روبروی دانشگاه صنعتی
امیرکبیر، کوچه آرژانتین پلاک ۳۴

۸۸۸۹۲۱۴۴
۸۸۸۹۵۹۶۹
۸۸۸۰۷۰۰۸

با اعطاء گواهینامه معتبر

✓ برگزاری دوره های آموزشی جهت سازمان ها، مراکز، شرکت ها، موسسات و کارخانجات
✓ برگزاری دوره های ضمن خدمت ویژه کارکنان دولت ۶-۸۸۹۲۰۰۰۵

شرکت برای عموم آزاد است

دوره های آموزشی مهندسی مکانیک
...، Gambit & Fluent, Catia
دوره های آموزشی مهندسی نفت و گاز
...، Piping, PDMS
دوره های آموزشی پتروشیمی و مهندسی پلیمر
دوره های آموزشی شیمی - فرآیند حفاظت و خوردگی
...، HYSYS, ASPEN, COMSOL
دوره های آموزشی فیزیک و مهندسی هسته ای
...، MCNP
دوره های آموزشی مهندسی صنایع
...، Msp, P6, Comfor
دوره های آموزشی عمران و معماری
...، 3D MAX, Safe, Etabs
دوره های آموزشی انرژی
دوره های آموزشی مدیریت کیفیت
دوره های آموزشی مدیریت
...، Photoshop, IN Design, ...

دوره های ترمیم زبان های خارجی
انگلیسی، آلمانی فرانسه
مکالمات بازرگانی
فن ترجمه، مکالمات مدرسی زبان
مکالمه، آموزش مدرسی زبان

دوره های آموزشی شبکه و امنیت اطلاعات
...، CCNA, CCNP, JAVA, C#, C++, ...
دوره های آموزشی برنامه نویسی
دوره های آموزشی مالی و حسابداری
دوره های آموزشی اداری و دفتری
Excel پیشرفته
ICDL 1, 2, 3
دوره های آموزشی گرافیک
Photoshop, IN Design, ...