



بررسی تأثیر حرارت تولید شده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی کیفیت اتصال آلومینیوم به فولاد

مجید الیاسی^{1*}، حامد آقاجانی درازکلا²، مرتضی حسین زاده³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
 2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل
 * بابل، صندوق پستی 484، elyasi@nit.ac.ir

چکیده

با وجود تحقیقات انجام شده بر روی اتصالات نامتجانس بین فولاد و آلومینیوم توسط محققین، بررسی اتصالات جدید که از لحاظ علمی و اقتصادی بتواند به صنایع مختلف یاری رساند، ضروری به نظر می‌رسد. هدف این مقاله بررسی تغییرات خواص مکانیکی و جریان مواد در اثر تغییرات حرارت در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در اتصال بین آلومینیوم AA1100 و فولاد A441 AISI است. در این پژوهش، افسس ابزار، عمق نفوذ، سرعت خطی و سرعت دورانی ابزار بعنوان متغیرهای تأثیر گذار بر روی حرارت انتخاب شدند. باتوجه به نتایج بدست آمده، مستحکم‌ترین اتصال در افسس 1/3 در درون آلومینیوم، عمق نفوذ 0/2 و سرعت دورانی 800 و سرعت خطی 63 بدست آمد. در متغیرهای مذکور، بهینه‌ترین مقدار حرارت اصطکاکی و ترکیب بین دو ماده شکل گرفته بود. محل شکست تمامی نمونه های آزمون کشش، در سمت آلومینیوم قرار داشت. عیوب داخلی ایجاد شده در درون اتصالاتی که در سرعت دورانی کم ایجاد شده بود، با افزایش سرعت دورانی بواسطه‌ی تولید حرارت بیشتر از بین رفتند و با افزایش سرعت خطی و بواسطه‌ی فورج بیشتر مواد به درون اتصال عیوب سطحی نیز از بین رفتند. بیشینه استحکام تولید شده در این آزمایشات 90 درصد فلز پایه‌ی آلومینیومی استحکام داشت. سختی محل اتصال با افزایش سرعت دورانی بیشتر شد که علت این مسأله تولید گرمای زیاد در خط اتصال و شکل‌گیری لایه‌های بین فلزی بود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 17 آبان 1393
 پذیرش: 20 بهمن 1393
 ارائه در سایت: 18 اسفند 1393
 کلید واژگان:
 جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
 اتصال نامتجانس
 خواص مکانیکی
 آلومینیوم AA1100
 فولاد A441 AISI

Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA1100 aluminum alloy to A441 AISI steel joint

Majid Elyasi^{1*}, Hamed Aghajani Derazkola², Morteza Hosseinzadeh³

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
 2- Department of Engineering, Islamic Azad University, Sari, Iran
 3- Department of Engineering, Islamic Azad University, Amol, Iran
 * P.O.B. 484, Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 08 November 2014
 Accepted 09 February 2015
 Available Online 09 March 2015

Keywords:
 Friction Stir Welding
 Dissimilar joint
 Mechanical Properties
 AA1100 Aluminum Alloy
 A441 AISI Steel

ABSTRACT

Despite many researches on dissimilar joint between steel and aluminum with friction stir welding process, study on the new scientific and economically priced joints to help various industries seems necessary. The objective of the present work is to investigate the efficacy of heat generation on the mechanical properties and material flow in AA1100 aluminum and A441 AISI joint. In this study, tool offset, plunge depth, welding linear speed and tool rotational speed were chosen as variable parameters that have direct effects on heat generation. Comprehensive analysis using the experimental results showed that the strongest joint was obtained at 1.3 mm tool offset and 0.2 mm plunge depth when the offset tool rotational speed and linear speed were 800rpm and 63mm/min respectively. At the mentioned parameters, the optimal frictional heat generation and material mixing were created. Fracture locations in tensile test at all samples were in aluminum sides. Internal defects that caused lower tool rotational speed were removed by increasing the revolving due to more heat generation and, with growing trend in linear speed due to the greater forging force, the surface defects abated. The maximum strength of welded joints with selected parameters was 90% aluminum base metal. In this research, microhardness of joint interface ascended with increasing rotational speed. This phenomenon is due to formation of thick intermetallic layers in abutting edges of sheets.

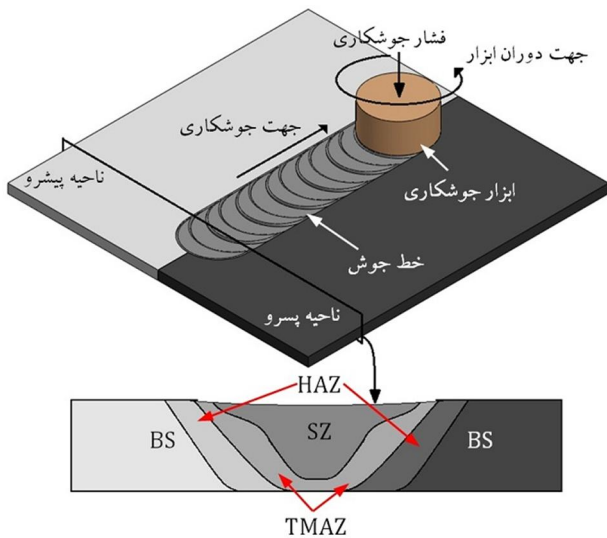
1- مقدمه

توسط یک ابزار سخت مصرف نشدنی انجام می‌شود که معمولاً دارای یک بدنه استوانه‌ای شکل است. در انتهای بدنه ابزار قسمتی وجود دارد که بعنوان پین ابزار شناخته می‌شود و بر اساس قطر و جنس قطعه کارها، ابعاد منطقه اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در مقایسه با دیگر روش‌های جوشکاری، یک فرآیند نو ظهور در اتصالات دائم به‌شمار می‌رود. در این روش، جوشکاری

Please cite this article using:

M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hosseinzadeh, Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA1100 aluminum alloy to A441 AISI steel joint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 379-390, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 شماتیک فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

و نوع ماشین جوشکاری در شکل‌های مختلف طراحی و ساخته می‌شود. ماشین جوشکاری توانایی دوران، حرکت روبه جلو، فشار عمودی و زاویه انحراف جهت اعمال نیروی فورج را به ابزار جوشکاری می‌دهد. در این فرآیند ابتدا ابزار با حرکت دورانی به درون خط اتصال نفوذ می‌کند. بعد از مرحله نفوذ، ابزار دوار، مواد اطراف خود را به دلیل تولید گرمای اصطکاکی به حالت خمیری در می‌آورد. این وضعیت به مرحله شروع پایداری معروف است [1].

ابزار جوشکاری پس از شروع پایداری، یک حرکت رو به جلو را آغاز می‌کند. در این وضعیت، ابزار فرآیند بر اثر اعمال تنش برشی سطحی و حرکت رو به جلو، مواد خمیری شکل اطراف خود را از ناحیه جلو ابزار به درون محل اغتشاش وارد می‌کند [2].

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی وجود اغتشاش و حرارت در منطقه جوش، موجب تغییرات در توزیع ناخالصی‌ها و اندازه دانه در نواحی اطراف و مرکز اتصال می‌شود. بر این اساس منطقه جوشکاری به چهار ناحیه مجزا، یعنی ناحیه اغتشاشی، ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه تقسیم می‌شوند [3]. شماتیکی از این فرآیند در شکل 1 آورده شده است.

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ابتدا جهت اتصال آلیاژهای آلومینیوم اختراع شد اما با توسعه آن توسط محققان، جوشکاری اتصالاتی که با روش‌های ذوبی، پیوند بین آن‌ها سخت و یا غیرممکن بود، با این روش انجام شد [4-7]. در میان این اتصالات، جوشکاری بین آلومینیوم و فولاد یکی از پرکاربردترین اتصالاتی است که توسط این روش قابل انجام است [8]. فولاد AISI 441 A بعلت داشتن خواص مکانیکی مناسب در صنایع کوچک و بزرگ بسیار پرکاربرد است [9]. آلومینیوم AA1100 نیز در ساخت محصولات خانگی، قطعات کشش عمیق و تولید سازه‌های سبک و مقاوم در برابر خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد [10].

هدف این مقاله بررسی اثرات سرعت دورانی ابزار، سرعت خطی جوشکاری، افست ابزار، عمق نفوذ و زاویه انحراف ابزار بر روی خواص مکانیکی اتصال و حرارت تولید شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بین آلومینیوم AA1100 و فولاد AISI 441 A است.

2- معادلات حاکم بر فرآیند

مهمترین مسأله در تحلیل حرارتی این فرآیند، ارتباط بین متغیرهای مکانیکی فرآیند و مقدار گرمای تولید شده می‌باشد. گرمای اصطکاکی این فرآیند، پس از نفوذ به درون قطعه کار توسط شانه، بدنه و کف پین ابزار تأمین می‌شود [11]. بر این اساس بررسی تولید حرارت و ارتباط آن با متغیرهای مکانیکی فرآیند در اتصال نامتجانس بین آلومینیوم و فولاد کمک فراوانی به درک بهتر شکل‌گیری اتصال مناسب و جریان مواد می‌کند. شانه ابزار بیشترین سهم تولید گرما و جریان مواد را بر سطح خارجی قطعه کار برعهده دارد [11]. گرمای تولید شده توسط شانه ابزار در حالت‌های تغییر شکل پلاستیک و چسبندگی با روابط (1) و (2) بیان شده است [12]:

$$Q_{adhesion} = \frac{2}{3} \pi \tau P \omega \left(\left(\frac{D}{2} \right)^3 - \left(\frac{d}{2} \right)^3 \right) (1 + \tan \alpha) \quad (1)$$

$$Q_{deformation} = \frac{2}{3} \pi \tau \omega \left(\left(\frac{D}{2} \right)^3 - \left(\frac{d}{2} \right)^3 \right) (1 + \tan \alpha) \quad (2)$$

در روابط (1) و (2)، P نیروی عمودی ابزار، τ تنش برشی میانگین قطعه کار، ω سرعت دورانی ابزار، D قطر بیرونی شانه‌ی ابزار و d قطر داخلی شانه ابزار است. با ارتباط بین خواص حرارتی هریک از دو فلز پایه در زمان چرخش شانه ابزار بیشینه حرارت تولید شده توسط شانه ابزار را می‌توان بصورت رابطه (3) نشان داد:

$$T_{Shoulder} = \frac{2\sqrt{t}(Q_{Adhesion} + Q_{Deformation})}{\sqrt{\pi \rho C_p K_{Workpiece}}} \quad (3)$$

که در رابطه (3)، t ، مدت زمان چرخش، ρ چگالی ابزار و C_p و K به ترتیب گرمای ویژه و ضریب انتقال حرارت وابسته به دما هستند که بصورت رابطه (4) تعریف می‌شوند [13]:

$$C_p = 929.3 - 0.627T + 1.48 \times 10^{-3}T^2 - 4.33 \times 10^{-8}T^3 \quad (4)$$

$$K = 25.2 - 0.398T + 7.36 \times 10^{-2}T^6 - 2.52 \times 10^{-7}T^{-3} \quad (5)$$

در رابطه (1)، P فشار جوشکاری می‌باشد که با بیشتر شدن عمق نفوذ ابزار بیشتر می‌شود [4]. بدنه پین ابزار سهم بسیار کمتری نسبت به شانه ابزار در تولید حرارت دارد. وظیفه اصلی بدنه پین ابزار اغتشاش و ترکیب دو فلز پایه است. بطور کلی مقدار حرارت تولید شده توسط بدنه پین ابزار بصورت رابطه (6) معرفی می‌شود [14]:

$$T_{Pin} = \left(\frac{K_w}{K_w + K_t \sqrt{\frac{D_w}{D_t}}} \right) \frac{2\mu\pi\tau h r \delta}{\sqrt{3(1 + \mu^2)}} \quad (6)$$

در رابطه (6) r برابر با شعاع پین و h برابر با ارتفاع پین، τ تنش برشی متوسط قطعه کار، μ ضریب اصطکاک، K ضریب انتقال حرارت، D ضریب نفوذ حرارتی و δ حجم ماده جابجا شده توسط پین ابزار می‌باشد. اندیس‌های k و t به ترتیب بیانگر قطعه کار و ابزار هستند. بیشینه سهم تولید حرارت کف پین ابزار در هنگام نفوذ ابزار به محل اتصال است [15]. این ناحیه در زمان پایداری ابزار و حرکت روبه جلو به اغتشاش مواد کمک می‌کند. مقدار حرارت تولید شده توسط کف پین ابزار به هنگام نفوذ از رابطه (7) بدست می‌آید [16]:

$$T_{Pin-Beneath} = \frac{\omega \tau \mu \gamma P}{K_w} \quad (7)$$

در رابطه (7)، γ یک ضریب ثابت است که در هنگام نفوذ ابزار 1 در نظر گرفته می‌شود و در هنگام پیشروی ابزار آن را بصورت (8) تعریف می‌کنند [16]:

$$\gamma = \frac{K_w}{K_w + 0.627 \left(\frac{V_a}{D} \right)^2 K_t} \quad (8)$$

اندازه تنش برشی اعمال شده بر روی ابزار از رابطه (9) محاسبه می‌شود [17]:

$$\tau_T = [(1 - \delta)\tau + \delta\mu_F P] \quad (9)$$

در رابطه (9)، δ به ترتیب نسبت چرخش مواد اطراف پین به چرخش ابزار (ضریب شکست) و μ_F ضریب اصطکاک هستند که بصورت (10) و (11) تعریف می‌شوند [18-20]:

جوشکاری قرار گرفتند.

فرآیند جوشکاری توسط یک ابزار سخت که دارای پین مخروطی شکل و از جنس تنگستن کارباید بود، اجرا شد. قطر شانه ابزار 20 میلیمتر، قطر بزرگ پین ابزار 6 میلیمتر و قطر کوچک ابزار 4 میلیمتر انتخاب گردید. شکل هندسی ابزار مورد استفاده در این فرآیند در شکل 2 نشان داده شده است.

جهت دوران ابزار خلاف جهت گردش عقربه‌های ساعت بود. جهت بررسی اثر زاویه ابزار بر روی خواص مکانیکی و یافتن بهترین زاویه ابزار متناسب با امکانات موجود، محور ابزار متناسب با محاسبات انجام شده 1، 2 و 3 درجه انحراف نسبت به بردار نرمال صفحات داشت. برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد آلیاژ آلومینیوم، کاهش سایش ابزار و دستیابی به افست مناسب جهت انجام جوشکاری، ابزار جوشکاری به اندازه‌های 0.8، 1.3 و 2 میلیمتر در درون آلومینیوم قرار گرفت. تغییرات عمق نفوذ ابزار نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. عمق‌های مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب 0.1، 0.2، 0.4 و 0.6 میلیمتر بودند.

با توجه به امکانات دستگاه فرز انتخاب شده، ابزار فرآیند دارای سرعت-های دورانی 500، 630، 710 و 800 دور بر دقیقه و سرعت خطی 25، 40، 63 و 80 میلیمتر بر دقیقه بود. قابل ذکر است که در سرعت‌های دورانی کمتر از 500 دور در دقیقه، فرآیند جوش قابل انجام نبود و در دوره‌های بالای 800 دور در دقیقه نیز به دلیل ارتعاش بیش از حد ابزار، فرآیند جوشکاری قابل انجام نبود. بنابراین سرعت‌های دورانی ابزار در محدوده 500 تا 800 دور در دقیقه انجام شد.

به‌منظور اندازه‌گیری حرارت حاصل از اصطکاک در طول فرآیند از ترموکوپل استفاده شد. ابتدا یک شیار در لبه دو ورقی که قرار بود جوشکاری شوند تعبیه شد و سپس یک ترموکوپل در آن بعنوان شاخص جایگذاری شد. به دلیل ضریب انتقال کمتر فولاد AISI 441 نسبت به آلومینیوم AA1100، یک ترموکوپل به فاصله 3 سانتی‌متر نسبت به ترموکوپل شاخص در سمت فولاد قرار گرفت و 2 ترموکوپل به فواصل 3 و 6 سانتی‌متر نسبت به ترموکوپل شاخص در سمت آلومینیوم قرار گرفتند که در شکل 3 شماتیکی از آن‌ها نشان داده شده است. جهت ثبت توزیع سطحی حرارت از دوربین حرارت سنج مدل اس‌دی‌اس¹ استفاده شد. برای ثبت داده‌های دما، گرمای ایجاد شده در پیشروی پس از مدت یک دقیقه اندازه‌گیری شد.

به‌منظور بررسی رفتار منطقه جوش در آزمون کشش، نمونه‌های تست کشش عمود بر خط جوش مطابق با استاندارد ASTM/E8-M03 آماده‌سازی شدند. از هر ورق جوشکاری شده سه نمونه تست کشش توسط دستگاه وایرکات بریده شد و نتایج میانگین سه نمونه در این پژوهش گزارش شد که در شکل 4 نشان داده شده است. مطالعات متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترون روبشی انجام شد. جهت بررسی ساختار و لایه‌های بین فلزی در منطقه جوش و در فصل مشترک دو فلز از آنالیزهای نقطه‌ای و طیف‌سنجی تعیین ترکیب شیمیایی استفاده شد.

جدول 1 خواص فیزیکی فلزات پایه [10، 21]

خواص مکانیکی	آلومینیوم AA1100	فولاد AISI 441
استحکام کششی نهایی (مگاپاسکال)	90	580
استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	15	344
ازدیاد طول (%)	35	15
سختی (ویکرز)	38	270
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	2710	7800

1- SDS-hotfind-DX

$$\delta = 0.2 + 0.8 \left(1 - \exp \left(-\delta_0 \frac{\omega R_M}{\omega_0 R_S} \right) \right) \quad (10)$$

$$\mu_F = \mu_0 \left(1 - \exp \left(-\delta \frac{\omega R_M}{\omega_0 R_S} \right) \right) \quad (11)$$

که در رابطه (10) و (11)، R_M میانگین شعاع پین و شانه‌ی ابزار در هر یک از قطعه‌کارها، R_S شعاع شانه ابزار و μ_0 و δ_0 ثابت‌های فرآیند هستند. مقدار گشتاور پیچشی اعمال شده توسط ابزار بر روی قطعه‌کارها نیز از رابطه (12) بدست می‌آید [20]:

$$T = \int_A r(\tau_T dA) = \tau_T \int_0^{R_S} 2\pi r^2 dr = \frac{2\pi R_S^3 \tau_T}{3} \quad (12)$$

برخی از محققان رابطه بیشینه حرارت تولید شده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نسبت به دمای ذوب فلز پایه را بصورت (13) معرفی کردند [2]:

$$\frac{T}{T_M} = K \left(\frac{\omega^2}{V \times 10^4} \right)^\alpha \quad (13)$$

توان α در رابطه (13) بین 0/04 تا 0/06 و همچنین ثابت K ، بین 0/65 تا 0/75 قرار دارد. ω و V به ترتیب سرعت دورانی ابزار و سرعت خطی جوشکاری هستند. این معادله بیان‌گر حداکثر گرمای تولید شده بر پایه دمای ذوب قطعه‌کارها است که معمولاً در بازه بین 0/6 تا 0/9 قرار دارد.

رابطه (14) حرارت حاصل از اصطکاک ابزار فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد که از روابط بالا استخراج شده است. در این پژوهش، این رابطه در نرم‌افزار متلب کد نویسی گردید و سپس تولید و توزیع حرارت در اتصال نامتجانس بین فلزات آلومینیوم AA1100 به فولاد A441 AISI بررسی گردید. با بررسی حرارت تولید شده اتصال نامتجانس، میانگین خواص فیزیکی و حرارتی دو فلز پایه در منطقه اغتشاش در نظر گرفته شد.

$$T_{Total} = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\omega^2 \tau^2 \pi t}{\rho c k_w}} \left[\left(\frac{D+d}{8} \right)^3 (1+F)(1+\tan\alpha) \right] + \frac{K_w}{K_w + \sqrt{\frac{D_w}{D_t}}} \times \frac{2\mu\pi\tau hrV}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} + \frac{\omega r \mu \gamma F}{K_w} \quad (14)$$

رابطه (14) بعنوان یک منبع حرارت در نظر گرفته شد که در آن خواص وابسته به ماده، میانگین خواص فیزیکی و حرارتی آلومینیوم و فولاد بود. پس از آن، با کدنویسی، دو صفحه مشبک با ابعاد 125×200 شبکه تولید شد که ستون وسط بین آن‌ها مشترک بود. روش حل مسأله بر اساس روش حل تفاضل محدود انجام شد که در آن شرایط مرزی لبه‌های خارجی ورق‌ها آدیاباتیک فرض شد. منبع حرارت در زمان 0، در نقطه (0،0) قرار داشت که پس از رسیدن به دمای حداکثر شروع به حرکت می‌نمود. جهت بررسی توزیع حرارت در درون قطعه-کارها دو صفحه عرضی با ضخامت مشخص در نظر گرفته شد که یکی خواص آلومینیوم و دیگری خواص فلز پایه فولادی را داشت. به منظور تسریع در زمان حل، ابعاد دانه بندی‌های (شبکه‌های) دوعدی نامتقارن در نظر گرفته شد. ابعاد این شبکه‌ها در نزدیکی مرز اتصال کوچک بود و با فاصله گرفتن از مرز درونی اتصال، ابعاد آن‌ها با نسبت رشد 2، بزرگتر شد.

3- مراحل آزمایشگاهی

در این تحقیق ورق‌های 3 میلیمتری آلومینیوم AA1100 و فولاد AISI 441 توسط یک ماشین فرز معمولی به یکدیگر جوش داده شدند. خواص مکانیکی فلزات و حرارتی مورد استفاده در این تحقیق در جداول 1 و 2 نشان داده شده است. قبل از قرارگیری ورق‌ها در درون قید و بند جوشکاری، سطح تماس دو ورق با سنباده صاف و اکسید زدایی شد. در طراحی فرآیند آزمایش، آلومینیوم بعنوان ناحیه‌ی پسر و فولاد به عنوان ناحیه پیشرو در قید و بند

ریزساختارهای محل اتصال نیست، تنها به ذکر موارد فوق بسنده شده است و در قسمت‌های زیر به نتایج بدست آمده از تغییرات متغیرهای مکانیکی و ارتباط آن‌ها با خواص مکانیکی اتصال اشاره شده است.

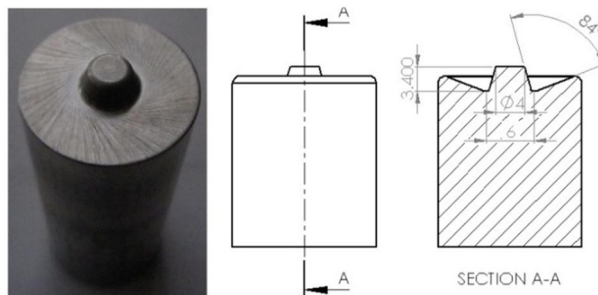
4-1- میزان حرارت تولید شده در حین فرآیند

شکل 5 مقدار گرمای اصطکاکی تولید شده توسط کف بین ابزار در لحظه تماس اولیه با سطح قطعه کار در فشار ثابت در سرعت‌های دورانی 500، 630، 710 و 800 دور در دقیقه نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، حرارت تولید شده در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه، 270 درجه سانتی‌گراد است و این مقدار به 285 درجه سانتی‌گراد در سرعت دورانی 630 دور در دقیقه، می‌رسد. با افزایش سرعت چرخشی ابزار، حرارت تولید شده در هنگام نفوذ بین ابزار نیز بیشتر شده و به ترتیب به 292 و 300 درجه سانتی‌گراد در سرعت‌های 710 و 800 دور در دقیقه می‌رسد. بیشترین سهم تولید حرارت در کف بین ابزار هنگام ورود به درون خط جوش و نفوذ در قطعه کار است. در واقع پس از نفوذ ابزار و رسیدن به حالت پایدار، کف بین ابزار بیشتر وظیفه اغتشاش مواد خمیری را دارد. در این شرایط تولید گرما توسط کف ابزار کم است و بر همین اساس تأثیر چشم‌گیری بر روی گرمای کل ندارد [22،23]. مرحله پایداری ابزار هنگام اتمام مرحله نفوذ و جانمایی کامل ابزار در خط اتصال، تعریف می‌شود. در این مرحله شانه ابزار، بدنه و کف بین همزمان و با هم تولید حرارت را آغاز می‌کنند. کف بین ابزار در مرحله پایداری بیشتر به اغتشاش مواد خمیری شکلی که در ناحیه پایینی اتصال قرار دارند، می‌پردازد. در این شرایط تولید گرما توسط کف بین ابزار کم است و بر همین اساس تأثیر چشم‌گیری بر روی گرمای کل ندارد.

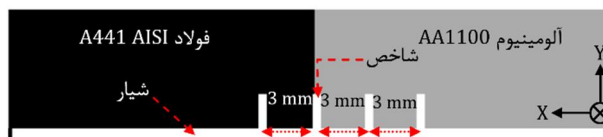
شکل 6 اندازه حرارت اصطکاکی تولید شده توسط شانه ابزار و سطح اتصال را در سرعت‌های دورانی 500، 630، 710 و 800 دور در دقیقه نشان می‌دهد. با ملاحظه این شکل مشاهده می‌شود، بیشینه دمای تولید شده توسط شانه ابزار در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه، 470 درجه سانتی‌گراد است و این مقدار در سرعت دورانی 630 دور در دقیقه به 483 درجه سانتی‌گراد می‌رسد. با افزایش سرعت دورانی از 710 تا 800 دور در دقیقه، حرارت تولید شده توسط شانه ابزار نیز از 499 به 508 درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در واقع می‌توان به این نتیجه رسید که در فشار جوشکاری ثابت، با افزایش سرعت دورانی ابزار، گرمای حاصل از اصطکاک نیز افزایش می‌یابد. مساله قابل ذکر در این قسمت این است که سهم شانه ابزار در تولید حرارت نسبت به دیگر نقاط ابزار بیشتر است.

شکل 7 مراحل تولید و توزیع حرارت را از زمان نفوذ ابزار تا هنگام پایداری ابزار در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. این شکل نحوه توزیع و تولید حرارت را در مقطع عرضی اتصال نشان می‌دهد. ابعاد حرارت تولید شده در ناحیه بالایی منطقه اتصال بیشتر از قسمت‌های پایینی آن است. علت این مساله در سهم بیشتر تولید حرارت توسط شانه ابزار است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود حرارت تولید شده در سمت پسرو بیشتر از سمت پیشرو است و بر همین اساس نفوذ حرارت نیز در قسمت پیشرو بیشتر از ناحیه پسرو است.

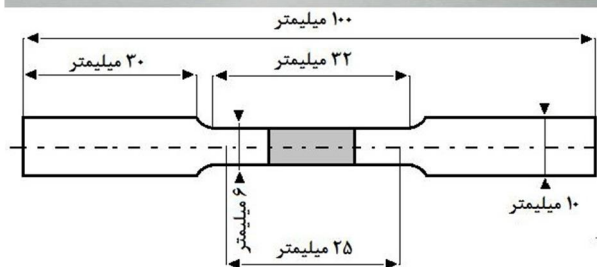
شکل 8 نتایج حاصل از توزیع حرارت را در سطح دو فلز نشان می‌دهد که در سرعت خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه حاصل شد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود به علت خواص حرارتی دو فلز، رفتار گسترش حرارت بر روی سطح هریک از فلزات با یکدیگر متفاوت است. پیشروی منبع حرارت بر روی هریک از سطوح به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.



شکل 2 ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی



شکل 3 شماتیکی از محل قرارگیری ترموکوپل‌ها جهت اندازه‌گیری دما



شکل 4 مشخصات نمونه‌های تست کشش

جدول 2 خواص حرارتی فلزات پایه [10، 21]

AA1100	AA1100	A441 AISI	A441 AISI	
K	Cp (J/kg.K)	K	Cp (J/kg.K)	دما
237	900	51/9	12/00	25
240	938	51/1	12/18	100
236	984	49/0	12/66	200
231	1030	54/4	13/00	300
218	1074	42/7	13/47	400
218	1074	42/0	13/47	450
200	1210	35/6	13/41	600
--	--	26/2	12/64	800

4- بحث و نتایج

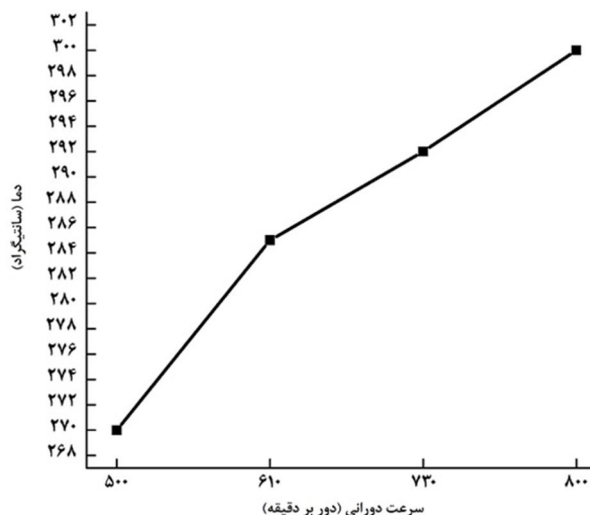
پس از بررسی‌های انجام شده بر روی اتصال نامتجانس آلومینیوم AA1100 به فولاد A441 AISI نتایج بدست آمده و بحث بر روی آن‌ها در این قسمت مقاله آورده شده است. در بررسی انجام شده بر روی میکروساختار محل اتصال مشخص شد که در سمت فولاد تنها ناحیه متأثر از حرارت وجود دارد و در سمت فلز پایه آلومینیومی نواحی متأثر از حرارت و متأثر از حرارت و کار مکانیکی شکل گرفته‌اند. در ضمن آنکه ناحیه‌ی اغتشاش در هر دو فلز پایه بطور مشترک شکل گرفته است. بعلت اینک هدف این مقاله بررسی

نشان از انتقال سریع حرارت در سطح قطعه کار آلومینیومی دارد. با افزایش سرعت دورانی، گستردگی حرارت در طول و عرض هر دو قطعه کار افزایش می‌یابد. شکل 8-ب توزیع حرارت سطحی را در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه نشان می‌دهد. بعلاوه حرارت تولید شده بیشتر در این سرعت دورانی نفوذ حرارت نیز در هر دو قطعه کار بیشتر می‌شود. در میان سرعت‌های دورانی انتخاب شده ابزار، تولید حرارت سرعت دورانی 800 دور در دقیقه به حداکثر مقدار خود رسید.

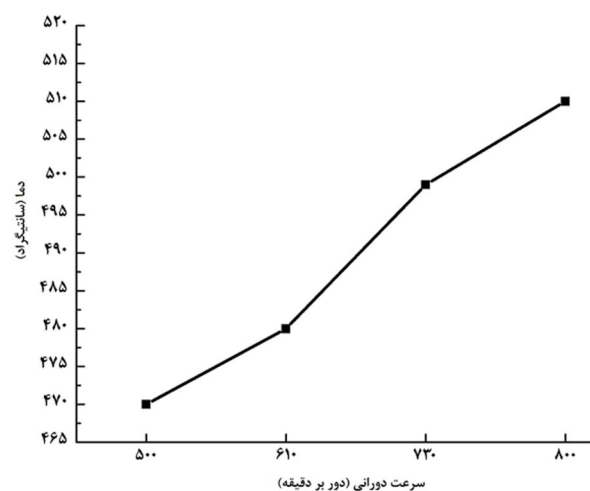
بر اساس نتایج خروجی نرم افزار متلب گرمای تولید شده در سرعت‌های دورانی 500، 630، 710 و 800 دور در دقیقه به ترتیب برابر با 640، 670 و 710 درجه سانتی‌گراد بودند. البته این مقدار گرما در سرعت خطی 25 میلی‌متر در دقیقه حاصل شد که با توجه به سرعت‌های خطی موجود و با توجه به متغیرهای موجود به نوعی بیشترین حرارت تولید شده در سرعت‌های دورانی موجود به‌شمار می‌روند.

از طرفی دیگر، نتایج ثبت شده از تولید حرارت نشان داد که بیشینه دمای تولید شده در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه، 630 درجه سانتی‌گراد بود که در سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه حاصل شد. مقدار حرارت اصطکاکی که در سرعت دورانی 610 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر در دقیقه ایجاد شده بود، 670 درجه سانتی‌گراد ثبت شد و این درحالی است که بیشینه دمای تولید شده در سرعت دورانی 710 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر در دقیقه، 695 درجه سانتی‌گراد بود.

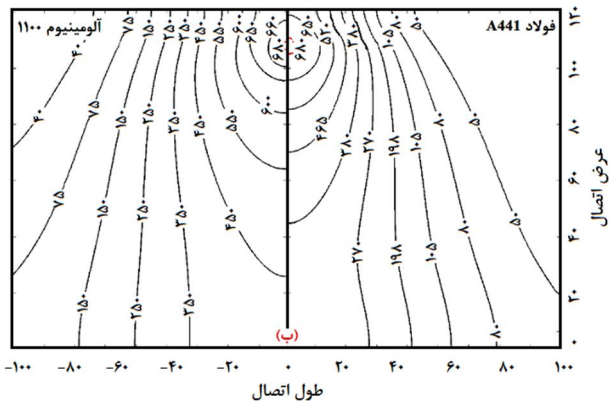
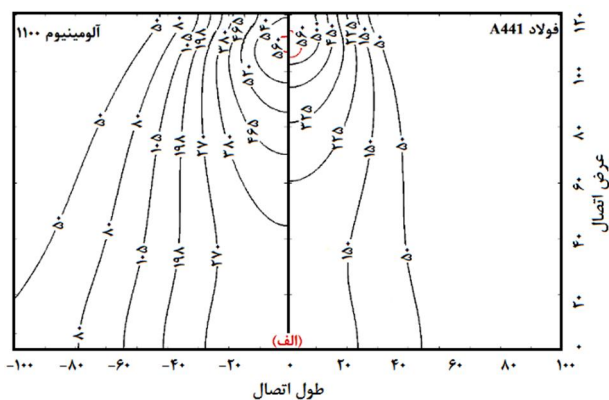
با بررسی نتایج دیده شد که با افزایش سرعت دورانی، روند رو به رشد تولید حرارت نیز ادامه یافت بطوریکه حرارت تولید شده در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه 750 درجه سانتی‌گراد ثبت گردید.



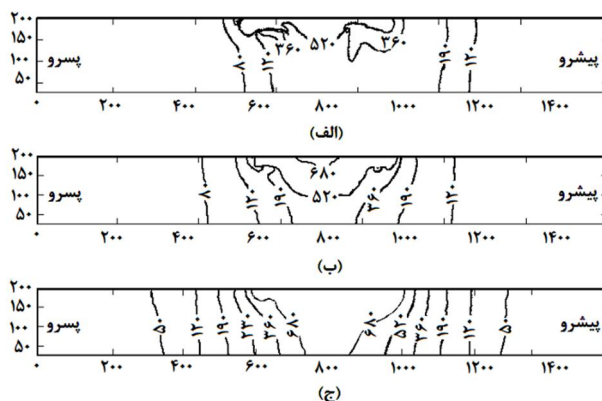
شکل 5 حرارت تولید شده هنگام نفوذ ابزار در سرعت‌های دورانی مختلف



شکل 6 حرارت تولید شده توسط شانه ابزار در سرعت‌های دورانی مختلف



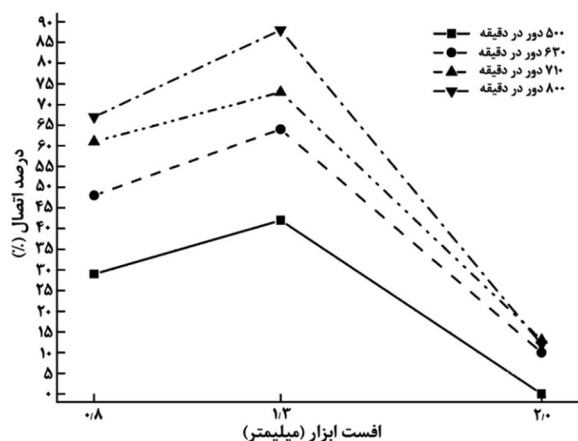
شکل 8 توزیع سطحی حرارت در سرعت دورانی (الف) 500 و (ب) 800 دور در دقیقه



شکل 7 تولید و توزیع حرارت در مقطع عرضی اتصال در (الف) 5، (ب) 10 و (ج) 20 ثانیه پس از نفوذ ابزار

همانطور که در شکل 8-الف مشاهده می‌شود، در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه، حرارت در سمت فلز پایه آلومینیومی در فضای گسترده‌تری نسبت به سطح فولادی پخش شده است. منبع حرارت در سمت فلز پایه فولادی کوچکتر از سمت آلومینیوم است. علت این پدیده، ضریب نفوذ و انتقال حرارت کمتر فولاد نسبت به آلومینیوم است.

از طرف دیگر به دلیل بالا بودن ضریب نفوذ حرارت آلومینیوم حلقه‌های گرما با شعاع بزرگتری نسبت به سمت فولادی در سطح گسترش یافته‌اند که



شکل 9 اثر افست ابزار بر روی درصد اتصال در سرعت خطی 40 میلی‌متر در دقیقه

در افست 1/3 میلی‌متر، وسعت ناحیه تغییر شکل یافته در سمت آلومینیوم بیشتر می‌شود و این پدیده تولید گرمای بیشتر را به دنبال دارد و سبب سیلان قابل قبول در خط اتصال بین این دو فلز می‌شود. این مساله به دلیل کمتر شدن δ و گشتاور پیچشی وارد بر ابزار در رابطه (9)، اتفاق می‌افتد که سبب می‌شود تا ابزار راحت‌تر اغتشاش ایجاد کند. گرمای حاصل از این پدیده به سمت فولاد نفوذ کرده و باعث می‌شود تا تغییر شکل پلاستیک قطعه کار فولادی راحت‌تر انجام شود. همزمان با این اثر، تولید حرارت بیشتر ابزار به واسطه افزایش سرعت دورانی، احتمال ترکیب آلومینیوم با فولاد در مرز اتصال را بالاتر می‌برد. مجموع این دو عامل سبب بیشتر شدن درصد اتصالاتی شده که در افست 1/3 جوشکاری شده‌اند.

در افست 2 میلی‌متر، محور ابزار از فصل مشترک دو فلز پایه دور می‌شود و حجم کمتری از ابزار درون فلز پایه فولادی قرار می‌گیرد. قرارگیری ناحیه کمتر ابزار در ورق فولادی سبب می‌شود تا فولاد کمتر تحت تغییر شکل و اغتشاش قرار گیرد و ترکیب داخلی بین قطعه‌کارها توسط پین ابزار به خوبی انجام نشود. وضعیت ابزار در این حالت باعث جدایش دو ورق بعد از اتمام عملیات جوشکاری خواهد شد. ضعف ترکیب بین دو فلز در افست 2 میلی‌متر با افزایش حرارت اندکی بهبود می‌یابد ولی افست نامناسب سبب خواهد شد تا سرعت دورانی و گرمای بیشتر نیز اثری قابل توجه بر درصد اتصال نداشته باشد. اتصالات جوشکاری شده با افست‌های 0/8، 1/3 و 2 میلی‌متر در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 63 میلی‌متر در دقیقه، بطور نمونه در شکل 10 نشان داده شده‌اند.

3-4- اثر عمق نفوذ ابزار

نفوذ ابزار به درون قطعه کار اولین مرحله‌ی شروع فرآیند جوشکاری محسوب می‌شود. مقدار نفوذ ابزار تعیین کننده فاصله کف ابزار با انتهای قطعه‌کارها و مقدار فرورفتگی شانه ابزار در سطح اتصال است. مقدار نفوذ ابزار بر روی کیفیت سطحی اتصال، جریان مذاب در زیر خط جوش و نیز محل نفوذ و خروج ابزار تأثیر مستقیم دارد. با افزایش مقدار نفوذ ابزار، فشار جوشکاری نیز بیشتر می‌شود [24]. همانطور که در رابطه (14) ذکر شد، گرمای اصطکاکی در این فرآیند به فشار جوشکاری وابستگی خطی دارد. طبق رابطه (14)، با افزایش فشار جوشکاری گرمای حاصل از اصطکاک نیز زیاد می‌شود. افزایش فشار جوشکاری سبب بیشتر شدن تعامل قسمت‌های مختلف ابزار با قطعه کار خواهد شد که نتیجه‌ی آن تولید بیشتر گرمای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک بیشتر مواد اطراف ابزار است [15]. فشار جوشکاری وابسته به عمق نفوذ ابزار است و با افزایش عمق نفوذ فشار جوشکاری نیز بیشتر می‌شود [25].

با یک بررسی اجمالی می‌توان به این نتیجه رسید که نتایج حاصل از حل عددی مدل اصطکاکی، در تمامی شرایط جوشکاری کمتر از مقدار حرارت واقعی است. مهم‌ترین علت این مساله در صرف نظر کردن از تغییر شکل پلاستیک از محاسبات است که اختلاف بین مقادیر واقعی و نتایج حل عددی را به دنبال دارد.

2-4- اثر افست ابزار

برای یافتن بهترین افست ابزار در اتصال آلومینیوم AA1100 به فولاد AISI 441، جوشکاری با افست‌های 0/8، 1/3 و 2 میلی‌متر در درون فلز آلومینیوم AA1100 انجام گرفت. علت این انتخاب در این بود که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، قرارگیری ابزار در فلز نرم‌تر سبب جریان بهتر مواد و ایجاد اتصال مناسب‌تر می‌شود [2].

بر اساس رابطه (9)، مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر روی نیروهای اعمال شده بر روی ابزار، δ و μF و تنش برشی هر کدام از قطعه کارها هستند. با شیفت دادن ابزار به سمت فلز پایه آلومینیومی، متغیر $\frac{R\mu}{R_s}$ افزایش می‌یابد و با بیشتر شدن این متغیر، مقدار δ و μF افزایش می‌یابد. در این وضعیت مقدار τ ، تعیین کننده مقدار تنش برشی وارد بر ابزار (τ_i) و مقدار گشتاور (T) مورد نیاز برای تغییر شکل توسط ابزار جوشکاری است. در اتصالات نامتجانس، قرارگیری ابزار در فلز نرم‌تر کاهش T و τ_i را به دنبال دارد و سبب می‌شود تا توان ابزار جهت تولید اغتشاش و گرمای بهینه بالاتر رود.

از طرف دیگر با فرض اینکه ابزار جوشکاری صلب باشد و تحت هیچ شرایطی تغییر شکل پیدا نکند، با وارد کردن ابزار در فلز سخت‌تر گرمای تولید شده بالاتر از حالت قبل خواهد بود. بعلاوه اختلاف خواص حرارتی زیاد در اتصالات آلومینیوم نسبت به فولاد این مقدار گرما ممکن است بیش از حد باشد و سبب ایجاد ذوب بیش از اندازه فلز پایه آلومینیومی در منطقه اتصال شود.

بر همین اساس برخی از محققان اعتقاد دارند که برای جلوگیری از خوردگی ابزار و گرم شدن بیش از حد فلز نرم‌تر در اتصالات آلومینیوم به فولاد، ابزار باید در فلز نرم‌تر قرار گیرد [2]. تأثیر افست ابزار بر روی درصد اتصال بر اساس فلز پایه آلومینیومی در شکل 9 آورده شده است. درصد اتصال نسبتی قرار دادی است که با رابطه (15) تعریف می‌شود:

$$\text{درصد اتصال} = \frac{\text{استحکام کششی نهایی جوش}}{\text{استحکام کششی نهایی فلز پایه}} \times 100 \quad (15)$$

همانطور که در شکل 9 مشخص است همگام با افزایش سرعت دورانی درصد اتصال نیز یک روند افزایشی را طی می‌کند ولی در تحلیل تمامی جوش‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که مستحکم‌ترین اتصالات در افست 1/3 میلی‌متر تولید شده است. در افست ابزار 0/8 میلی‌متر، مقدار بیشتری از ابزار در درون قطعه کار فولادی قرار گرفته است. در این وضعیت، مقاومت فولاد در مقابل تغییر شکل و ناتوانی ابزار در تولید گرمای مناسب سبب می‌شود تا بیشتر نیروهای اعمال شده توسط ابزار جهت غلبه بر تنش برشی فولاد صرف شود.

در این شرایط نفوذ آلومینیوم به درون فولاد به شکل مناسبی انجام نمی‌گیرد. اغتشاش ناهماهنگ در اطراف و در طول خط اتصال و شکل‌گیری تونل‌های سطحی، اثرات قرارگیری نامناسب ابزار است که در افست 0/8 رخ می‌دهد. ضعف توان ابزار در این افست ابزار با افزایش سرعت دورانی اندکی جبران می‌شود. علت این پدیده نیز در تولید حرارت اصطکاکی بیشتر ابزار است که در سرعت‌های دورانی بالاتر رخ می‌دهد. افزایش حرارت سبب سیلان بیشتر و ترکیب بیشتر فولاد و آلومینیوم می‌شود.

به منظور بررسی عمق نفوذ ابزار دیگر متغیرهای مکانیکی فرآیند ثابت در نظر گرفته شد. در این قسمت، سرعت دورانی ابزار 800 دور در دقیقه، سرعت خطی 63 میلی‌متر در دقیقه، زاویه ابزار 2 درجه و افست ابزار 1/3 میلی‌متر انتخاب شد. در نهایت تغییرات درصد اتصال بر پایه ورق آلومینیومی توسط عمق‌های نفوذ 0/1، 0/2، 0/4 و 0/6 میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. شکل 11 اثر اندازه نفوذ ابزار را بر روری جریان مواد در محل خروج ابزار و عرض اتصال نشان می‌دهد.

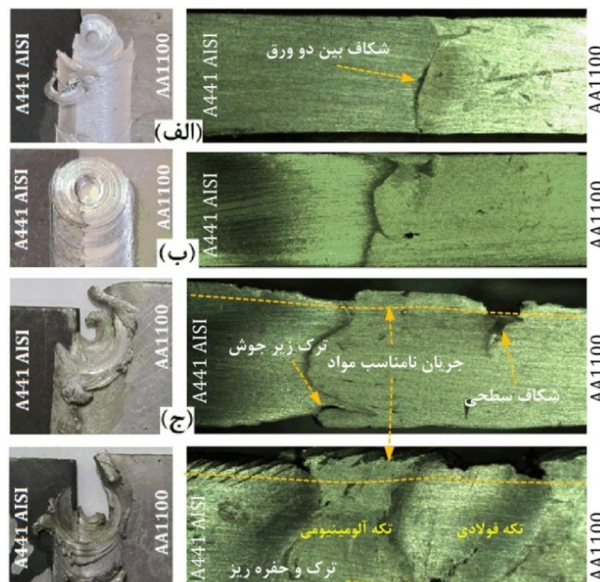
همانطور که در شکل 11- الف دیده می‌شود، در عمق نفوذ 0/1 میلی‌متر فرورفتگی شانه ابزار به درون خط اتصال مناسب نبود. بر همین اساس جریان سطحی مواد بطور کامل ایجاد نشد و ترکیب سطحی دو فلز پایه تناسب هماهنگی نداشت. با واکاوی این رفتار در درون اتصال می‌توان دید که نفوذ ناکافی ابزار سبب شده تا پین ابزار به اندازه مناسب در درون دو قطعه‌کار قرار نگیرد. این وضعیت باعث شد تا تنها ناحیه‌های بالایی دو ورق بهم جوش شوند. کشیدگی جزئی فولاد به سمت فلز پایه آلومینیومی در قسمت‌های بالایی اتصال نشان از اغتشاش بیشتر مواد توسط شانه ابزار نسبت به پین ابزار است. در عمق نفوذ 0/1 میلی‌متر، اغتشاش داخلی مواد در قسمت‌های زیرین اتصال به خوبی انجام نگرفته و همین مساله سبب شد تا بین دو ورق، حفره‌های طولی و نازک شکل گیرد.

همانطور که در شکل 11- ب قابل رویت است، در عمق 0/2 میلی‌متر جریان سطحی مواد با تناسب مناسبی ایجاد شده است. شکل‌گیری کامل حلقه‌های اطراف پین ابزار در محل خروج، بیانگر مناسب بودن فشار جوشکاری در عمق نفوذ 0/2 میلی‌متر است. در نمای عرضی محل اتصال نیز می‌توان مشاهده کرد که مقدار جریان و کشیدگی مواد در درون همدیگر بیشتر شده است و نفوذ دو فلز پایه نسبت به حالت قبل شکل یکنواخت‌تری به خود گرفته است. این شکل از ترکیب مواد حاکی از قرارگیری مناسب پین ابزار در درون محل اتصال است که سبب رفع حفره درونی محل اغتشاش نیز شده است. با افزایش مقدار عمق نفوذ تا 0/4 میلی‌متر فشار جوشکاری بیشتر شد و به دلیل تولید گرمای بیشتر نسبت به حالت قبل، چسبندگی مواد به شانه‌ی ابزار و لهیدگی سطح اتصال به وجود می‌آید که در شکل 11- ج مشاهده می‌شود. در این عمق نفوذ پنجره اتصال شکل نامنظم به خود می‌گیرد. در اثر فشار زیاد جوشکاری، بیرون زدگی مواد، پارگی و جدایش ناشی از چسبندگی به شانه ابزار در سطح بالای اتصال دیده می‌شود. در این اتصال قسمت‌های زیرین اتصال، بعلافت فشار زیاد ابزار به سمت بیرون رانده شدند. زیاد بودن مقدار نفوذ ابزار در عمق 0/6 سبب تولید گرما و سیلان بیش از اندازه، چسبیدن مواد به سطح شانه ابزار و شکل‌گیری پلیسه در اطراف ناحیه سطح اتصال می‌گردد که در شکل 11- د نشان داده شده است. تکه‌های بزرگ آلومینیومی و فولادی موجود در نمای عرضی اتصال، نشان دهنده چسبندگی و فشار بیش از اندازه‌ی مواد است که سبب جابجایی آن‌ها شده است. این فشار زیاد سبب شد تا منطقه‌ی اتصال به خوبی شکل نگیرد و پارگی و حفره‌های ریز در محل اتصال شکل بگیرد. این موارد نشان دهنده ایجاد فشار جوشکاری بیش از حد در محل اتصال است که توسط عمق نفوذ نامناسب ایجاد می‌شود.

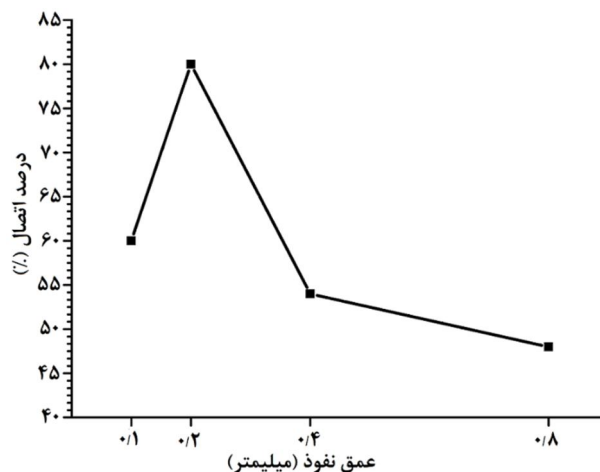
درصد اتصال نمونه‌های جوشکاری شده در عمق‌های نفوذ مختلف، در شکل 12 نشان داده شده است. می‌توان دید که درصد اتصال جوشی که با عمق نفوذ 0/2 شکل گرفته است، با بقیه اختلاف چشمگیری دارد. استحکام اتصالی که با عمق نفوذ 0/1 جوش داده شد به 60 درصد فلز پایه آلومینیوم رسید.



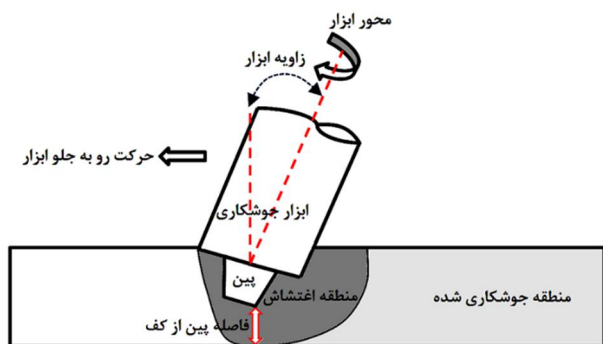
شکل 10 نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه و افست (الف) 0/8، (ب) 1/3 و (ج) 2 میلی‌متر در درون آلومینیوم



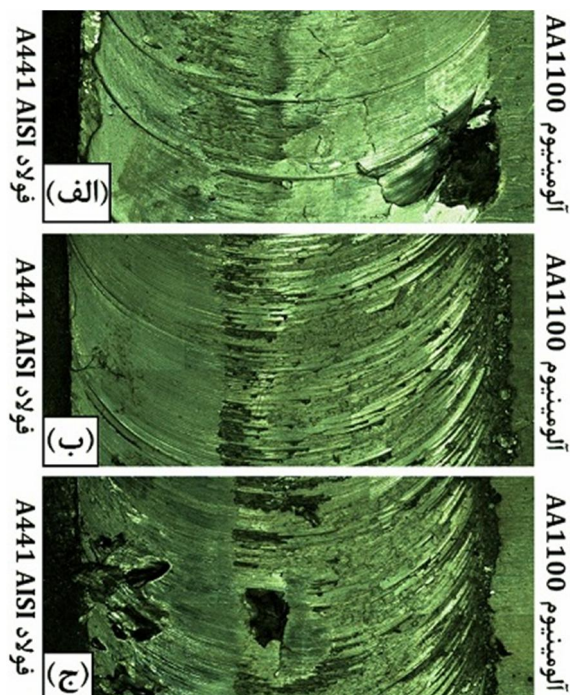
شکل 11 نمای عرضی و بالا از نمونه‌های جوشکاری شده در عمق نفوذ (الف) 0/1، (ب) 0/2، (ج) 0/4 و (د) 0/6 میلی‌متر



شکل 12 اثر عمق نفوذ ابزار بر روی درصد اتصال



شکل 13 تصویر شماتیکی از زاویه ابزار



شکل 14 جریان سطحی مواد در جوشکاری با زاویه ابزار (الف) 1، (ب) 2 و (ج) 3 درجه

در این زاویه ابزار، فشار جوشکاری به اندازه کافی مواد جلوی ابزار را به عقب نکشاند و سبب شده تا اندکی اعوجاج و عدم شکل‌گیری حلقه‌های منظم در سطح اتصال اتفاق بی‌افتد. در جوشکاری دو ورق آلومینیوم و فولاد با زاویه 2 درجه جریان سطحی نسبت به حالت قبل بهتر شده و فاصله نوارهای تشکیل شده کمتر شده است که در شکل 14- ب مشاهده می‌شود. نیروی فورج مناسب‌تر نسبت به حالت قبل صافی سطح بهتری را ایجاد کرده است و اعوجاج‌های سطحی در این اتصال تا حدود زیادی از بین رفته‌اند. این نوع رفتار در جوشکاری با زاویه 3 درجه تا مقدار زیادی باقی مانده است ولی زاویه زیاد نسبت به حالت قبل، سبب فاصله گرفتن قسمت پشتی ابزار از سطح قطعه کار شده است. در این حالت ابزار فشار زیادی به ماده خمیری شکل جلوی ابزار در زمان چرخش وارد می‌کند که نتیجه آن توزیع ناهمگن مواد در سطح اتصال است. نتیجه نیروی فورج زیاد، فرورفتگی، چروک شدگی کناره و حفره‌های سطحی است که در شکل 14- ج مشاهده می‌شود. این نوع جریان مواد بر روی درصد اتصال نیز تأثیر مستقیم دارد.

شکل 15، ارتباط بین زاویه ابزار و درصد اتصال را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است بهترین اتصال در زاویه 2 درجه شکل گرفته است. با بیشتر شدن زاویه ابزار و اعمال نیروی فورج بیشتر از حد نیاز، استحکام اتصال نیز کمتر شده است. علت این مساله ناهمگونی اغتشاش مواد در خط اتصال است.

ایجاد عیوب سطحی و داخلی که در عمق نفوذ 0/1 میلیمتر شکل گرفته بود، موجب کاهش استحکام جوش و در نتیجه درصد اتصال شد. محل شکست این اتصال در آزمون کشش به دلیل ترکیب نامناسب دو آلیاژ، صفحه‌ی مشترک بین دو ورق بود. استحکام اتصالی که با عمق نفوذ 0/2 جوش داده شد به 80 درصد فلز پایه آلومینیومی رسید. به دلیل ترکیب مناسب بین دو فلز پایه، محل جدایش این اتصال در آزمون کشش در سمت آلومینیومی محل اغتشاش قرار داشت. اتصالاتی که با عمق نفوذ 0/4 و 0/6 میلیمتر به هم جوش داده شدند به ترتیب 53 و 48 درصد استحکام فلز پایه آلومینیومی مقاومت داشتند. به دلیل خروج مواد از محل اتصال و فشار عمودی نامناسب در اتصالی که با عمق نفوذ 0/4 میلیمتر جوش داده شد پیوند بین دو فلز پایه به خوبی انجام نگرفت. بر همین اساس در آزمون کشش بین آلومینیوم AA1100 و فولاد A441 AISI این اتصال از قسمت صفحه مشترک بین دو ورق شکسته شد. فصل مشترک تکه‌ی فولادی و فلز پایه‌ی آلومینیومی محل شکست نمونه‌ای بود که با عمق نفوذ 0/6 میلیمتر جوشکاری شده بود. محل شکست این نمونه بیانگر ترکیب ناهمگون دو فلز در محل اغتشاش است که سبب شده تا درصد اتصال آن کم شود.

4-4- اثر زاویه ابزار

اثر زاویه ابزار یکی از متغیرهای این فرآیند به‌شمار می‌رود که اثری مشابه با دیگر متغیرهای فرآیند بر روی خواص مکانیکی اتصال دارد. انتخاب زاویه ابزار مناسب تعیین کننده تولید یک اتصال بی‌عیب خواهد بود. وظیفه اصلی این متغیر، جریان دادن مواد خمیری اطراف شانه ابزار از سمت جلو ابزار به درون محل اغتشاش جهت پر کردن حفره‌ها و گودال‌های درون اتصال است. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان داد که با افزایش زاویه ابزار، نیروی فورج رو به پایین ابزار و حرارت جوشکاری افزایش می‌یابد [26]. یکی از فاکتورهای محدود کننده در زاویه ابزار، فاصله کف پین ابزار با انتهای ورق است که به صورت شماتیک در شکل 13 نشان داده شده است. زاویه نامناسب ابزار سبب برخورد کف ابزار با انتهای کف ورق می‌شود و اثرات نامطلوبی بر روی دستگاه جوشکاری، قید و بند جوشکاری و جریان مواد خمیری در قسمت پایینی اتصال دارد.

با در نظر گرفتن ضخامت ورق‌ها، دستگاه جوشکاری و ابعاد ابزار مورد استفاده در این پژوهش، تعیین فاصله مجاز کف ابزار از قسمت پایینی ورق‌ها ضروری خواهد بود. با توجه به توضیحات داده شده می‌توان گفت که زاویه صفر درجه نیروی فورج لازم را فراهم نمی‌کند و از طرف دیگر بیشینه زاویه قابل قبول 3 درجه خواهد بود. علت این انتخاب در فاصله پین ابزار در کف قطعه‌کارها است.

مقدار این فاصله در زاویه‌های 1، 2 و 3 درجه به ترتیب 0/05، 0/11 و 0/2 میلیمتر است و در زاویه 4 درجه، پین ابزار به سطح قید و بند جوشکاری برخورد می‌کند. بر همین اساس اثر زاویه ابزار در اتصال بین آلومینیوم AA1100 و فولاد A441 AISI، در زاویه‌های 1، 2 و 3 درجه مورد بررسی قرار گرفت. در این وضعیت سرعت دورانی ابزار 800 دور در دقیقه، سرعت خطی ابزار 80 دور در دقیقه، عمق نفوذ ابزار 0/2 میلی‌متر و افست ابزار 1/3 میلی‌متر در درون آلومینیوم بود.

شکل 14 جریان سطحی مواد را در خط جوش و زاویه‌های مختلف ابزار نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 14- الف مشاهده می‌شود سطح اتصالی که با زاویه 1 درجه جوشکاری شده است دارای نوارهای پیزی شکل با فاصله زیاد و امواج نامنظم است.

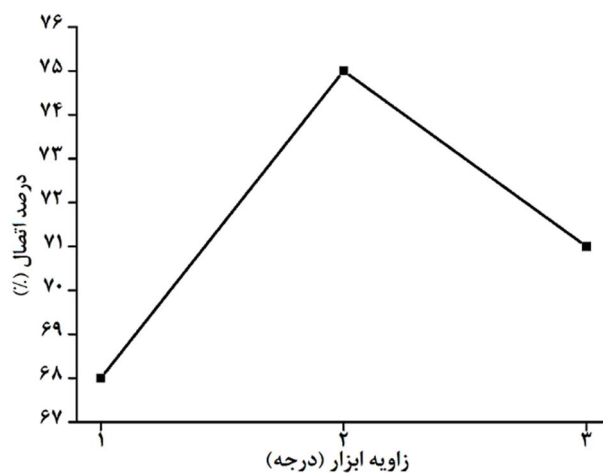
4-5- اثر سرعت خطی و دورانی ابزار

گرمای ورودی به محل اتصال مهمترین عامل تغییرات ساختار به حساب می‌آید که سبب بهبود خواص مکانیکی اتصال می‌شود [27]. حرارت اصطکاکی تولید شده با سرعت دورانی ابزار ارتباط مستقیم دارد. بگونه‌ای که با افزایش سرعت دورانی افزایش و با کاهش سرعت دورانی نیز کاهش می‌یابد. با توجه به متغیرهای انتخاب شده در این پژوهش نسبت مقدار گرمای تولید شده به دمای ذوب فلزات پایه بر اساس رابطه (13) در شکل 16 آورده شده است.

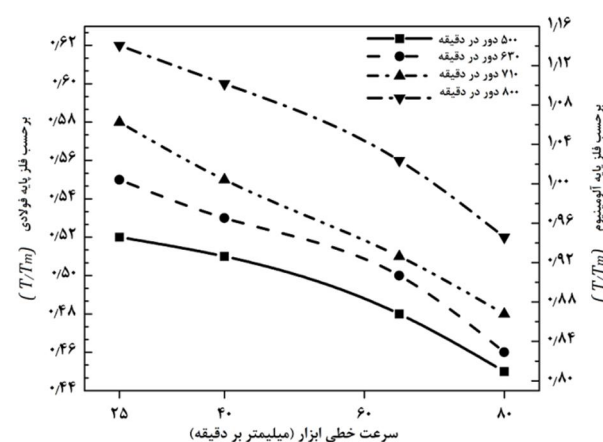
همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی ابزار، گرمای ورودی به محل اتصال نیز بیشتر می‌شود. این روند افزایشی بیانگر جریان و اغتشاش بیشتر مواد است که با بیشتر شدن سرعت دورانی اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر با افزایش سرعت خطی نسبت $\frac{T}{T_M}$ کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده در حرکت سریع‌تر منبع حرارت از محل اغتشاش است. همانطور که در شکل 16 مشاهده می‌شود بیشینه حرارت تولید شده در این پژوهش 62 درصد دمای ذوب فلز پایه فولادی بود که در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر در دقیقه تولید شد و کمترین آن هم مربوط به سرعت دورانی 500 دور در دقیقه و سرعت خطی 80 میلی‌متر در دقیقه بود. ستون سمت راست نمودار نسبت $\frac{T}{T_M}$ را برحسب فاز پایه آلومینیومی نشان می‌دهد. بیشینه دمای تولید شده در این فرآیند به اندازه 0/11 درصد بیشتر از دمای ذوب فلز پایه آلومینیومی بود. این شرایط بصورت مقطعی و در بازه زمانی کوتاه به وجود آمد و تغییرات زیادی در سطح و درون اتصال نداشت.

با توجه به اهمیت حرارت ورودی به محل اغتشاش به همراه دیگر متغیرهای فرآیند، عمق نفوذ، افسست و زاویه ابزار در این قسمت از تحقیق ثابت در نظر گرفته شد. بهینه مقدار این متغیرها از قسمت‌های قبل استخراج شد و عمق نفوذ و افسست ابزار به ترتیب 0/2 و 1/3 میلی‌متر و زاویه ابزار 2 درجه در نظر گرفته شد. شکل 17 بطور نمونه نمایشی مقطع اتصال را که در سرعت خطی 80 میلی‌متر در دقیقه و سرعت‌های دورانی مختلف جوشکاری شدند، نشان می‌دهد.

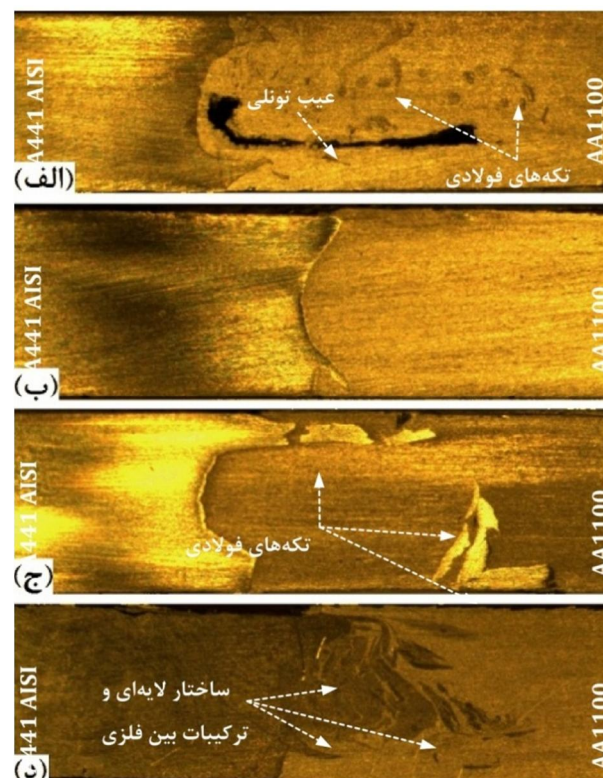
همانطور که در شکل 17- الف مشاهده می‌شود در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه به علت تولید گرمای کم و نفوذ کم حرارت به قسمت‌های زیرین محل اتصال، عیب تونلی شکل دراز ایجاد شده است. با افزایش سرعت دورانی و تولید گرمای بیشتر در سرعت دورانی 630 دور در دقیقه، این عیوب از بین می‌روند و نفوذ آلومینیوم به درون فولاد به شکل یکنواخت‌تری انجام گرفته است که در شکل 17- ب مشاهده می‌شود. در سرعت دورانی 710 دور در دقیقه، تولید حرارت بالاتر رفته و نرم‌تر شدن فولاد را به دنبال داشته است. این پدیده سبب شده تا تکه‌های فولادی از قسمت فلز پایه جدا شده و در دامنه‌ی آلومینیوم پراکنده شوند. همانطور که در شکل 17- ج مشاهده می‌شود، بعلت تولید گرما و کار مکانیکی بیشتر توسط شانه‌ی ابزار در ناحیه‌ی بالایی اتصال، کشیدگی فولاد از آن ناحیه شروع شده است. نوارهای نازک در قسمت پایین پنجره‌ی اتصال، حاصل فورج مواد از بالا به سمت پایین است. بطور کلی مقدار گرما ایجاد شده در سرعت دورانی 710 دور در دقیقه به اندازه‌ای نبوده است که ناحیه گسترده‌ای از فولاد را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل تنها ناحیه نازکی از فولاد تحت تأثیر تغییر شکل پلاستیکی و حرارت قرار گرفت و توسط ابزار به درون محل اتصال گسترده شد [27]. در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه، مقدار حرارت ورودی به محل اتصال در مقایسه با وضعیت‌های قبلی بیشتر شد. این افزایش گرما سبب شده تا ناحیه‌ی وسیع‌تری از فولاد به حالت خمیری درآید. این تکه‌های فولادی به درون بستر آلومینیومی نفوذ کرده و علاوه بر ایجاد یک ترکیبات لایه‌ای و بین فلزی، ساختار شبه کامپوزیتی را در



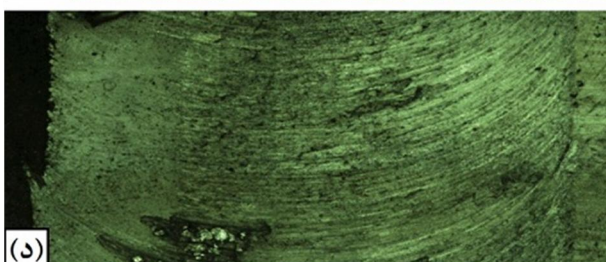
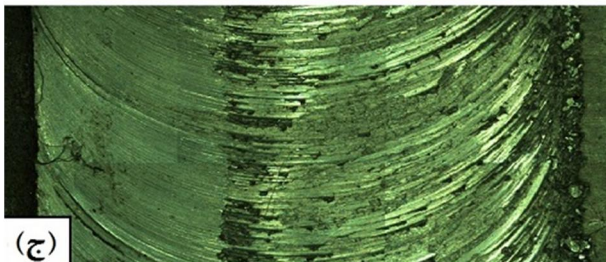
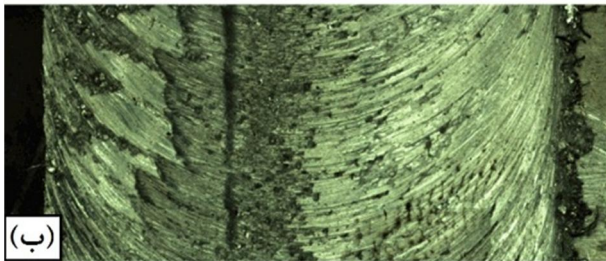
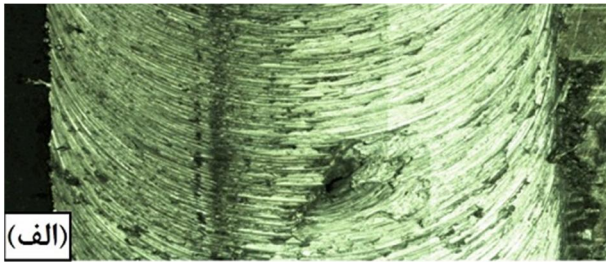
شکل 15 اثر زاویه ابزار بر روی درصد اتصال



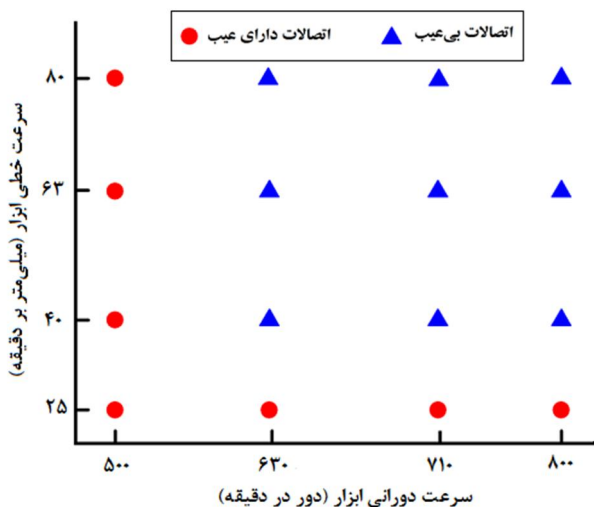
شکل 16 نسبت بیشینه حرارت تولید شده به دمای ذوب فلز پایه آلومینیومی



شکل 17 پنجره اتصالات جوشکاری شده با سرعت دورانی (الف) 500، (ب) 630، (ج) 710 و (د) 800 دور در دقیقه



شکل 18 جریان سطحی اتصالات جوشکاری شده با سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی (الف) 25، (ب) 40، (ج) 63 و (د) 80 میلی متر در دقیقه



شکل 19 اثر سرعت دورانی و خطی ابزار بر روی شکل گیری عیوب

مواد خمیری شکل وارد شده به منطقه اغتشاش توسط افزایش سرعت خطی نیز جایگزین تولید حرارت کم و اغتشاش نامناسب در این سرعت دورانی نشده است. در سرعت خطی 25 میلیمتر در دقیقه نیز به دلیل نرخ کرنش

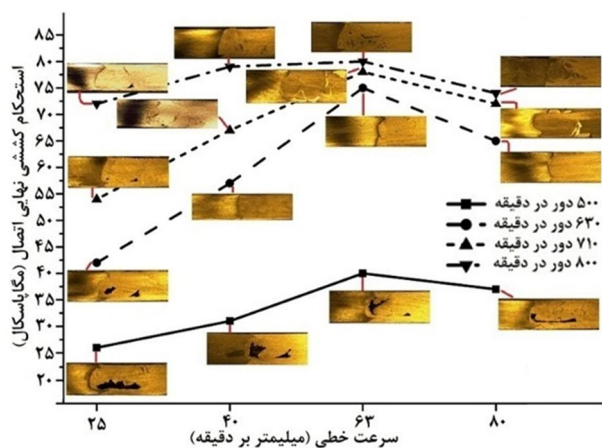
ابعاد ماکروسکوپی پدید آورند [27]. در حالت کلی می توان اظهار داشت که با افزایش سرعت دورانی در اتصال آلومینیوم AA1100 و فولاد A441 AISI، حرارت ورودی به محل اتصال بیشتر شده و سبب نرمتر شدن فولاد می شود. این اثر ترکیب بیشتر فولاد و آلومینیوم را به دنبال دارد و شکل ساختار داخلی جوش را کامپوزیتی شکل می کند [27].

از دیگر مورد قابل استنباط از شکل 17، افزایش کاهش دما همگام با افزایش سرعت خطی است. علت این پدیده گذر سریع منبع حرارت از محل اتصال و از دست رفتن سریع تر گرمای ورودی به واسطه نفوذ کمتر حرارت اصطکاکی تولید شده است. از طرف دیگر در سرعت های خطی پایین تر، نیروی گشتاور ابزار بیشتر می شود. علت این مسأله افزایش گرمای حاصل از تغییر شکل پلاستیک شدید، کاهش گرمای اصطکاکی و طولانی تر شدن زمان نرخ خنک شوندگی است [22]. به منظور بررسی اثرات سرعت خطی در جریان سطحی مواد، سطح خط اتصالاتی که با سرعت دورانی 800 دور در دقیقه به هم جوش داده شدند در شکل 18 نشان داده شده است.

همانطور که در شکل مشاهده می شود، با افزایش سرعت خطی، جریان سطحی مواد بهتر می شود. مهم ترین دلیل این مساله وارد شدن مواد بیشتر از جلوی محل اتصال به منطقه اغتشاش و نیز افزایش نرخ کرنش محل اتصال است که با سرعت خطی افزایش می یابد [28,29]. علت شکل گیری عیوب سطحی در سرعت خطی 25 میلیمتر در دقیقه، نیروی فورج نامناسب و ورود ناهمگن مواد از جلو به درون اتصال است که در شکل 18- الف مشاهده می شود. بارزترین مشخصه در این سرعت خطی حفره های تونلی شکل گرفته در خط اتصال است. منبع حرارت همانند سرعت خطی 25 میلیمتر در دقیقه، در سرعت خطی 40 میلیمتر در دقیقه نیز منبع گرما به کندی حرکت می کند و این مسأله سبب می شود تا نرخ خنک شوندگی در خط اتصال کاهش یابد. اختلاف خواص حرارتی و ضریب انقباض بین دو فلز در هنگام سرد شدن سبب می شود تا آلومینیوم، فلز پایه فولادی به همراه خود به کناره ها بکشد و سبب ایجاد یک فرورفتگی سطحی در خط مشترک بین دو فلز شود [27]. روند افزایشی کاهش دما سبب می شود تا فولاد در حال انجام در مقابل این فشار مقاومت کند و حفره های ریز و ترک های سطحی را در سمت آلومینیوم بوجود آورد. در واقع این عیوب حاصل ممانعت فولاد در مقابل انقباض یکپارچه آلومینیوم در زمان کاهش دما است که در شکل 18- ب قابل مشاهده است. با افزایش سرعت خطی، ماندگاری منبع حرارت از محل زودتر بیرون می رود و نرخ خنک شوندگی بالاتر می رود و از اغتشاش بیش از حد محل اتصال می کاهد. اثر این تغییرات در شکل 18- ج مشاهده می شود. با افزایش سرعت خطی تا 80 میلیمتر در دقیقه، نرخ کرنش، مقدار ماده ورودی به محل اتصال و نیز نرخ خنک شوندگی حالت مناسب تری نسبت به حالت های قبل پیدا می کنند و سبب از بین رفتن عیوب سطحی و صافی سطحی بیشتر می شوند که در شکل 18- د قابل مشاهده است.

از بررسی اتصال بین دو فلز آلومینیوم AA1100 و فولاد A441 AISI می توان استنباط کرد این است که گرمای ورودی به محل اتصال به تنهایی و بدون اغتشاش مناسب مواد خمیری، قادر به تولید جوش بدون عیب نیست. بر همین اساس برای تولید یک اتصال بی عیب بررسی تأثیر همزمان سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار ضروری به نظر می رسد.

شکل 19 اثر همزمان سرعت خطی و سرعت دورانی را بر شکل گیری اتصالات بی عیب نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص است در سرعت دورانی دور 500 در دقیقه، اغتشاش و گرمای ورودی به محل اتصال نامناسب بوده و همین مساله سبب تولید عیوب داخلی در جوش می شود.



شکل 20 اثر سرعت دورانی و خطی ابزار بر روی استحکام کششی نهایی اتصال

با عبور سریع ابزار در سرعت خطی بالاتر از 63 میلیمتر در دقیقه، ناحیه جوشکاری در اثر انتقال حرارت با محیط اطراف خود دمای بیشتری را از دست می‌دهد و در هنگام خنک شدن ناحیه اتصال به دلیل اختلاف ضریب انقباض دو فلز، در مناطقی از اتصال که این دو فلز در تماس با هم هستند حفره‌هایی می‌تواند به وجود آید که شرایط نامطلوبی را در ناحیه اتصال بوجود می‌آورد [27].

5- نتیجه گیری

در این تحقیق اتصال بین آلومینیوم AA1100 و فولاد A441 AISI با موفقیت انجام شد. نتایج حاصل از تأثیر حرارت و متغیرهای مکانیکی فرآیند بر روی خواص مکانیکی اتصال بین آلومینیوم AA1100 و فولاد A441 AISI در زیر ارایه می‌شوند:

1- بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ثبت دما مشخص گردید که بیشینه حرارت اصطکاکی توسط شانه ابزار تولید می‌شود. علت این پدیده در بیشتر بودن سطح تماس شانه ابزار با سطح قطعه کار است. بر اساس متغیرهای انتخاب شده در این فرآیند، بیشینه دمای تولید شده 750 درجه سانتی‌گراد بود که در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه حاصل شد.

2- نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که به دلیل تنش برشی کمتر آلومینیوم نسبت به فولاد، تولید حرارت در سمت فلز پایه آلومینیومی بیشتر از فلز پایه فولادی است. توزیع و نفوذ حرارت نیز به دلیل ضریب نفوذ حرارت بیشتر آلومینیوم، در سمت فلز AA1100 بیشتر از فولاد A441 AISI پیش-بینی شد. پس از مقایسه با نتایج تجربی مشخص شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج واقعی تطابق دارد.

3- با جابجایی پین ابزار در فلز پایه آلومینیومی و بررسی افست‌های 0/8، 1/3 و 2 میلی‌متر مشخص شد که بهترین افست مورد استفاده 1/3 میلی‌متر در درون آلومینیوم است. در افست 0/8 گرمای تولید شده و سیلان آلومینیوم خمیری مناسب نیست و در افست بیش از 1/3 میلی‌متر حجم کمتری از پین ابزار درون قطعه کار فولادی قرار می‌گیرد و به خوبی قادر به تغییر شکل فولاد نیست.

4- همانند افست ابزار، عمق نفوذ ابزار نیز تأثیر چشمگیری بر روی استحکام اتصال دارد. در میان عمق نفوذهای انتخاب شده در این پژوهش، مناسب‌ترین جریان مواد و بالاترین استحکام در عمق نفوذ 0/2 میلی‌متر بدست آمد. اتصالی که در عمق نفوذ 0/1 میلی‌متر تولید شد، دارای استحکام مناسبی نبود و در عمق‌های نفوذ بیش از 0/2 میلی‌متر اغتشاش مواد نامناسب بود. این مساله سبب ایجاد عیوب داخلی و جریان ناهمگن مواد در سطح و داخل اتصال شد.

کم و فورج نامناسب مواد توسط ابزار از قسمت جلو به دورن اتصال، عیوب سطحی و اغتشاش سطحی نامناسب ایجاد شده و این نقص‌ها با افزایش سرعت خطی از بین می‌روند. با افزایش همزمان سرعت دورانی و سرعت خطی، علاوه بر ورود گرمای مناسب و اغتشاش کافی مواد، فورج مواد به درون منطقه اغتشاش بهتر شده و سبب تولید اتصال عاری از عیوب سطحی و داخلی می‌شود.

شکل 20 استحکام کششی نهایی اتصالات انجام شده در این پژوهش را به همراه نمای عرضی مقطع اتصالات را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 20 مشخص است با افزایش سرعت دورانی، استحکام کششی محل اتصال افزایش می‌یابد. این وضعیت در حالی است که با کاهش سرعت خطی نیز استحکام محل اتصال کاهش می‌یابد. بیشینه مقدار استحکام در اتصالات انجام شده برابر با 90 درصد فلز پایه آلومینیومی و کمینه آن 30 درصد فلز پایه آلومینیومی استحکام دارد. رفع شدن عیوب داخلی اتصال که در شکل 19 اشاره شده بود، نیز در این شکل نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌های تست کشش، محل شکست در قسمت آلومینیوم قرار داشت. علت این پدیده در ضعیف‌تر بودن منطقه جوش فلز پایه آلومینیومی نسبت دیگر مناطق اتصال است [27]. تغییرات حرارتی که در سمت فلز پایه آلومینیومی رخ می‌دهد سبب کاهش استحکام منطقه متأثر از حرارت می‌شود که همان محل شکست نمونه‌های آماده سازی شده در تست کشش است. توضیح رفتار ریزساختار محل اتصال در طول جوشکاری از اهداف این مقاله نیست. به همین دلیل از توضیح بیشتر در این زمینه صرف‌نظر می‌شود. از طرف این مساله نیز قابل توجه است که در عیوب موجود در این اتصالات، در سمت فلز پایه آلومینیومی شکل گرفته است. با توجه به موارد مشاهده شده می‌توان به این نتیجه رسید که محل شکست در آزمون کشش وابسته به ساختار کریستالی و عیوب موجود در محل اتصال است [27].

استحکام اتصالاتی که در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه به همدیگر جوشکاری شدند دارای کمترین استحکام تسلیم در مقایسه با دیگر اتصالات هستند. علت این نوع رفتار وجود عیوب تونلی و کرمی شکل در قسمت‌های زیرین محل جوش شکل گرفته است و سبب کاهش مقاومت در مقابل نیروهای کششی می‌شود. با افزایش سرعت خطی شرایط حرارتی محل اتصال به سمتی سوق پیدا می‌کند که نتیجه آن کوچک‌تر شدن عیوب در محل اتصال می‌شود. این پدیده تأثیر مستقیم بر روی خواص فیزیکی محل اتصال دارد. همانطور که در شکل 20 مشاهده می‌شود، استحکام کششی محل اتصال نیز با افزایش سرعت خطی افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت دورانی گرمای ورودی به محل اتصال نیز افزایش یافته و این افزایش دما سبب نرم‌تر شدن دو فلز می‌شود. این رخداد در هم فرورفتگی بیشتر قطعه کارها در مرز اتصال، شکل‌گیری لایه شبه کامپوزیتی و بیشتر شدن استحکام محل اتصال را به دنبال دارد [27].

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود بیشترین استحکام تسلیم مربوط به اتصالی است که با سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 63 میلیمتر در دقیقه جوشکاری شده است و استحکام آن 80 مگاپاسکال بود. مقدار ضعیف‌ترین استحکام تسلیم 40 مگاپاسکال بود و مربوط به اتصالاتی بود که با سرعت دورانی 500 و سرعت خطی 25 جوش داده شده بود. روند افزایش استحکام کششی اتصال از سرعت خطی 25 میلیمتر در دقیقه تا سرعت خطی 63 میلیمتر در دقیقه ادامه دارد. در واقع با افزایش دورانی ابزار و افزایش حرارت ورودی به ناحیه اتصال در حین جوشکاری، افزایش اغتشاش و اختلاط دو ماده دیده می‌شود.

- 5- زاویه ابزار نقش مهمی در جریان سطحی و زیرین اتصال دارد. با توجه به ضخامت ورق‌ها و ابعاد ابزار مورد استفاده در این پژوهش، مناسب‌ترین استحکام و جریان سطحی در اتصالی ایجاد شد که در آن ابزار دارای زاویه 2 درجه بود.
- 6- بطور کلی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با بیشتر شدن سرعت دورانی ابزار، حرارت ورودی به منطقه اتصال افزایش می‌یابد. با توجه به امکانات دستگاه موجود در این تحقیق، حرارت ورودی به محل اتصال، اغتشاش مواد خمیری و جریان مواد با افزایش سرعت دورانی از 500 دور در دقیقه تا 800 دور در دقیقه به شکل مناسب‌تری به خود گرفت و عیوب داخلی اتصالات نیز از بین رفتند.
- 7- با بالا رفتن سرعت خطی ابزار، فورج مواد خمیری از قسمت جلوی ابزار به دورن محل اتصال بیشتر شد و این مسأله سبب از بین رفتن عیوب سطحی و شکل‌گیری جریان مناسب در سطح خارجی اتصال شد. در میان سرعت‌های خطی انتخاب شده، مستحکم‌ترین اتصالات در سرعت خطی 63 میلی‌متر در دقیقه تولید شدند. با توجه به موارد فوق، در این پژوهش مستحکم‌ترین اتصال در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 63 میلی‌متر در دقیقه با افس 1/3 میلی‌متر، عمق نفوذ 0/2 میلی‌متر و زاویه ابزار 2 درجه ایجاد شد که نزدیک به 90 درصد فلز پایه آلومینیومی استحکام داشت.
- 6- مراجع**
- [1] W. Thomas, E. Nicholas, J. Needham, M. Murch, P. Smithand, C. Dawes, Friction Stir Butt Welding, *International Patent Application* No. PCT/GB92/02203, 1991.
 - [2] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering*, vol. 50, pp. 71–78, 2005.
 - [3] M. Movahedi, A. H. Kokabi, S. M. Seyed Reihani, H. Najafi, Mechanical and Microstructural Characterization of Al-5083/Dt-12 lap joints made by friction stir welding, *Engineering Procedia*, vol. 10, pp. 3297–3303, 2011.
 - [4] Y. Sawada, M. Nakamura, Lapped friction stir welding between ductile cast irons and stainless steels, *Journal of the Japan Welding Society*, vol. 27, No. 3, pp. 176–182, 2009.
 - [5] C. Cheng, H. Lin, J. Lin, Friction stir welding of ductile iron and low carbon steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, No. 8, pp. 706–711, 2010.
 - [6] H. Liu, K. Nakata, N. Yamamoto, J. Liao, Friction stir welding of pure titanium lap joint, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, No. 5, pp. 428–432, 2010.
 - [7] M. Matsushita, Y. Kitani, R. Ikeda, M. Ono, H. Fujii, Y. Chung, Development of friction stir welding of high strength steel sheet, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, No. 2, pp. 181–187, 2010.
 - [8] W. H. Jiang, R. Kovacevic, Feasibility study of friction stir welding of 6061-T6 aluminium alloy with AISI 1018 steel, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B*, Vol. 218, pp. 1323–1331, 2004.
 - [9] Y. Weng, H. Dong, Y. Gan, *Advanced Steels*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg and Metallurgical Industry Press, pp.3–35, 2011.
 - [10] AWS welding Handbook, Aluminum and aluminum alloys, vol. 3, 1998.
 - [11] O. Frigaad, O. Grong, O.T. Midling, A Process Model for Friction Stir Welding of Age Hardening Aluminum Alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 32, pp. 1189–1200, 2001.
 - [12] M. B. Durdanovic, M. M. Mijajlovic, D. S. Milcic, D. S. Stamenkovic, Heat Generation during Friction Stir Welding Process, *Tribology in industry*, vol. 31, pp.182–189, 2009.
 - [13] E. A.Brandes, G. B. Brook, 1999. *Smithells Metals Reference Book*, 7th ed., Butterworth- Heinemann, Oxford, UK.
 - [14] ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International Handbook committee, vol. 18, pp. 39–45, 1992.
 - [15] H. Schmidt, J. Hattel, J. Wert, An Analytical Model for the Heat Generation in Friction Stir Welding, *Mater. Sci. Eng.*, vol. 12 pp. 143, 2004.
 - [16] R. Holm, Calculation of the Temperature Development in a Contact Heated in the Contact Surface and application to the Temperature Rise in a Sliding Contact, *Journal applied physics*, vol. 19, pp. 361–366, 1984.
 - [17] A. Arora, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, Back of the envelope calculations in friction stir welding – Velocities, peak temperature, torque, and hardness, *Acta Materialia*, vol. 59, pp. 2020–2028, 2011.
 - [18] Z. Deng, M.R. Lovell, K.A. Tagavi, Influence of Material Properties and Forming Velocity on the Interfacial Slip Characteristics of Cross Wedge Rolling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 123, No. 4, pp. 647–653, 2001.
 - [19] H.S. Kong, M.F. Ashby, Friction-Heating Maps and Their Applications, *Material Research Society Bulletin*, vol. 16, No. 10, pp. 41–47, 1991.
 - [20] A. Arora, R. Nandan, A.P. Reynolds, T. DebRoy, Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments, *Scripta Materialia*, vol. 60, pp. 13–16, 2009.
 - [21] AWS welding Handbook, Aluminum and aluminum alloys, vol. 3, 1998.
 - [22] W. J. Arbegast, A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding, *Scripta Materialia*, vol. 58, 372–376, 2008.
 - [23] C. Rest, P. J. Jacques, A. Simar, On the joining of steel and aluminium by means of a new friction melt bonding process, *Scripta Materialia*, vol. 77, pp. 25–28, 2014.
 - [24] K. Kumar, S.V. Kailas, On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminum alloy, *Materials and Design*, vol. 29, pp. 791–797, 2008.
 - [25] M. Dehghani, A. Amadeh, S.A. Akbari Mousavi, Investigations on the Effects of Friction Stir Welding Parameters on Intermetallic and Defect Formation in Joining Aluminum Alloy to Mild Steel, *Materials and Design*, vol. 49, pp. 433–441, 2013.
 - [26] G.F. Zhang, W. Su, J. Zhang, X. Zhang, Visual observation of effect of tilting tool on forging action during FSW of aluminum sheet. *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, pp. 87–91, 2011.
 - [27] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hossinzadeh, Study on joint zone Microstructure Evolution and Hardness in Friction Stir welding of AA1100 Aluminum alloy to A441 AISI steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 97–107, 2014 (In Persian).
 - [28] P. F. Mendez, K. E. Tello, T. J. Lienert, Scaling of coupled heat transfer and plastic deformation around the pin in friction stir welding, *Acta Materialia*, vol. 58, pp. 6012–6026, 2010.
 - [29] A. Arora, Z. Zhang, A. Deb, T. DebRoy, Strains and strain rates during friction stir welding, *Scripta Materialia*, vol. 61, pp. 863–866, 2009.