



Experimental Investigation of Welding Defects in Butt Joining of Aluminum Alloy by Friction Stir Welding: Effects of Tool Pin Profile and Process Parameters

Mostafa Akbari¹, Parviz Asadi^{2*}

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 05.23.2021

Revised: 09.06.2021

Accepted: 10.02.2021

Keyword:

Friction Stir Welding
Welding Defects
5083 Aluminum
Microstructure
Mechanical Properties

*Corresponding Author:

Parviz Asadi

Email: asadi@eng.ikiu.ac.ir

ABSTRACT

In this paper, the microstructural and mechanical properties as well as the defects in the joining of aluminum sheets using the friction welding method are investigated. First, the microstructural properties of the friction stir welding zone are investigated, and then the effect of process parameters on the microstructural properties is discussed. The grain size in the stir zone was greatly improved compared to the base metal, which resulted in the improvement of the mechanical properties in this zone. Then, the effect of process parameters on the grain size was investigated. Welding defects, which is one of the most important reasons for joint failure, were investigated and the effect of tool pin profile and process parameters on the formation of defects in the welding area were discussed. For instance, by using the rotational speed of 500 rpm, a defect-free joint can be produced by the threaded pin even in the traverse speed of 500 mm/min, while the amount for the square and triangular pin profiles were 400 and 315 mm/min, respectively. Finally, the hardness of the welded area was studied in different samples. The hardness of the weld metal was lower than that of the base material due to the annealing of hardness which was generated as a result of primary rolling process. The hardness decreased by increasing the ratio of rotational speed to tool traverse speed.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The friction stir welding method is a relatively new method for joining different alloys, particularly aluminium alloys. Most of the research undertaken in connection with this method was carried out on different aluminium. In this method, due to low input heat and melting of the base alloy, some of the problems of melting methods were greatly reduced.

In the present study, welding of 5083 aluminum alloy using the friction welding method was carried out. In addition, the mechanical properties of the resulting joint and the effect of various parameters of the welding method such as tool shape, rotational and advancing speed on weld properties such as microstructure, defects, and hardness were evaluated in order to determine the appropriate initial parameters.

Methodology

The authors designed the tools based on previous research. Four tools made of hot work steel 2344 were used in this process, all of which had a shoulder diameter of 20 mm and a different pin shape. The dynamic diameter of the pin in all tools was 5 mm and its height 4.8 mm. The tilt angle of the fixed tool was 3 degrees. The penetration depth of the tool was measured from the point of contact of the tool shoulder with the surface of the workpiece (Fig. 3). The penetration depth was constant and 0.5 mm in all tests.

The microhardness of the welded specimens was measured in addition to the cross-section perpendicular to the process path and at a distance of 2 mm from the specimen surface. The applied load was 200 grams and the application time was 15 seconds.

Results and discussion

Figure 1 shows the surface quality of the welds produced. The surface of the sample welded with the T1 tool at rotational speeds of 500 rpm and 500 mm / min is shown in Figure 1a, and the part of the image with higher magnification is shown in Figure 1b. The steps of the tool are visible in the Figure 1b. The surface of the welded specimen at rotational speeds of 500 rpm and 50 mm / min is shown in Figure 1c. By increasing the forward speed at a constant rotational speed, or in other words by reducing the ratio of rotational speed to advancing speed, the movement steps of the tool on the workpiece become larger and surface quality reduced. At low traverse speeds, the steps were interconnected and the surface of the part appeared uniform.

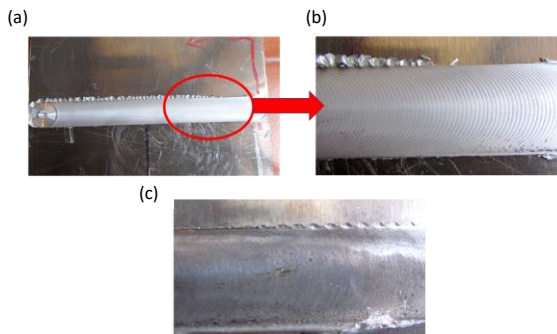


Figure 1. Surface of the sample welded with the T1 tool at rotational speeds and advances of 500 rpm and 500 mm / min, (b) Magnification of the area shown, and (c) Surface of the sample welded with the T1 tool at the rotational and traverse speeds of 500 rpm and 50 mm / min.

The hardness curve for welded specimens welded with threaded, square, and triangular conical tools is shown in Figure 2. These welds were produced at rotational speeds of 500 rpm and 315 mm/min. The average hardness of the threaded tool was higher than other tools, and the sample welded with the conical triangular tool had a lower average value and a higher rate of change (fluctuations) in its hardness. This was due to the non-uniformity of its microstructure and the presence of defects in the welding section.

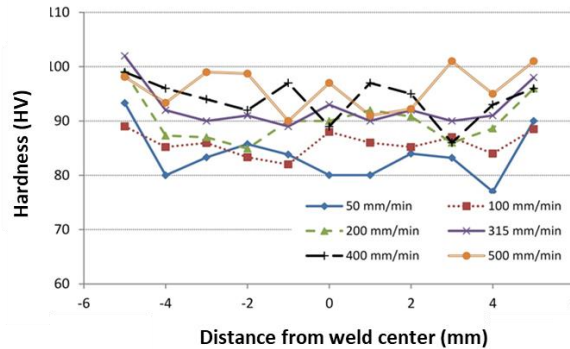


Figure 2. Hardness change curves for welded specimens.

Conclusion

In this paper, the effects of friction stir welding parameters on the properties and defects formed by the welding of 5083 aluminum are investigated. The parameters of tool shape, rotational speed, and traverse speed were investigated as the main parameters in the production of joints and the following results were obtained.

- As the traverse speed increased, the hardness in the SZ increased and the average hardness in the SZ reached the highest for threaded tools (about 95 V) and lowest for triangular tools (about 85 V).
- In terms of welding defects, simple triangular and tapered triangular tools created more defects, and this phenomenon also occurred at low forward speeds. For conical triangular tools, even in the rotational velocity ratio of 2.5, in the welding sample, tunnel and non-hollow defects were observed.

بررسی تجربی عیوب جوش در اتصال کنارهم آلیاژ آلومینیوم با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی: بررسی هندسه بین ابزار و پارامترهای فرایندی

مصطفی اکبری^۱، پرویز اسدی^{۲*} 

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰

کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

آلومینیوم ۵۰۸۳

عیوب جوش

ریزساختار

خواص مکانیکی

در این مقاله به بررسی خواص ریزساختاری، مکانیکی و همچنین عیوب موجود در اتصال ورقه‌های آلومینیومی به کمک روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است. ابتدا خواص ریزساختاری ناحیه جوشکاری اصطکاکی بررسی شد و سپس تأثیر پارامترهای فرایند بر خواص ریزساختاری مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی نسبت به فلز پایه، بسیار بهبود یافته است. سپس تأثیر پارامترهای ورودی فرایند بر اندازه ذرات بررسی شد. عیوب جوش که یکی از مهم‌ترین دلایل شکست اتصالات می‌باشد بررسی شد و تأثیر هندسه بین ابزار و پارامترهای فرایند بر ایجاد عیوب در ناحیه جوشکاری مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد ابزار رزوه‌دار در سرعت پیش‌روی بالاتری قابلیت تولید جوش بی‌عیب را دارد و به ترتیب ابزارهای مربعی، مثلثی مخروطی و مثلثی در مراتب بعدی قرار می‌گیرند؛ به طوری که در سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه می‌توان با ابزار رزوه‌دار حتی در سرعت پیش‌روی ۵۰۰ میلی‌متر در دقیقه نیز اتصال بی‌عیب تولید کرد در حالی که این مقدار برای ابزار مربعی و مثلثی به ترتیب ۴۰۰ و ۳۱۵ میلی‌متر در دقیقه است. در انتها سختی ناحیه جوشکاری شده در نمونه‌های مختلف بررسی شد. سختی فلز جوش به دلیل آنیل شدن و حذف کار سختی انجام شده روی ماده پایه (ناشی از فرایند نورد اولیه) پایین‌تر از ماده پایه است و با افزایش نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش‌روی ابزار، سختی کاهش می‌یابد.

*نویسنده مسئول: پرویز اسدی

پست الکترونیکی:

asadi@eng.ikiu.ac.ir

مقدمه

آلیاژهای Al-Mg (بالاخص آلیاژ ۵۰۸۳) موارد مصرف زیادی در ساخت قطعات جوشی یافته‌اند. همچنین در سازه بدنه کامیون‌ها، مخازن بزرگ حمل بنزین، شیر و دانه‌های غلات و مخازن تحت فشار استفاده می‌شوند. مقاومت به خوردگی بالاتر آلیاژهای سری ۵۰۰۰ آن‌ها را برای بدنه قایق‌های کوچک و ساختمان اصلی کشتی‌های اقیانوس‌پیما مناسب کرده است. استفاده در زره نفرهای نظامی، اتومبیل و ساخت تجهیزات که در دمای بسیار کم کار می‌کنند، از دیگر کاربردهای این آلیاژ است [۱؛ ۲].

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، روش نسبتاً جدیدی در اتصال آلیاژهای مختلف بالاخص آلیاژهای آلومینیم است. بیشترین تحقیقات انجام شده در ارتباط با این روش بر روی آلیاژهای مختلف آلومینیم صورت گرفته است [۳؛ ۴]. در این روش به دلیل حرارت ورودی کم و ذوب آلیاژ پایه، برخی از مشکلات روش‌های ذوبی به شدت کاهش می‌یابد. در تحقیق حاضر، جوشکاری آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بررسی شد و خواص مکانیکی اتصال حاصل و تأثیر پارامترهای متعدد روش جوشکاری از جمله شکل ابزار، سرعت دورانی و پیش‌روی بر خواص جوش مانند ریزساختار، عیوب و سختی ارزیابی گردید تا به منظور تعیین پارامترهای مناسب اولیه جوشکاری مورد استفاده قرار گیرند.

اصول کلی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، بسیار ساده است. در این روش یک ابزار غیرمصرفی چرخان در اثر اعمال نیرو در دو حدفصل بین دو قطعه مورداتصال فرو می‌رود و با حرکت به دور خود و حرکت رو به جلو در امتداد درز اتصال، موجب اختلاط آلیاژ دو طرف درز می‌شود و یک اتصال مناسب به وجود می‌آورد. این ابزار، متشکل از یک پین مخصوص و یک شانه است. به منظور ممانعت از حرکت قطعات مورد جوشکاری، آن‌ها به میز کار کاملاً مقید می‌شوند. ابزار در این فرایند دو عمل اصلی را انجام می‌دهد: ۱- گرمایش قطعه کار. ۲- جابه‌جا کردن مواد در اطراف فصل مشترک و نهایتاً ایجاد خط اتصال [۵-۸].

تولید جوش‌های سالم و بدون عیوبی نظیر حفره تونلی و نیامد، با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیازمند انتخاب مناسب پارامترهای اصلی فرایند یعنی سرعت چرخش ابزار (ω)، سرعت انتقالی ابزار (v) و نیروی عمودی اعمالی (یا موقعیت عمودی پین) می‌باشد. مقادیر مناسب این متغیرها تابعی از آلیاژ موردجوشکاری، ضخامت و هندسه ابزار می‌باشند. از طرفی سه متغیر اصلی جوشکاری نیز چندان مستقل از یکدیگر نیستند. مشاهده می‌شود انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری به منظور استحصال یک اتصال مناسب، نیازمند بررسی متغیرهای متعددی است. تاکنون برخی تحقیقات به منظور بررسی تأثیرات پارامترهای جوشکاری بر خواص اتصال تولید شده انجام شده است. کالوک و همکاران [۹] خواص مکانیکی حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ را بررسی کرده‌اند. جوشکاری به صورت لب‌به‌لب و بر روی ورقی به ضخامت ۶/۴۵ میلی‌متر انجام شده است. گزارش شده است که ریزساختار تغییر شکل داده فلز پایه با ریزساختار جوش که متشکل از دانه‌های هم‌محور می‌باشد، جایگزین شده است. در پژوهشی دیگر فوجی و همکارانش [۱۰]، تأثیر شکل ابزار بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ را بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها پین با استوانه رزوه‌دار، مقدار استحکام نهایی بیشتری از استوانه بدون رزوه در اتصال ایجاد می‌کند و در جوش حاصل از این دو ابزار، عیوبی در ناحیه جوش تشکیل می‌شوند. آن‌ها در مورد نوع و اندازه عیوب گزارشی ارائه نکرده‌اند. پیل و همکارانش [۱۱] تأثیرات سرعت جوشکاری بر ریزساختار، خواص مکانیکی و تنش پسماند آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ را بررسی کرده‌اند. بررسی آن‌ها نشان داد سختی در مقطع جوش از HV ۱۳۰ برای آلیاژ پایه به HV ۷۵ در مرکز خط جوش تغییر کرده است و مقدار سختی تقریباً مستقل از سرعت حرکت و شکل ابزار می‌باشد. چکوسکی [۱۲] نیز آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به ضخامت ۱۰ میلی‌متر را به شکل دوطرفه جوشکاری کرده و مقادیر استحکام کششی نهایی جوش را برابر ۳۲۲ MPa گزارش کرده است. با توجه به استحکام کششی نهایی فلز پایه (۳۴۶ MPa) مقدار بازدهی اتصال برابر ۹۳ درصد به دست آمده است. هیراتا و همکارانش [۱۳] تأثیر متغیرهای فرایند بر اندازه دانه و خواص مکانیکی

را در آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به ضخامت ۳ میلی‌متر بررسی نکرده‌اند. متغیرهای به‌کاررفته در این پژوهش شامل سرعت چرخشی ۱۰۰-۵۰۰ rpm، سرعت حرکت ابزار ۲۰۰-۱۰۰ mm/min، قطر شانه ۱۲، قطر پین ۴ میلی‌متر استوانه‌ای شکل و زاویه کجی ۳° بود. یافته‌های ایشان نشان می‌دهد که با کاهش حرارت ورودی، اندازه دانه‌های منطقه جوش ریزتر می‌شود و افزایش طول نمونه در آزمایش کشش، بیشتر می‌گردد. اکبری و همکاران [۱۴؛ ۱۵] با استفاده از مدل عددی و داده‌های تجربی، تأثیر پارامترهای جوشکاری نظیر سرعت پیش‌روی و دورانی را بر نحوه اختلاط فلزات در هنگام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روی هم برنج و آلومینیوم بررسی کردند. آن‌ها دریافتند با افزایش سرعت دورانی یا کاهش سرعت پیش‌روی، اختلاط دو فلز ناهمنام در ناحیه جوش، افزایش و همچنین میزان نفوذ آلیاژ برنج به درون آلومینیوم افزایش می‌یابد. چنایا و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر پین ابزار بر جوشکاری آلیاژ ۵۰۸۳ پرداختند. آن‌ها از سرعت پیش‌روی ابزار ۲۰، ۳۲ و ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه به‌منظور جوشکاری استفاده کردند. از آنجایی که سرعت‌های مورد استفاده در این پژوهش پایین بودند، خواص ریزساختاری نمونه‌ها تعیین‌کننده خواص مکانیکی جوش بود و تمامی نمونه‌ها بدون عیب بودند. کومار و همکاران [۱۷] با استفاده از روش تاگوچی، پارامترهای بهینه فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ را تعیین کردند. آن‌ها در این تحقیق محدوده سرعت خطی را بین ۳۰ تا ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفتند که سرعت پایینی است. چاندر و همکاران [۱۸] پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ ۵۰۸۳ را مطالعه کردند. در این پژوهش نیز از سرعت‌های پیش‌روی پایین بین ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده و مطالعه سرعت‌های بالای جوشکاری مورد نظر نبوده است.

در مقالات پیشین عموماً از سرعت‌های پیش‌روی پایین به‌منظور حصول اطمینان از سلامت جوش استفاده شده است. رویکرد این مقاله تعیین بیشینه سرعت پیش‌روی مجاز که سبب تولید اتصالی بدون عیب شود، می‌باشد. سرعت بالای فرایند جوشکاری، سبب کاهش زمان تولید و در نتیجه کاهش هزینه‌ها می‌گردد. تأثیرات پارامترهای فرایندی از جمله سرعت‌های دورانی و پیش‌روی و هندسه پین ابزار بر روی توزیع ریزسختی در سطح مقطع اتصال و نیز با تأکید بر نحوه تشکیل عیوب و انواع آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. هدف اصلی تعیین محدوده پارامترهای فرایندی برای پین ابزارهای مختلف به‌منظور تولید اتصال بی‌عیب در سرعت جوشکاری بالا است.

آزمایش‌های تجربی

مواد اولیه مورد استفاده ورق ۵ میلی‌متری آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در ابعاد ۲۰×۷۵ میلی‌متر است که هر جفت ورق به‌صورت لب‌لب به هم جوش داده خواهد شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۵۰۸۳ در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳.

ماده	Al	Mg	Mn	Si	Cr	Ti	Fe
تراز درصد وزنی	۴/۲	۰/۷۱	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۱۳	

تجهیزات استفاده شده در این پژوهش یک ماشین فرز عمودی معمولی می‌باشد که با بستن یک فیکسچر روی میز آن به یک دستگاه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ساده تبدیل شده است. فیکسچر مورد نیاز به‌گونه‌ای طراحی شده است که بتوان قطعات را روی آن ثابت نگه داشت؛ به‌گونه‌ای که تحت تأثیر نیروهای فرایند بتواند از حرکت و لغزش قطعه کار جلوگیری کند. نمایی از دستگاه به همراه ابزار و قطعه کار سوار شده بر آن در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱. نمایی از دستگاه به همراه ابزار و قطعه کار سوار شده بر آن.

نویسندگان ابزارها را براساس تحقیقات پیشین طراحی کرده‌اند. چهار ابزار از جنس فولاد گرم کار ۲۳۴۴ در این فرایند مورد استفاده قرار گرفتند که قطر شانته در همه آن‌ها ۲۰ میلی‌متر و شکل بین آن‌ها متفاوت بوده است. اشکال بین مورد استفاده در آن‌ها عبارتند از: مربعی، استوانه رزوه‌دار با گام رزوه ۱ میلی‌متر راست‌گرد، مثلثی ساده و مثلثی مخروطی (هرم ناقص) می‌باشند. قطر دینامیکی بین در تمامی ابزارها ۵ میلی‌متر و ارتفاع آن $4/8$ میلی‌متر می‌باشد. ابزارها پس از ماشین‌کاری تحت عملیات حرارتی برای سخت‌کاری قرار گرفتند. سختی ابزارها در حدود 52 ± 2 راکول سی بود. شکل ۲ تصویر برخی از ابزارهای جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



(ج)



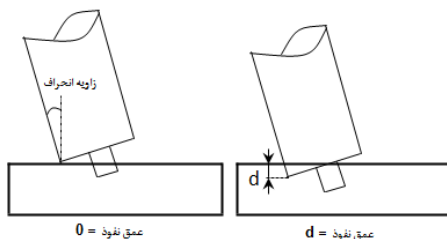
(ب)



(الف)

شکل ۲. (الف) ابزار رزوه‌دار T۱، (ب) ابزار مربعی T۲ (ج) ابزار مثلثی مخروطی (هرم ناقص) T۴.

زاویه انحراف ابزار ثابت و در تمامی آزمون‌ها ۳ درجه بوده است. عمق نفوذ ابزار از نقطه تماس شانته ابزار با سطح قطعه کار اندازه‌گیری شده است (شکل ۳). عمق نفوذ ثابت و در تمامی آزمون‌ها $0/5$ میلی‌متر بوده است.



شکل ۳. تصویر کلی از عمق نفوذ ابزار.

برای تهیه نمونه‌های متالوگرافی، نمونه‌هایی به طول ۱۵ میلی‌متر در راستای عمود بر خط جوش از قطعات جوشکاری شده بریده شد. مقطع نمونه‌ها با مش‌های ۸۰۰ تا ۵۰۰۰ سنباده‌زنی شده سپس پولیش شده‌اند و با محلول حکاکی کلر به مدت زمان ۱۱۰ ثانیه حکاکی شده‌اند. برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ برابر استفاده شده است.

ریزسختی (ویکرز) نمونه‌های جوشکاری شده در امتداد سطح مقطع عمود بر مسیر فرایند و در فاصله ۲ میلی‌متری از سطح نمونه اندازه‌گیری شده است. بار اعمال شده ۲۰۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۱۵ ثانیه بوده است. برای رسم منحنی توزیع سختی ویکرز، آزمایش ریزسختی‌سنجی در نقاطی به فاصله ۰/۲۵ میلی‌متر تکرار شده است.

نتایج و بحث

ویژگی‌های ظاهری جوش

در جدول ۲ پارامترهای جوشکاری اعمال شده و ابزار استفاده شده برای ۲۰ نمونه جوش شده به همراه خواص ظاهری آن‌ها به صورت خلاصه آمده است. عمق نفوذ و زمان توقف ابزار در عمق نفوذ نهایی قبل از اعمال سرعت پیش‌روی به ترتیب ۰/۶ میلی‌متر و ۲۰ ثانیه بوده است.

جدول ۲. پارامترهای فرایندی به همراه عیوب و کیفیت سطح در نمونه‌های مختلف جوش.

ماده نمونه	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	شکل ابزار	عیب حفره تونلی	کیفیت سطح
۱	۵۰۰	۱۰۰	T۱	بدون عیب	عالی
۲	۵۰۰	۵۰	T۱	بدون عیب	عالی
۳	۵۰۰	۱۶۰	T۱	بدون عیب	عالی
۴	۵۰۰	۲۰۰	T۱	بدون عیب	عالی
۵	۵۰۰	۲۵۰	T۱	بدون عیب	عالی
۶	۵۰۰	۳۱۵	T۱	بدون عیب	عالی
۷	۵۰۰	۴۰۰	T۱	بدون عیب	خوب
۸	۵۰۰	۵۰۰	T۱	بدون عیب	خوب
۹	۶۳۰	۵۰۰	T۱	بدون عیب	خوب

ماده نمونه	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	شکل ابزار	عیب حفزه تونلی	کیفیت سطح
۱۰	۶۳۰	۶۳۰	T1	بدون عیب	خوب
۱۱	۳۱۵	۲۰۰	T1	بدون عیب	عالی
۱۲	۳۱۵	۲۵۰	T1	بدون عیب	خوب
۱۳	۳۱۵	۳۱۵	T1	بدون عیب	خوب
۱۴	۵۰۰	۳۱۵	T2	بدون عیب	عالی
۱۵	۵۰۰	۴۰۰	T2	حفزه در ریشه	خوب
۱۶	۵۰۰	۵۰۰	T2	حفزه در ریشه	خوب
۱۷	۵۰۰	۳۱۵	T3	عیب نزدیک ریشه	-
۱۸	۵۰۰	۲۵۰	T4	بدون عیب	عالی
۱۹	۵۰۰	۳۱۵	T4	حفزه در ریشه	خوب
۲۰	۵۰۰	۴۰۰	T4	عیب نزدیک ریشه	-

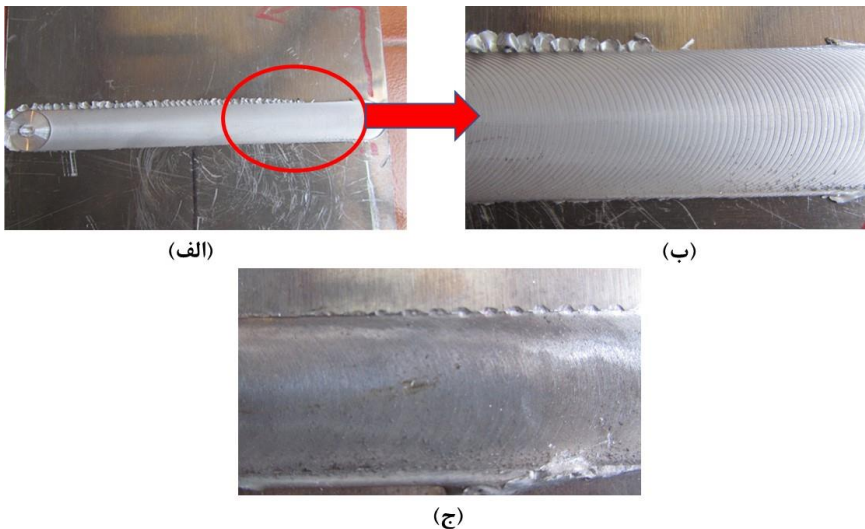
در این جدول ابزار رزوه‌دار با T1، ابزار مربعی با T2، ابزار مثلثی با T3 و ابزار مثلثی مخروطی (هرم ناقص) با T4 نمایش داده شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود ابتدا عملیات جوشکاری با سرعت‌های پیشروی پایین انجام گرفته و رفته‌رفته سرعت‌های پیشروی بالاتر برای نمونه‌های بعدی اعمال شده است. برای سرعت‌های دورانی ۳۱۵، ۵۰۰ و ۶۳۰ دور بر دقیقه بالاترین سرعت پیشروی به ترتیب ۳۱۵، ۵۰۰ و ۶۳۰ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. در سرعت‌های پیشروی بالاتر فشار بسیار زیادی به ابزار و ماشین وارد شده و در نهایت ابزار دچار شکست در قسمت پین شد. از ابزار با پین رزوه‌دار ۴ (T1) عدد ساخته شده بود که دو ابزار در اثر اعمال سرعت پیشروی بالا دچار شکست از ناحیه اتصال پین به شانه شدند. یکی از اهداف در این پژوهش، تعیین حداکثر سرعت پیشروی ممکن بوده است تا بتوان سرعت تولید را بالا برد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین سرعت پیشروی ابزار (تولید جوش سالم) ۶۳۰ میلی‌متر بر دقیقه است که در سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه حاصل شده است. همچنین می‌توان با افزایش سرعت دورانی، سرعت پیشروی را افزایش داد اما به‌منظور ممانعت از استهلاک ماشین، سرعت چرخش در تا ۶۳۰ دور بر دقیقه محدود شد. کیفیت سطحی جوش با افزایش سرعت پیشروی کاهش می‌یابد اما با این وجود برای تمامی نمونه‌ها قابل قبول است. در صورت استفاده از سرعت‌های پیشروی حداکثر می‌توان با اعمال یک پاس سنباده دستی یا ماشینی، کیفیت سطح را به‌منظور افزایش عمر خستگی جوش بهبود بخشید.

برای سایر ابزارها سرعت‌های پیشروی بالا مورد استفاده قرار گرفت و از اعمال سرعت‌های پیشروی پایین (۵۰-۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) خودداری شد. جوش‌های تولیدشده با استفاده از سه ابزار باقیمانده همگی در سرعت‌های دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه بوده است.

ابزار مربعی (T2) نمونه‌های سالمی حتی در سرعت پیشروی ۵۰۰ دور بر دقیقه به دست می‌دهد و به لحاظ کیفیت ظاهری جوش رفتاری مشابه ابزار رزوه‌دار دارد. با اعمال سرعت پیشروی ۶۳۰ میلی‌متر بر دقیقه در همان سرعت دورانی (۵۰۰ دور بر دقیقه) ابزار پس از طی ۲۰۰ میلی‌متر دچار شکست در ناحیه اتصال پین به شانه شد. ابزار مثلثی (T3) حتی در سرعت پیشروی ۳۱۵ میلی‌متر بر دقیقه نیز نمونه بدون عیب تولید نکرد و پس از حدود ۳۰۰ میلی‌متر جوشکاری دچار شکست شد. ابزار مثلثی مخروطی (T4) بهتر از ابزار مثلثی ساده عمل کرد و عمر طولانی‌تری داشت. این ابزار در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه تا سرعت پیشروی ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه نمونه سالم

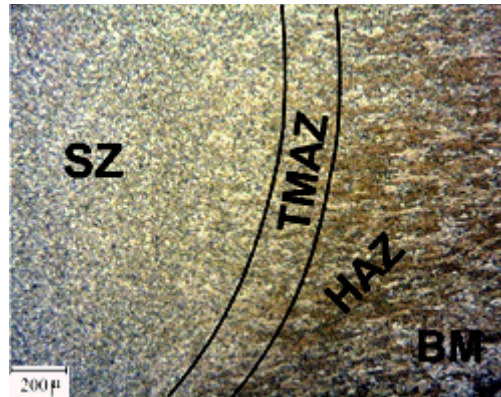
تولید می‌کند اما عمر آن کمتر از ابزار مربعی و رزوه‌دار است. این امر به دلیل کاهش نیروی وارد شده به ابزار در اثر کاهش حجم ماده جاروب‌شده توسط پین می‌باشد.

شکل ۴ کیفیت سطحی جوش‌های تولیدشده را نشان می‌دهد. سطح نمونه جوشکاری‌شده با ابزار $T1$ در سرعت‌های دورانی و پیش‌روی 500 دور بر دقیقه و 500 میلی‌متر بر دقیقه در شکل ۴-الف نشان داده شده و بخشی از شکل با بزرگنمایی بالاتری در شکل ۴-ب نمایش داده شده است. گام‌های پیش‌روی ابزار به‌وضوح در شکل قابل مشاهده است. سطح نمونه جوشکاری‌شده در سرعت‌های دورانی و پیش‌روی 500 دور بر دقیقه و 50 میلی‌متر بر دقیقه در شکل ۴-ج نشان داده شده است. به‌وضوح مشخص است که با افزایش سرعت پیش‌روی در یک سرعت دورانی ثابت، یا به‌عبارتی با کاهش نسبت سرعت دورانی به پیش‌روی (w/v)، گام‌های حرکتی ابزار روی قطعه کار بزرگ‌تر می‌شود و کیفیت سطحی را کاهش می‌دهد. در سرعت‌های پیش‌روی پایین (w/v بالا) گام‌ها به هم پیوسته می‌باشد و سطح قطعه یکنواخت به نظر می‌رسد.



شکل ۴. (الف) سطح نمونه جوشکاری شده با ابزار $T1$ در سرعت‌های دورانی و پیش‌روی 500 دور بر دقیقه و 500 میلی‌متر بر دقیقه، (ب) بزرگ‌نمایی از ناحیه نشان داده‌شده در ۷-۱ الف و (ج) سطح نمونه جوشکاری شده با ابزار $T1$ در سرعت‌های دورانی و پیش‌روی 500 دور بر دقیقه و 50 میلی‌متر بر دقیقه.

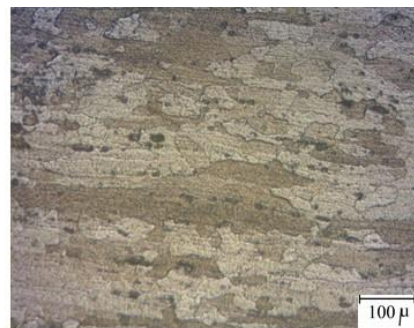
شکل ۵ ریزساختار حاصل از انجام جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی با ابزار $T1$ و سرعت‌های دورانی و پیش‌روی 500 دور بر دقیقه و 100 میلی‌متر بر دقیقه روی آلومینیوم 5083 نشان می‌دهد. در این شکل، چهار ناحیه اغتشاشی، متأثر ترمو مکانیکی، ناحیه متأثر از حرارت و ماده پایه دیده می‌شود. اندازه متوسط دانه در ماده پایه 25 میکرون است. در ناحیه اغتشاشی، اندازه دانه به حدود 5 میکرون رسیده است. در اثر تبلور مجدد دینامیکی که به دنبال تغییر شکل پلاستیکی شدید در ناحیه اغتشاشی اتفاق افتاده، دانه‌ها در این ناحیه به‌شدت ریز و همگن شده‌اند و ریزساختار ایجادشده، یکنواخت است. شکل ۶ ریزساختار ماده پایه و ناحیه اغتشاشی را به‌صورت تفکیکی نشان می‌دهد.



شکل ۵. ریزساختار ناحیه‌های اغتشاشی، متأثر ترمومکانیکی، متأثر حرارتی و فلز پایه.



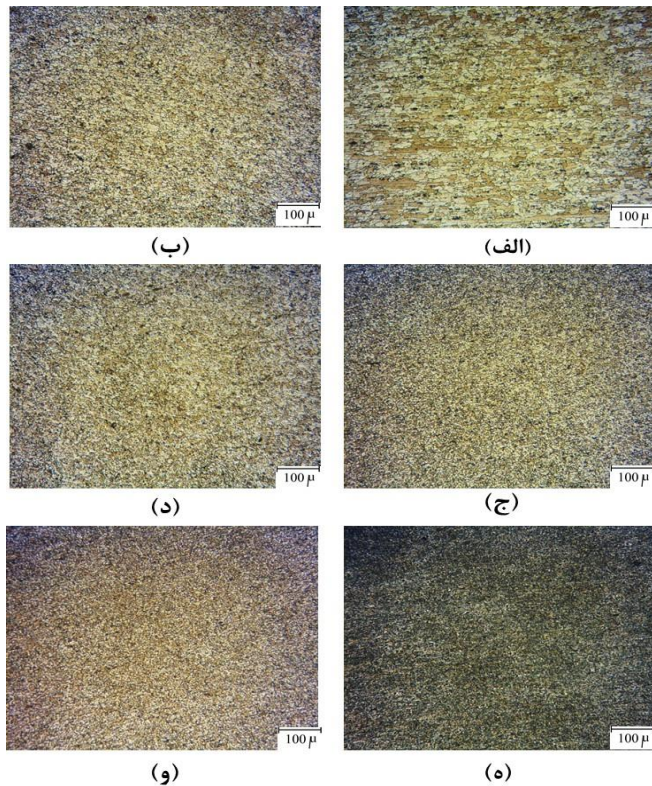
(ب)



(الف)

شکل ۶. ریزساختار فلز پایه، (الف) ریزساختار ناحیه اغتشاشی.

شکل ۷ ریزساختار ناحیه اغتشاشی برای نمونه‌های تولید شده با ابزار رزوه‌دار در سرعت‌های پیشروی مختلف را نمایش می‌دهد. مشخص است که با افزایش سرعت پیش‌روی به دلیل کاهش گرمای ورودی، رشد دانه پس از مرحله تبلور مجدد، محدود می‌شود و اندازه دانه نهایی کاهش می‌یابد.



شکل ۷. ریزساختار ناحیه اغتشاشی برای نمونه جوشکاری شده با ابزار رزوه‌دار در سرعت پیش‌روی (الف) ۵۰، (ب) ۱۶۰، (ج) ۲۰۰، (د) ۲۵۰، (ه) ۴۰۰ و (و) ۵۰۰ میلی‌متر در دقیقه. سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه.

برای سرعت‌های دورانی ۳۵۰ تا ۶۳۰ دور بر دقیقه نیز ریزساختار حاصل از جوش، اندازه دانه متفاوتی دارد؛ به طوری که با افزایش سرعت دورانی به دلیل افزایش گرمای ورودی، رشد دانه‌ها پس از تبلور مجدد شدت می‌یابد و در نهایت اندازه دانه افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان گفت در نسبت‌های کمتر از سرعت دورانی به سرعت پیش‌روی (W/V)، اندازه دانه، ریزتر خواهد شد. تغییر اندازه دانه، اثر مستقیمی بر خواص مکانیکی ماده از جمله استحکام کششی و سختی دارد. ریزساختار ایجاد شده توسط ابزارهای رزوه‌دار و مربعی در سرعت‌های دورانی و پیش‌روی یکسان، بسیار نزدیک به هم هستند و تفاوت اساسی آن‌ها در قابلیت ایجاد جوش بی‌عیب است.

عیوب جوشکاری

در این بخش به بررسی عیوب ایجاد شده در جوش‌ها می‌پردازیم. همان‌طور که مشخص است این عیوب در سرعت‌های پیش‌روی بالا (۵۰۰ و ۶۳۰ میلی‌متر در دقیقه) ایجاد شده‌اند. نمونه‌هایی که با سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه، جوشکاری شده‌اند در سرعت‌های پیش‌روی ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و پایین‌تر همگی بی‌عیب هستند و نمونه‌هایی که با سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه جوشکاری شده‌اند در سرعت‌های پیش‌روی ۳۱۵ میلی‌متر بر دقیقه و پایین‌تر

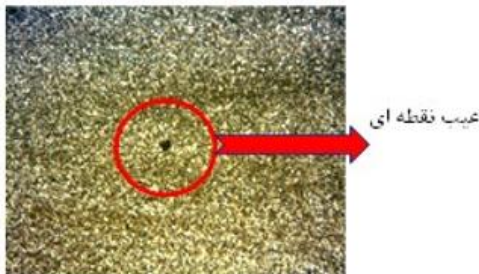
بدون عیب تولید شده‌اند. این عیوب از نوع عیب بقایای خط جوش^۱ (WLR) یا همان عیب نیامد هستند [۱۹] و عیب حفره تونلی^۲ حتی در سرعت پیش‌روی ۶۳۰ دور بر دقیقه برای نمونه‌های با ابزار رزوه‌دار ایجاد نشده است. عیب WLR در اثر سرعت پایین ماده در حال جریان و در سمت پیشرو اتفاق می‌افتد. طبق مطالعات ناندان و همکارانش [۲۰] اگر سرعت حرکت ماده در ناحیه اغتشاشی از مقدار بحرانی کمتر باشد، ماده در ناحیه پشت پیشرو به هم نمی‌رسد و باعث ایجاد عیب WLR می‌شود. البته عیب WLR جز در بحث خستگی، اثر چندانی بر دیگر خواص مکانیکی فلز جوش ندارد [۱۹؛ ۲۱]. با در نظر گرفتن نمونه‌های معیوب، نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش‌روی (w/v) برای کمترین سرعت پیش‌روی که عیب ایجاد می‌کند، به ترتیب زیر حاصل می‌گردد:

$$w/v=500/400=1.25 \text{ برای سرعت دورانی } 500 \text{ دور بر دقیقه} \quad (۱)$$

$$w/v=630/500=1.26 \text{ برای سرعت دورانی } 630 \text{ دور بر دقیقه} \quad (۲)$$

به نظر می‌رسد برای ابزار رزوه‌دار (با ابعاد هندسی مشخص استفاده شده در این پژوهش) برای ایجاد جوش سالم باید نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش‌روی بالاتر از حدود ۱/۲۵ باشد.

عیوب ایجاد شده در نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار مربعی بیشتر از نمونه‌های با ابزار رزوه‌دار در سرعت‌های مشابه هستند. شکل ۸-الف عیوب حفره نقطه‌ای ایجاد شده در نمونه جوشکاری شده با سرعت پیش‌روی ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. عیب حفره تونلی در سمت پیش‌رو و در قسمت پایین ناحیه اغتشاشی ظاهر شده است. ولی در داخل ناحیه اغتشاشی نیز عیوب حفره‌ای ریز مشاهده می‌شود [۲۲؛ ۲۳].



شکل ۸. عیب نقطه‌ای در نمونه جوشکاری شده با ابزار مربعی. سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیش‌روی ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه.

به‌طور مشابه شکل ۹ عیوب ایجاد شده در نمونه جوشکاری شده با ابزار مربعی در سرعت‌های دورانی و پیش‌روی ۵۰۰ دور در دقیقه و ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با کاهش سرعت پیش‌روی و در واقع افزایش نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش‌روی حجم عیوب در جوش کاهش یافته است.

¹ Weld line Remanent

² Tunnel defect



شکل ۹. (الف) و (ب) عیوب WLR و حفره تونلی در نمونه جوشکاری شده با ابزار مربعی. سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه.

با در نظر گرفتن نمونه‌های معیوب، نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی (w/v) برای کمترین سرعت پیشروی که عیب ایجاد می‌کند، به ترتیب زیر به دست می‌آید:

$$w/v=500/315=1.58 \quad \text{برای سرعت دورانی } 500 \text{ دور بر دقیقه} \quad (۳)$$

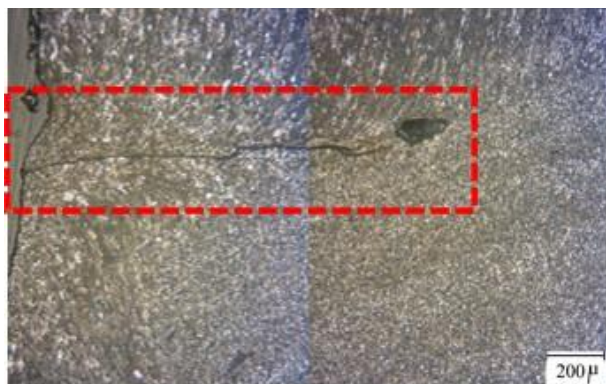
$$w/v=710/400=1.775 \quad \text{برای سرعت دورانی } 710 \text{ دور بر دقیقه} \quad (۴)$$

$$w/v=900/500=1.8 \quad \text{برای سرعت دورانی } 900 \text{ دور بر دقیقه} \quad (۵)$$

$$w/v=1120/630=1.778 \quad \text{برای سرعت دورانی } 1120 \text{ دور بر دقیقه} \quad (۶)$$

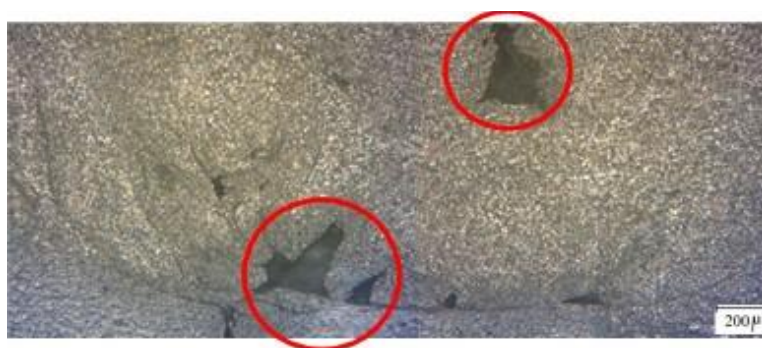
به نظر می‌رسد با ابزار مربعی (به ابعاد هندسی مشخص استفاده شده در این مقاله) برای ایجاد جوش سالم باید نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی از حدود $1/8$ بالاتر باشد.

برای ابزار مثلثی، شرایط بدتر از ابزار رزوه‌دار و مربعی است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، ابزار مثلثی در سرعت پیشروی ۳۱۵ میلی‌متر بر دقیقه نیز نتوانست نمونه جوشی تولید کند و دچار شکست شد. برای ابزار مثلثی مخروطی ($T4$) در نمونه جوش عیب حفره تونلی و WLR ایجاد شد که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰. عیوب WLR (عدم اتصال دو جریان ماده) در قسمت پاشنه جوش در سمت پیش رو به همراه عیب تونلی در نمونه با ابزار مثلثی مخروطی. سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه و سرعت پیش روی ۶۳۰ میلی متر بر دقیقه.

با افزایش سرعت پیش روی به ۲۵۰ میلی متر بر دقیقه عیوب ایجاد شده در نمونه جوشکاری شده با ابزار مثلثی مخروطی، بیشتر و اندازه آن‌ها نیز بزرگتر می‌شود. این امر را به وضوح در شکل ۱۱ می‌توان مشاهده کرد.



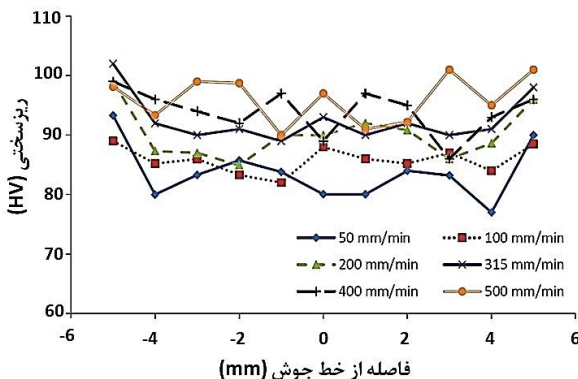
شکل ۱۱. عیب حفره تونلی در نمونه با ابزار مثلثی مخروطی و سرعت پیش روی ۲۵۰ میلی متر بر دقیقه.

به طور کلی می‌توان گفت ابزارهای مثلثی ساده و مثلثی مخروطی ($T3$, $T4$) ابزارهای ضعیفی بوده و سرعت‌های پیش روی پایینی می‌توانند تحمل کنند و عمر آن‌ها کمتر از ابزارهای مربعی و رزوه دار است. از لحاظ عیوب جوش نیز ابزارهای مثلثی ساده و مثلثی مخروطی عیب بیشتری ایجاد می‌کنند و این پدیده در سرعت‌های پیش روی پایین نیز برای آن‌ها اتفاق می‌افتد. ولی برای ابزار مربعی عیب حفره تونلی در سرعت‌های پیش روی بالا اتفاق می‌افتد که به دلیل کاهش نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش روی (W/V)، سرعت نسبی جریان ماده کاهش می‌یابد و در پشت ابزار در قسمت پایین سمت پیش رو مواد به هم نمی‌رسند که نتیجه آن ایجاد عیب در این ناحیه است. به نظر می‌رسد ابزار رزوه دار هم به لحاظ عمر ابزار و هم به لحاظ سالم بودن جوش، از دیگر ابزارها بهتر عمل می‌کند. این ابزار به دلیل داشتن هسته استوانه‌ای، در محل اتصال پین به شانه تمرکز تنش ایجاد نمی‌کند (برخلاف ابزارهای لبه دار مربعی و مثلثی) و در نتیجه عمر آن افزایش می‌یابد. از طرفی رزوه‌های آن جریان و سرعت کافی را به ماده ناحیه

اغتشاشی تحمیل می‌کند و احتمال ایجاد عیوبی مانند WLR و حفره تونلی را کاهش می‌دهد؛ به طوری که این ابزار در مقایسه با ابزار مربعی در سرعت‌های پیشروی بالاتری نیز می‌تواند جوش سالم تولید کند.

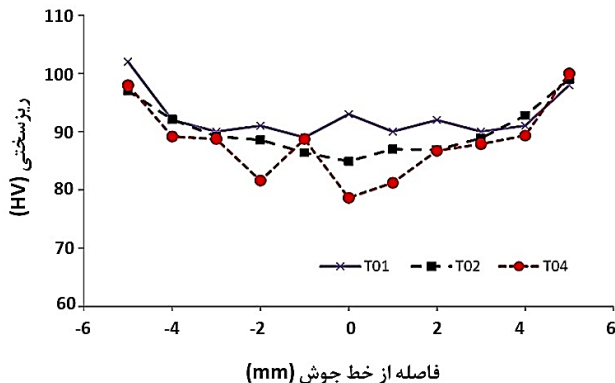
میکروسختی نمونه‌ها

برای بررسی تأثیر سرعت پیشروی بر سختی نمونه‌های جوشکاری شده بهتر است منحنی تغییرات سختی آن‌ها به صورت یک‌جا بررسی شود. شکل ۱۲ تغییرات سختی برای نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار رزوه‌دار در سرعت‌های پیشروی مختلف را نمایش می‌دهد. محور افقی، فاصله از خط جوش را نشان می‌دهد که عدد صفر بر مسیر جوش منطبق است و اعداد مثبت و منفی، فاصله نقطه انجام آزمایش سختی را در طرفین خط جوش نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در بین نمونه‌های جوشکاری شده نیز مقدار سختی متفاوت می‌باشد و کمترین میانگین سختی مقطع جوش مربوط به نمونه جوشکاری شده با پایین‌ترین سرعت پیشروی (۵۰ میلی‌متر در دقیقه) است. با افزایش سرعت پیشروی از ۵۰ به ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، مقدار سختی میانگین از حدود ۸۳ ویکرز به حدود ۹۶ ویکرز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش سرعت پیشروی میزان حرارت ورودی به فلز جوش کاهش می‌یابد که این امر هم رشد دانه و هم حل شدن نابه‌جایی‌ها را محدود می‌کند. مشخص است که هم ریزدانه شدن و هم افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها، مقدار سختی را افزایش خواهد داد. سرعت دورانی، عکس سرعت پیشروی عمل می‌کند؛ به طوری که با افزایش سرعت دورانی، میزان حرارت ورودی به فلز جوش افزایش می‌یابد که موجب کاهش سختی فلز جوش می‌شود. به‌طور کلی با در نظر گرفتن نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی (W/V) می‌توان گفت با افزایش این نسبت، میزان گرمای ورودی افزایش می‌یابد، رشد دانه شدیدتر می‌شود، چگالی نابه‌جایی‌ها کاهش و در نتیجه، سختی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲. منحنی‌های تغییرات سختی برای نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار رزوه‌دار در سرعت‌های پیشروی مختلف. سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و ابزار رزوه‌دار T1 می‌باشد.

منحنی تغییرات سختی سطح مقطع جوش برای نمونه‌های جوشکاری شده با ابزارهای رزوه‌دار، مربعی و مثلثی مخروطی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این جوش‌ها در سرعت‌های دورانی و پیشروی ۵۰۰ دور بر دقیقه و ۳۱۵ میلی‌متر بر دقیقه تولید شده‌اند. مقدار سختی میانگین ابزار رزوه‌دار بیشتر از دیگر ابزارهاست و نمونه جوشکاری شده با ابزار مثلثی هم مقدار میانگین پایین‌تری دارد و هم میزان تغییرات (نوسانات) سختی در آن بیشتر است. این امر به دلیل غیریکنواختی ریزساختار آن و وجود عیوب در مقطع جوش است.



شکل ۱۳. منحنی‌های تغییرات سختی برای نمونه‌های جوشکاری شده با ابزارهای رزوه‌دار T1، مربعی T2 و مثلثی مخروطی T4. سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیش‌روی ۳۱۵ میلی‌متر بر دقیقه.

جمع‌بندی

در این مقاله، تأثیرات پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص و عیوب تشکیل‌شده اتصال دو صفحه آلومینیومی ۵۰۸۳ بررسی شده است. پارامترهای شکل ابزار، سرعت دورانی و سرعت پیش‌روی به‌عنوان پارامترهای اصلی در تولید اتصالات بررسی شدند و نتایج زیر به‌صورت خلاصه حاصل گردید:

- اگرچه در نسبت سرعت دورانی به پیش‌روی ۱ نیز عیب حفره تونلی برای نمونه‌های تولید شده با ابزار رزوه‌دار ایجاد نشد اما برای ایجاد جوش سالم و بدون عیب نیامد باید نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش‌روی بالاتر از حدود ۱/۲۵ برای ابزار رزوه‌دار (با ابعاد هندسی مشخص استفاده شده در این پژوهش) باشد.
- عیوب ایجاد شده در نمونه‌های جوشکاری‌شده با ابزار مربعی بیشتر از نمونه‌های با ابزار رزوه‌دار در سرعت‌های مشابه است؛ به‌طوری که در نسبت سرعت دورانی به پیش‌روی ۱ نیز عیب حفره تونلی در سمت پیش‌رو و در قسمت پایین ناحیه اغتشاشی ظاهر شده است و در داخل ناحیه اغتشاشی نیز عیوب حفره‌ای ریز مشاهده گردید. برای ایجاد جوش سالم (بدون حتی عیب نیامد) باید نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش‌روی در ابزار مربعی بالاتر از حدود ۱/۸ باشد.
- از لحاظ عیوب جوش ابزارهای مثلثی ساده و مثلثی مخروطی عیب بیشتری ایجاد می‌کنند و این پدیده در سرعت‌های پیش‌روی پایین نیز برای آن‌ها اتفاق می‌افتد. برای ابزار مثلثی مخروطی حتی در نسبت سرعت دورانی به پیش‌روی ۲/۵ نیز در نمونه جوش عیوب حفره تونلی و نیامد مشاهده شد.
- با افزایش سرعت پیش‌روی، سختی در ناحیه اغتشاشی افزایش می‌یابد و متوسط سختی در ناحیه اغتشاشی برای ابزار رزوه‌دار بیشترین مقدار (حدود ۹۵ ویکرز) و برای ابزار مثلثی کمترین مقدار (حدود ۸۵ ویکرز) می‌باشد.

References

- [1] Huang, B., Wang, L., Hui, L., Cong, J., & Zhou, S. (2022). Analysis of Multi-zone Fatigue Crack Growth Behavior of Friction Stir Welded 5083 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(1), 53-63. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06191-4>

- [2] Rudra, A., Ashiq, M., Tiwari, J. K., Das, S., & Dasgupta, R. (2020). Study of Processing Map and Effect of Hot Rolling on Mechanical Properties of Aluminum 5083 Alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(7), 1809-1826. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02003-w>
- [3] Sinhmar, S., & Dwivedi, D. K. (2020). Mechanical behavior of FSW joint welded by a novel designed stationary shoulder tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 277, 116482. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116482>
- [4] Akbari, M., Shojaeefard, M. H., Asadi, P., & Khalkhali, A. (2017). Wear Performance of A356 Matrix Composites Reinforced with Different Types of Reinforcing Particles. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(9), 4297-4310. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2901-6>
- [5] Moreto, J. A., Dos Santos, M. S., Ferreira, M. O. A., Carvalho, G. S., Gelamo, R. V., Aoki, I. V., Taryba, M., Bose Filho, W. W., & Fernandes, J. C. S. (2021). Corrosion and corrosion-fatigue synergism on the base metal and nugget zone of the 2524-T3 Al alloy joined by FSW process. *Corrosion Science*, 182, 109253. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109253>
- [6] Abbasi, M., Bagheri, B., Abdollahzadeh, A., & Moghaddam, A. O. (2021). A different attempt to improve the formability of aluminum tailor welded blanks (TWB) produced by the FSW. *International Journal of Material Forming*, 14(5), 1189-1208. <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01632-w>
- [7] Akbari, M., Khalkhali, A., Keshavarz, S. M. E., & Sarikhani, E. (2018). The effect of in-process cooling conditions on temperature, force, wear resistance, microstructural, and mechanical properties of friction stir processed A356. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 232(5), 429-437. <https://doi.org/10.1177/1464420716630569>
- [8] Jacquin, D., & Guillemot, G. (2021). A review of microstructural changes occurring during FSW in aluminium alloys and their modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 288(5-8), 116706. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116706>
- [9] Taban, E., & Kaluc, E. (2006). Microstructural and mechanical properties of double-sided MIG, TIG and friction stir welded 5083-H321 aluminium alloy. *Kovove Materialy*, 44(1), 25-33. <http://www.kovmat.sav.sk/full.php?rr=44&cc=1&ss=25>
- [10] Fujii, H., Cui, L., Maeda, M., & Nogi, K. (2006). Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 419(1), 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.11.045>
- [11] Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M., & Withers, P. J. (2003). Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. *Acta Mater*, 51(16), 4791-4801. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00319-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00319-7)
- [12] Czechowski, M. (2005). Low-cycle fatigue of friction stir welded Al-Mg alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165(1), 1001-1006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.078>
- [13] Hirata, T., Oguri, T., Hagino, H., Tanaka, T., Chung, S. W., Takigawa, Y., & Higashi, K. (2007). Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 456(1), 344-349. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.079>
- [14] Akbari, M., & Asadi, P. (2020). Dissimilar friction stir lap welding of aluminum to brass: Modeling of material mixing using coupled Eulerian-Lagrangian method with experimental verifications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*,

- Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 234(8), 1117-1128. <https://doi.org/10.1177/1464420720922560>
- [15] Akbari, M., Asadi, P., & Behnagh, R. A. (2021). Modeling of material flow in dissimilar friction stir lap welding of aluminum and brass using coupled Eulerian and Lagrangian method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(3), 721-734. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06541-x>
- [16] Bala Chennaiah, M., Kumar, K., & Sridhar, V. (2021). Influence of tool profiles on similar Al-5083 alloys using friction stir welding. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8032-8037. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.787>
- [17] Saravana Kumar, R., Rajasekaran, T., Singh, S. D., Kumar, S., Mishra, P., Shrivastav, P., & Ravishankar, S. (2020, February 24-29). *Optimization of FSW Parameters to Improve the Mechanical and Metallurgical Properties of Aluminium Alloy AA 5083 Joints*. 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering, SRMIST Kattankulathur, India. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/912/3/032029>
- [18] Chander, M. S., Ramakrishna, M., & Durgaprasad, B. (2021). Experimental investigation on temperature distribution during solid state joining of 5083 aluminium alloy. *Materials Today: Proceedings*, 39(2), 240-244. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.037>
- [19] Dialami, N., Cervera, M., Chiumenti, M., & Segatori, A. (2019). Prediction of joint line remnant defect in friction stir welding. *International Journal of Mechanical Sciences*, 151, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.012>
- [20] Nandan, R., Roy, G. G., & Debroy, T. (2006). Numerical simulation of three-dimensional heat transfer and plastic flow during friction stir welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(4), 1247-1259. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-1076-9>
- [21] Threadgill, P. L. (2007). Terminology in friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(4), 357-360. <https://doi.org/10.1179/174329307X197629>
- [22] Asadi Borojeni, B., & Mozafari Vanani, L. (2020). The effect of tool geometry on the tensile strength of polypropylene Components Welded by Friction Stir Welding Method. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 133-145. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112761>
- [23] Ghasemi Tamami, P., Javadimanesh, A., & Mardani, S. (2021). Investigation and optimization of friction stir welding process of aluminum 5010 to 6061. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 281-311. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128408>