



بررسی تجربی اثر ارتعاش آلتراسونیک بر خواص مکانیکی ورق‌های ABS جوش داده شده با فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

مجتبی نادرنژاد موزیرجی¹، مجید الیاسی^{2*}، مرتضی حسین زاده³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، ساری

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آیت الله آملی، آمل

* بابل، صندوق پستی 484، elyasi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 04 آبان 1394
پذیرش: 14 آذر 1394
ارائه در سایت: 16 دی 1394

کلید واژگان:

ارتعاشات آلتراسونیک
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
ترموپلاستیک
بهینه‌سازی

چکیده

مقدارهای استحکام کششی و سختی منطقه‌های مختلف اتصال جوش شده از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش از یک روش ترکیبی شامل فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری آلتراسونیک برای اتصال لب به لب ورق‌های پلاستیکی از نوع ABS استفاده شده است. بدین منظور ارتعاشات آلتراسونیک عرضی به ابزار در حال چرخش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اعمال می‌گردد و سپس اثر متغیرهایی مانند ارتعاشات آلتراسونیک، سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی و قطر شانه ابزار بر استحکام کششی و سختی نمونه‌های جوش داده شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح مربوط به هر یک، از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای انجام آزمایشات استفاده شده و آرایه L18 انتخاب گردید. همچنین اثر پارامترها، به صورت اثر مستقل و متقابل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اعمال ارتعاشات آلتراسونیک بطور قابل توجهی استحکام کششی و سختی خط جوش را بهبود می‌بخشد. پس از ارتعاشات آلتراسونیک، سرعت چرخش ابزار، قطر شانه ابزار و سرعت پیشروی به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها بر استحکام کششی و سختی بودند. پس از بررسی اثر پارامترها بر خواص مکانیکی، از روش گری برای بهینه‌سازی و یافتن بهترین ترکیب پارامترها جهت دستیابی به بیشترین استحکام کششی و سختی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی نشان داد که جوشکاری با اعمال ارتعاش آلتراسونیک، سرعت چرخشی 1200 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 60 میلی‌متر بر دقیقه و قطر شانه ابزار 22 میلی‌متر سبب رسیدن به بیشترین سختی و استحکام کششی اتصال بطور همزمان خواهد شد.

Experimental study on effects of ultrasonic vibration on tensile strength and hardness of friction stir welded ABS sheets

Mojtaba Nadernejad Moziraji¹, Majid Elyasi^{2*}, Morteza Hosseinzadeh³

1- Department of Mechanical Engineering, Sari branch, Islamic Azad University, Sari, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Ayatollah Amoli branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

* P.O.B. 484, Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 October 2015
Accepted 05 December 2015
Available Online 06 January 2016

Keywords:
US Vibration
Friction Stir Welding
Thermoplastic
Optimization

ABSTRACT

Values of tensile strength and hardness of different welding joint area has great importance. In this study a combination of welding processes including Friction Stir Welding (FSW) and ultrasonic welding has been used in butt joint for ABS type plastic sheets. Ultrasonic vibrations are put on FSW rotary tool, then some parameter effects such as tool rotary speed, travel speed and tool shoulder diameter on tensile strength and hardness of welded samples have been studied. Taking parameter numbers and related levels for each into consideration, Taguchi method L18 array has been selected for performing experiments. Parameter effects has been studied separately. Results showed that ultrasonic vibration improves tensile strength and hardness of welded joint. After ultrasonic vibration, tool rotary speed, tool shoulder diameter and travel speed were the most effective parameters on tensile strength and hardness of joint respectively. Results from optimization with analysis method showed that ultrasonic vibration resulted in rotary speed of 1200 RPM, travel speed of 60 mm/min and tool shoulder diameter of 22 mm causes the highest hardness and tensile strength of joint simultaneously.

1- مقدمه

صنعتی و صنایع حمل و نقل افزایش یافته است [1]. هرچند پلاستیک‌ها قابلیت بالایی در طراحی و فرآیندها ارائه می‌دهند، اما ساخت قطعات بزرگتر و پیچیده معمولاً نیاز به فناوری‌های اتصال، مانند جوشکاری دارد [2].

در سال‌های اخیر انتخاب و توسعه مواد سبک وزن مانند پلاستیک‌ها، فلزات سبک و پلاستیک‌های تقویت شده با فیبر به طور گسترده‌ای در سازه‌های

Please cite this article using:

M. Nadernejad Moziraji, M. Elyasi, M. Hosseinzadeh, Experimental study on effects of ultrasonic vibration on tensile strength and hardness of friction stir welded ABS sheets, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 237-247, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استحکام کششی و کاهش اعوجاج زاویه‌ای و تنش پسماند خواهد شد. در سال‌های اخیر از ارتعاشات آلتراسونیک در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت بالابردن قابلیت جوشکاری استفاده شده است. در اثر اعمال ارتعاش، حرارت ایجاد شده در منطقه جوش بالا رفته و سبب بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

در این راستا امینی و امیری [8] با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به بررسی استحکام کششی، نیروهای ماشینکاری و همچنین توزیع حرارت در آلیاژ آلومینیوم 6061 پرداختند. آن‌ها نشان دادند که اعمال ارتعاش سبب کاهش نیروی ماشینکاری و بهبود استحکام کششی می‌گردد. به‌علاوه سطوحی که از اعمال ارتعاش به‌دست آمد دارای کیفیت بالاتری نسبت به حالت بدون ارتعاش بود. احمدنیا و همکاران [9] اثر توان ارتعاش آلتراسونیک و دیگر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر استحکام کششی، شکل‌پذیری، زبری سطح و نرخ سایش ورق آلیاژ آلومینیوم 6061 بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از روش تاگوچی تعداد 9 آزمایش را طراحی نمودند تا اثر پارامترها را مورد بررسی قرار دهند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اعمال ارتعاش به دلیل بهبود ریزساختار و اغتشاش سبب افزایش استحکام و شکل‌پذیری و همچنین کاهش زبری سطح و نرخ سایش دارد. رستمیان و همکاران [10] ارتعاش آلتراسونیک را به صورت عرضی به ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای اعمال نمودند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اعمال ارتعاش سبب بهبود ریزساختار شده است. آن‌ها همچنین نشان دادند ارتعاش آلتراسونیک، سرعت چرخش ابزار، زمان اغتشاش و عمق غوطه‌وری به ترتیب مؤثرترین پارامترها بر استحکام برشی و سختی می‌باشند. با توجه به تحقیقات پیشین، پژوهشی که به بررسی اثر ارتعاشات آلتراسونیک در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ترموپلاستیک‌ها پرداخته باشد تاکنون مشاهده نشده است. در این پژوهش جهت بهبود خواص مکانیکی جوش از اثر آلتراسونیک در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق ترموپلاستیکی ABS استفاده شده است. در ابتدا، با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، آرایه L18 برای تعیین ترکیب پارامترها انتخاب شد. سپس با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس به بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر میزان تغییرات استحکام کششی و سختی پرداخته شد. سرانجام با استفاده از روش بهینه‌سازی گری، بهترین مقدار هر پارامتر جهت حصول بیشترین استحکام کششی و سختی به‌دست آورده شد.

2- روش انجام آزمایش

جهت انجام آزمایش ورق‌های ترموپلاستیکی ABS، به ضخامت 10 میلی‌متر در اندازه‌های مورد نیاز (150×100 میلی‌متر) تهیه گردید. در جدول 1 خواص فیزیکی و مکانیکی ورق ABS مورد استفاده در این تحقیق آمده است. فرآیند جوشکاری توسط ابزارهای مصرف‌نشده از جنس فولاد پرکربن با قطر شانه 20، 18 و 22 میلی‌متر که دارای پین رزوه‌ای شکل بود، انجام شد. همچنین قطر پین ابزار 6 میلی‌متر انتخاب شد. شکل 2 عکس ابزارهای مورد استفاده را نشان می‌دهد. در این پژوهش از ماشین فرز عمودی مدل 4301 ساخت ماشین‌سازی تبریز با ماکزیمم دور 3000 دور بر دقیقه و توان 15 اسب بخار استفاده شد. دستگاه مولد ارتعاش آلتراسونیک مدل پی وی اس آ 1800² ساخته شده توسط شرکت پردیس ایران برای اعمال ارتعاش با فرکانس بالا در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده شده است. این دستگاه شامل یک هورن و منبع تغذیه با فرکانس 28 کیلو هرتز و دامنه

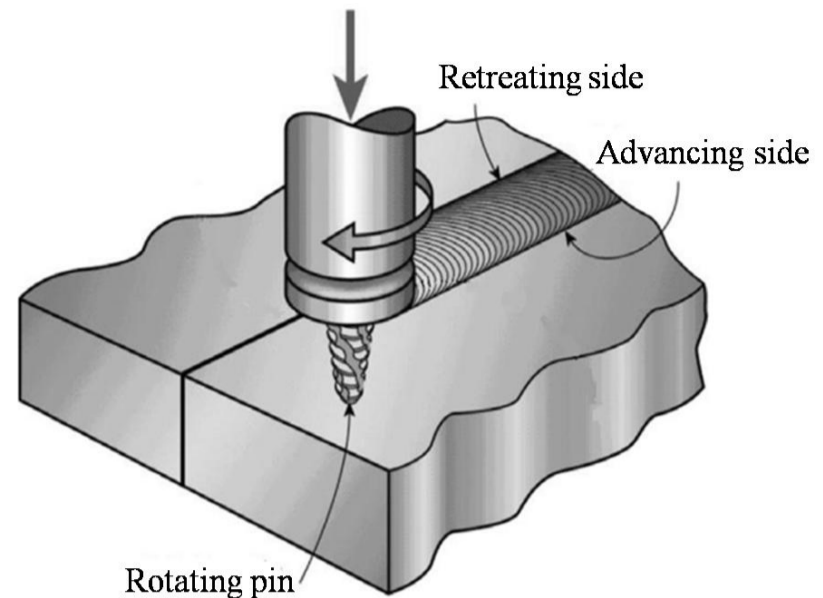


Fig. 1 A schematic figure of the friction stir welding process

شکل 1 نمایی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [5]

یکی از مشکلاتی که در مسیر استفاده از این نوع مواد وجود دارد قابلیت جوش‌پذیری آن‌ها با استفاده از روش‌های متداول جوشکاری می‌باشد. یکی از روش‌های جوشکاری که می‌توان با استفاده از آن مواد پلیمری هم‌جنس و حتی مواد غیر هم‌جنس را با هزینه پایین و بدون آثار مخرب ریزساختاری جوشکاری کرد، روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در مقایسه با دیگر روش‌های جوشکاری، یک فرآیند نوظهور در اتصالات دائم به شمار می‌رود. در این روش، جوشکاری توسط یک ابزار سخت مصرف‌نشده انجام می‌شود که معمولاً دارای یک بدنه استوانه‌ای شکل و پین می‌باشد [3]. در اثر اصطکاک ناشی از چرخش ابزار مصرف‌نشده (مقاوم در برابر سایش و حرارت)، حرارت لازم برای تغییر شکل مواد تولید می‌شود [4]. در شکل 1 نمای شماتیک این فرآیند نشان داده شده است.

مقاله‌های فراوانی وجود دارد که در آن تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در کیفیت جوش را مورد مطالعه قرار داده‌اند. باقری و همکاران [5] با استفاده از ابزار با شانه ثابت و پیشگرم کردن کفشک به جوشکاری ورق‌های ABS¹ پرداختند. آن‌ها در این پژوهش به بررسی اثر سرعت چرخش ابزار، پیشروی و دمای کفشک بر مقاومت کششی جوش پرداختند. نتایج نشان داد که سرعت چرخشی بالا، سرعت پیشروی کم و دمای زیاد کفشک سبب دستیابی به بیشترین استحکام کششی می‌گردد. همچنین مندوز و همکارانش [6] به بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ماکروساختار و استحکام کششی اتصال جوش شده ورق‌های پلیمری ABS پرداختند. آن‌ها یک ابزار با شانه مستطیلی طولانی و پین مخروطی را طراحی نمودند و برای جبران حرارت تولیدی، سرعت چرخشی ابزار را افزایش داده و نیروی محوری جوش را نیز بالا بردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش سرعت و نیروی دیگر نیازی به پیشگرم نیست. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت چرخش ابزار به دلیل بهبود اغتشاش مواد و حرارت بالایی که در اثر افزایش نیرو به وجود می‌آید، جوش‌هایی با استحکام بالاتر حاصل خواهد شد. ناطقی و حسین زاده [7] به کمک طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل واریانس و بهینه‌سازی به روش گری اثر استفاده از گاز خنک‌کننده CO₂ با دبی‌های مختلف را بر استحکام کششی، اعوجاج زاویه‌ای و تنش پسماند بررسی کردند. نمونه‌های آن‌ها از جنس پلی اتیلن چگالی بالا بود که به کمک روش جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی اتصال یافتند. آن‌ها دریافتند که استفاده از گاز خنک‌کننده با یک دبی مشخص منجر به افزایش

2- PVSA 1800

1- Acrylonitrile Butadiene Styrene

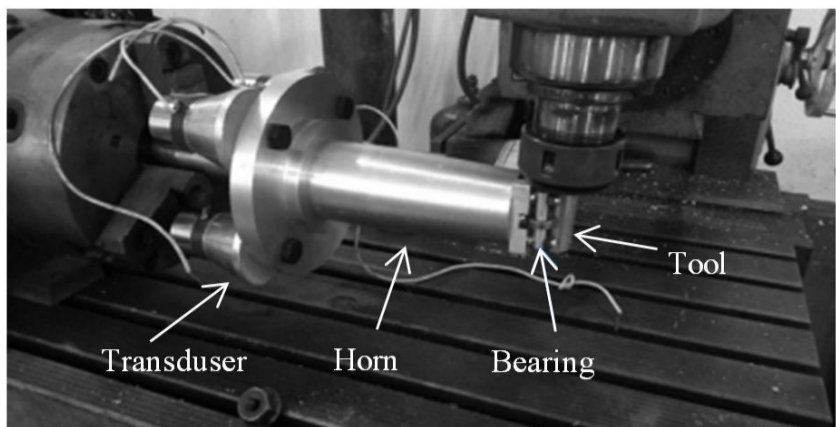


Fig. 3 Ultrasonic package mechanism and its appurtenances mounted on milling machine

شکل 3 مکانیزم پکیج آلتراسونیک و متعلقات نصب شده آن بر ماشین فرز

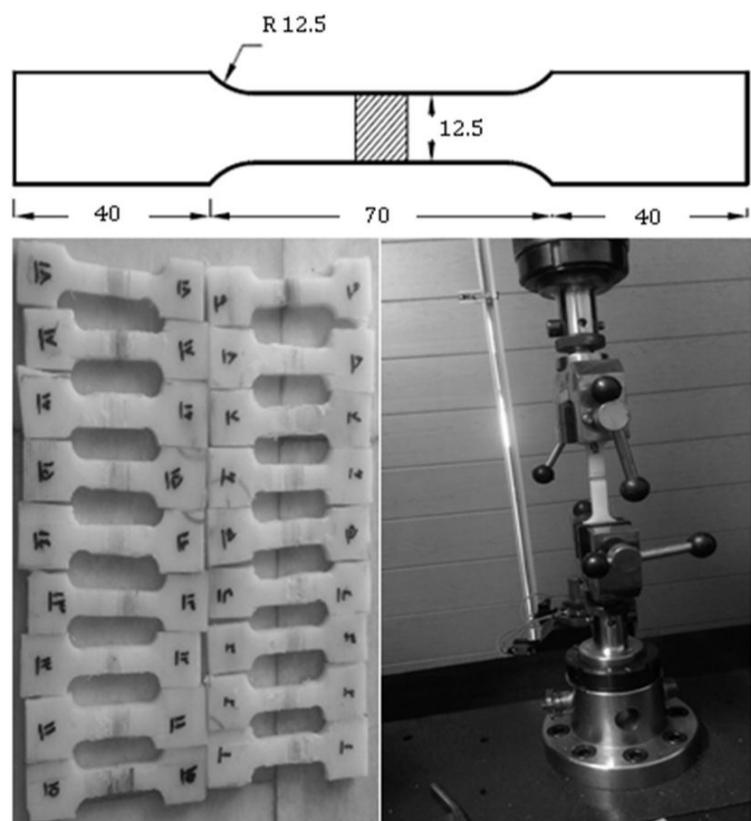


Fig. 4 Profile specimens and tensile test (dimentions to mm)

شکل 4 مشخصات نمونه‌ها و تست کشش (ابعاد به میلی‌متر است)

جدول 2 پارامترهای فرآیند و سطوح آن‌ها

Table 2 Process factors and their levels

پارامترهای فرآیند	نماد/واحد	سطح 1	سطح 2	سطح 3
ارتعاش آلتراسونیک	US	Without	With	-
سرعت چرخش ابزار	RPM)(N	400	800	1200
سرعت پیشروی	T(mm/min)	40	60	80
قطر شانه ابزار	d(mm)	18	20	22

به‌خاطر زیاد بودن تعداد آزمایش‌ها، آرایه متعامد مختلط $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ برای کمینه کردن تعداد آزمایش‌های تجربی انتخاب شد. جدول 3، آرایه طراحی همراه با مقادیر به‌دست آمده اندازه‌های عملکرد جوشکاری را نشان می‌دهد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر استحکام کششی

با توجه به آزمایش‌های انجام شده و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار مینی تب⁶، اثر پارامترهای فرآیند بر میزان تغییرات استحکام کششی مورد بررسی قرار می‌گیرد:

3-1-1- بررسی اثر ارتعاش آلتراسونیک

نمودار تأثیر ارتعاش آلتراسونیک بر استحکام کششی در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، با اعمال ارتعاش آلتراسونیک عرضی به ابزار میزان استحکام کششی تقریباً به اندازه 20 درصد افزایش می‌یابد.

6- Minitab

12 میکرون می‌باشد. شکل 3 تجهیزات جوشکاری نصب شده بر روی دستگاه فرز را نشان می‌دهد. برای انتقال ارتعاش آلتراسونیک از هورن به ابزار مورد استفاده، یک جفت غلتک در مقابل هورن نصب شد.

به منظور بررسی استحکام کششی جوش، نمونه‌های تست کشش، عمود بر خط جوش مطابق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی- 6381¹ آماده‌سازی شدند و سپس توسط ماشین تست سنتام اس‌تی‌ام-250² در سرعت خطی 2 میلی‌متر بر دقیقه و طول درجه ثابت 45 میلی‌متر مورد آزمون کشش قرار گرفت.

نمونه‌های آماده سازی شده برای انجام تست کشش و همچنین تصویر تست کشش در شکل 4 نشان داده شده است. همچنین جهت اندازه‌گیری سختی در منطقه جوش نمونه‌های جوشکاری شده، از معیار سختی سنچ شور دی³ استفاده شد. این معیار بیشتر برای اندازه‌گیری سختی پلاستیک بکار می‌رود. پیش از انجام آزمایش سختی، نمونه‌هایی از منطقه جوش به ابعاد 20×20 میلی‌متر بریده شد و سپس تحت آزمون سختی قرار گرفت. اندازه‌گیری سختی در منطقه جوش در پنج نقطه به صورت مشابه صورت گرفت و میانگین اندازه‌ها به‌عنوان عدد سختی هر آزمایش اعلام شد.

برای مشاهده جریان مواد و عیوب شکل گرفته در سطح مقطع جوش از یک دستگاه میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 10X استفاده شد. این دستگاه ساخت شرکت میتوتویو⁴ ژاپن بوده که به یک سیستم کامپیوتر نصب می‌شود تا با استفاده از آن بتوان تصاویر به‌دست آمده از سطح را ویرایش نمود. به منظور مشاهده میکروساختار سطح جوش، بعد از انجام جوشکاری سطح جوش توسط دستگاه پولیش، صیقل داده شده و با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی⁵ مورد پایش قرار گرفت. این دستگاه به یک نرم‌افزار پردازش تصویر مجهز می‌باشد که به وسیله آن می‌توان میزان تخلخل را در یک ابعاد مشخص (200 میکرومتر مربع در این پژوهش استفاده شد) به‌دست آورد. با توجه به منابع [10،9]، پارامترهایی انتخابی برای انجام آزمایش عبارتند از ارتعاش آلتراسونیک، سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و قطر شانه ابزار، جدول 2، پارامترهای فرآیند و سطوح‌شان را ارائه می‌کند.

جدول 1 خواص فیزیکی و مکانیکی ورق ABS با دانسیته بالا

Table 1 Physical and mechanical properties of high density ABS sheet

خواص	ABS
استحکام کششی نهایی (MPa)	6.9
استحکام ضربه‌ای (kJ/m ²)	4-38
ضریب انبساط حرارتی (K ⁻¹)	100-150×10 ⁻⁶
نقطه ذوب (centigrade)	160
دانسیته (g/cm ³)	0.905
سختی (Shore D)	82

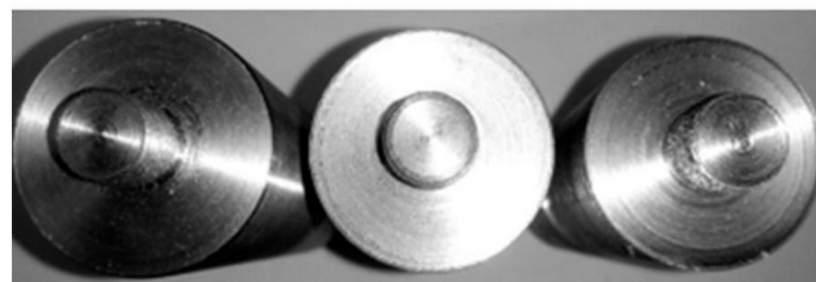


Fig. 2 The tools used by geometry of the threaded pin (Tool shoulder diameter)

شکل 2 ابزار استفاده شده با هندسه پین رزوه دار (قطر شانه ابزار=D)

1- ASTM D-638
2- Santam STM-250
3- Shore D
4- Mitutoyo
5- SEM

جدول 3 آرایه طراحی و مقادیر به دست آمده پاسخها

Table 3 Design matrix and obtained values of responses

شماره آزمایش	ارتعاش آلتراسونیک (US)	سرعت چرخش ابزار N (RPM)	سرعت پیشروی T (mm/min)	قطر شانه ابزار d (mm)	استحکام کششی T.S (MPa)	سختی H (Shore D)
1	Without	400	40	18	2.99	48
2	Without	400	60	20	2.820	57
3	Without	400	80	22	2.91	56
4	Without	800	40	18	3.81	56
5	Without	800	60	20	3.64	65
6	Without	800	80	22	3.76	64
7	Without	1200	40	20	4.87	57
8	Without	1200	60	22	4.69	60
9	Without	1200	80	18	3.66	59
10	With	400	40	22	4.64	60
11	With	400	60	18	3.31	63
12	With	400	80	20	3.44	68
13	With	800	40	20	5.08	70
14	With	800	60	22	4.90	73
15	With	800	80	18	3.87	72
16	With	1200	40	22	6.13	65
17	With	1200	60	18	4.80	68
18	With	1200	80	20	4.93	73

علت این افزایش را می‌توان در یکی از خواص ویژه ارتعاش آلتراسونیک به نام خاصیت نرم‌کنندگی آکوستیک¹ دانست. این پدیده در فلزها سبب از بین رفتن و عوض شدن جهت نایبایی‌ها شده [11] و در مواد پلیمری سبب شکسته شدن زنجیره پلاستیک می‌شود [12]. بنابراین در اثر بروز این پدیده، تغییر شکل پلاستیک بهتر انجام شده و در نتیجه عمل اغتشاش و جریان مواد خمیری (ویسکوز شده) بهبود یافته و سراسر منطقه جوش از مواد پر شده و عیوب سطحی از بین می‌رود.

شکل 6 تصویر ماکروساختار منطقه جوش را در دو حالت با امواج آلتراسونیک و بدون امواج آلتراسونیک نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد یک عیب طولی در ریشه جوش به وجود آمده است که سبب کاهش استحکام کششی می‌گردد. به‌علاوه در اثر جریان نامناسب مواد یک سری مک‌ها و حفره‌ها در منطقه جوش به وجود می‌آیند که حین آزمون کشش سبب شروع پارگی و رسیدن زودتر به پارگی می‌شود. از این‌رو ملاحظه می‌گردد که اعمال ارتعاش تأثیر بسزایی در بهبود استحکام کششی دارد.

در شکل 7 مقایسه میزان استحکام کششی نمونه جوش نشده، نمونه جوش شده بدون ارتعاش آلتراسونیک و نمونه جوش داده شده با ارتعاش آلتراسونیک نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌گردد که استحکام کششی در نمونه جوش داده شده در حالت با ارتعاش، خیلی نزدیک به استحکام کششی نمونه جوش نشده است.

3-1-2- بررسی اثر سرعت چرخش ابزار

شکل 8 نمودار اثر سرعت چرخش ابزار بر استحکام کششی را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که مقدار استحکام کششی به طور پیوسته با افزایش سرعت چرخش ابزار بیشتر می‌شود، و هنگامی که سرعت ابزار به 1200 دور بر دقیقه می‌رسد، استحکام کششی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بر خلاف جوشکاری مواد فلزی که افزایش حرارت زیاد سبب به وجود آمدن عیوب در منطقه جوش می‌شود، در جوشکاری مواد ترموپلاستیک

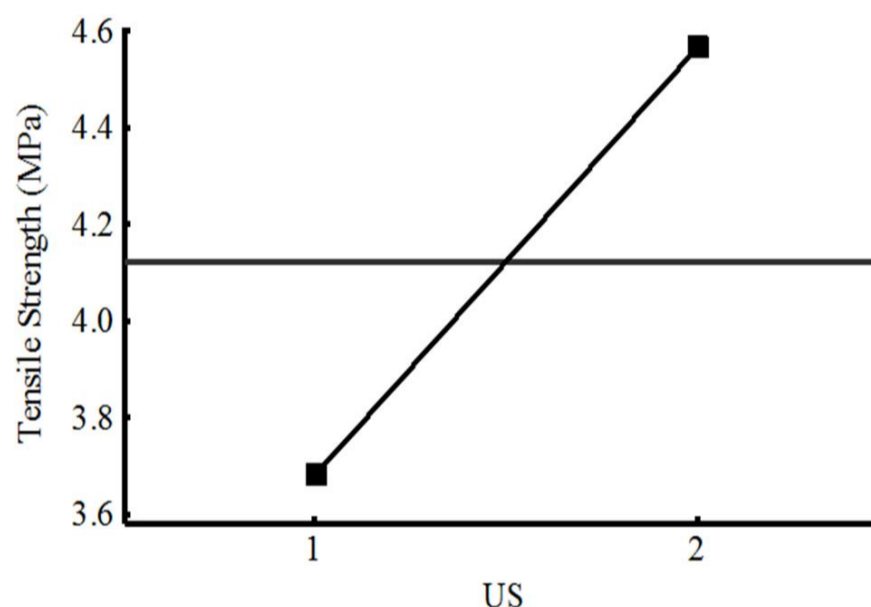


Fig. 5 Effect of ultrasonic vibration on tensile strength

شکل 5 اثر ارتعاش آلتراسونیک بر میزان استحکام کششی

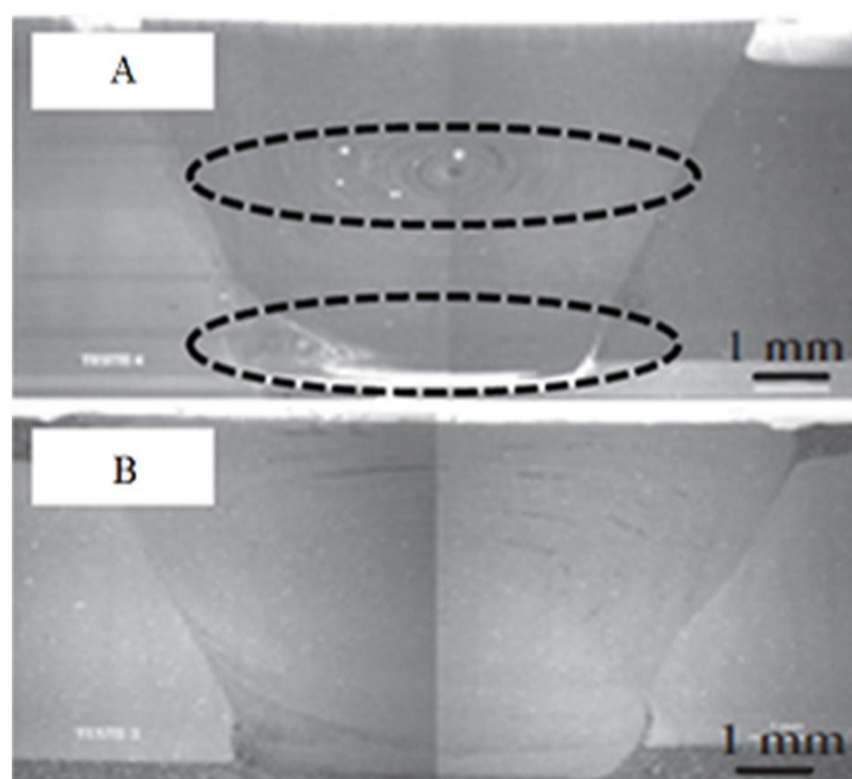


Fig. 6 Macrostructure of the weld zone (A) without vibration (Test No. 7) (B) with vibration (Test No. 16)

شکل 6 ماکروساختار منطقه جوش در حالت‌های (A) بدون ارتعاش (تست شماره 7) (B) با ارتعاش (تست شماره 16)

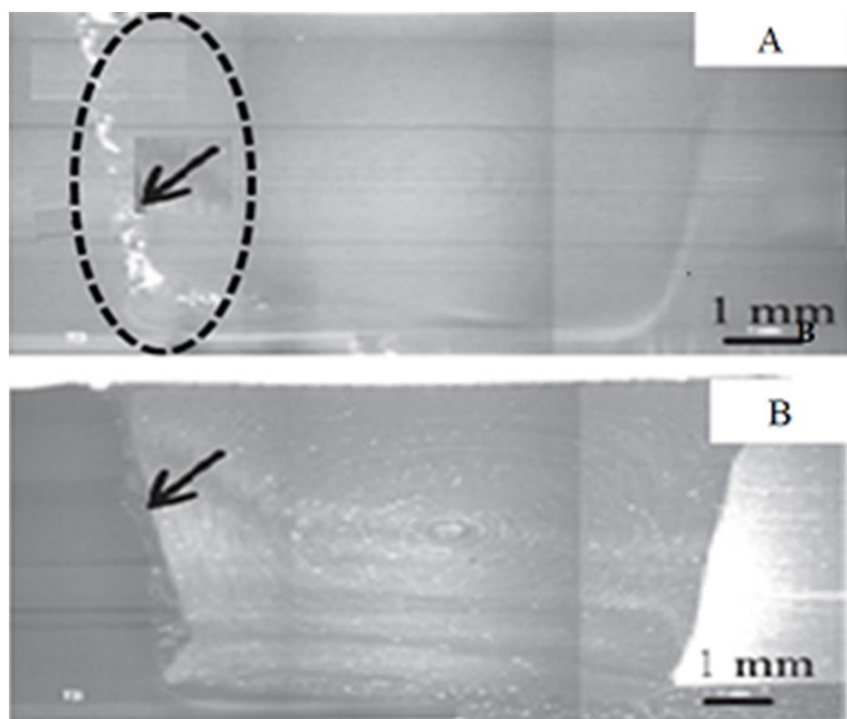


Fig. 9 Macro structure of welding cross-section with the rotational speeds of the different tools (A) Test No. 11 (B) Test No. 13

شکل 9 ماکروساختار سطح مقطع جوش در سرعت‌های چرخشی ابزار مختلف (A) تست شماره 11 (B) تست شماره 13

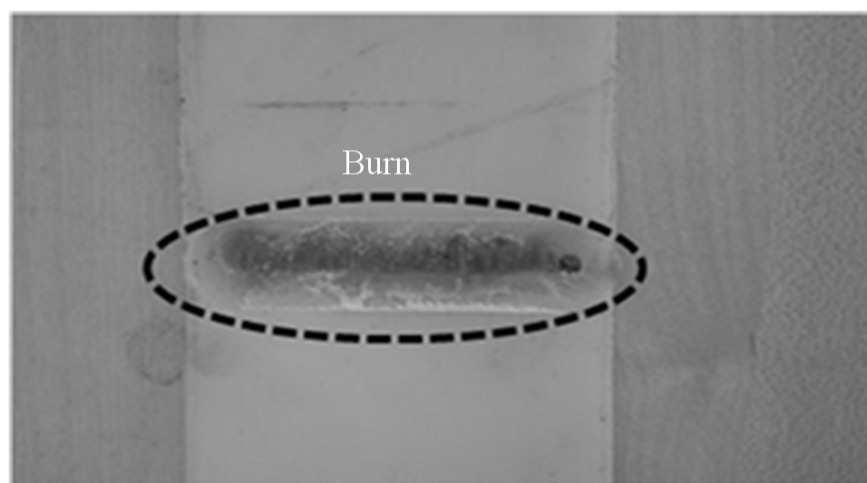


Fig. 10 Create burns in the area in the spin speed of 1200 RPM (Test No. 16)
شکل 10 ایجاد سوختگی در منطقه جوش در سرعت چرخش 1200 دور بر دقیقه (تست شماره 16)

3-1-3- بررسی اثر سرعت پیشروی

شکل 11 تأثیر نرخ پیشروی ابزار بر استحکام کششی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است سرعت پیشروی بالا منجر به کاهش استحکام کششی می‌شود. همچنین کیفیت ظاهری جوش نیز کاهش می‌یابد. هنگامی که سرعت پیشروی کم باشد، مدت زمانی که طول می‌کشد تا ابزار مسافت جوش را طی کند طولانی‌تر است از این رو سبب افزایش حرارت در منطقه جوش خواهد شد. بنابراین جریان مواد پلاستیک در منطقه جوش بهتر شده و استحکام بالا می‌رود [5,7,14].

همچنین هنگامی که سرعت پیشروی ابزار افزایش می‌یابد، به دلیل سرعت بالای انتقال مواد، خط و ناگت جوش نازک می‌گردد که این اثر سبب کاهش استحکام می‌گردد. علاوه بر این عدم به وجود آمدن حرارت مناسب در خط جوش سبب می‌شود تا مواد به جای اینکه اغتشاش پیدا کرده و به هم جوش شوند توسط ابزار به سمت جلو فشرده شوند. در این شرایط جوشکاری به صورت ناپایدار انجام شده و استحکام جوش کاهش پیدا می‌کند. شکل 12 تصویر جوش انجام شده در سرعت پیشروی بالا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد هنگامی که جوشکاری با سرعت پیشروی 80 میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌شود، به دلیل عدم ایجاد حرارت مناسب و سرعت انتقال مواد بالا، عمل اغتشاش بخوبی انجام نشده و این پدیده سبب خشن شدن و پلیسه زیاد در اطراف خط جوش می‌شود، و همان‌گونه که

حرارت بالاتر به دلیل ایجاد حالت نیمه جامد سبب بهبود خواص استحکامی جوش می‌گردد. زیرا درجه‌ی مخلوط شدن و اغتشاش مواد افزایش می‌یابد. این حرارت سبب ویسکوز شدن مواد پلیمری شده و خواص استحکامی جوش را افزایش می‌دهد [5, 13,7].

در شکل 9 تصویری از ماکروساختار سطح مقطع منطقه جوش در شرایط جوشکاری با سرعت‌های چرخشی 400 و 800 دور بر دقیقه را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است، هنگامی که سرعت چرخش ابزار 400 دور بر دقیقه می‌باشد، به دلیل توسعه حرارت نامناسب، عمل اغتشاش و جریان مواد به خوبی صورت نمی‌پذیرد و این پدیده سبب بروز یک حفره در راستای ضخامت بین خط جوش و سمت پس رو جوش می‌شود (قسمت خط چین شکل 9-A). این حفره سبب کاهش استحکام جوش می‌گردد. همچنین وقتی که سرعت چرخش ابزار به 800 دور بر دقیقه می‌رسد به دلیل افزایش حرارت و جریان مناسب، سطح جوش از مواد به خوبی پر می‌گردد و استحکام جوش بهبود می‌یابد. همچنین در شکل 8 مشاهده می‌گردد که افزایش استحکام در سرعت‌های 400 تا 800 بیشتر از افزایش استحکام در سرعت‌های 800 تا 1200 است. دلیل این اتفاق را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش سرعت به دلیل حرارت بیش از حد، یک سوختگی (شکل 10) در منطقه جوش به وجود می‌آید و سبب کاهش خاصیت مکانیکی ماده می‌شود که موجب کاهش خواص استحکامی جوش می‌گردد.

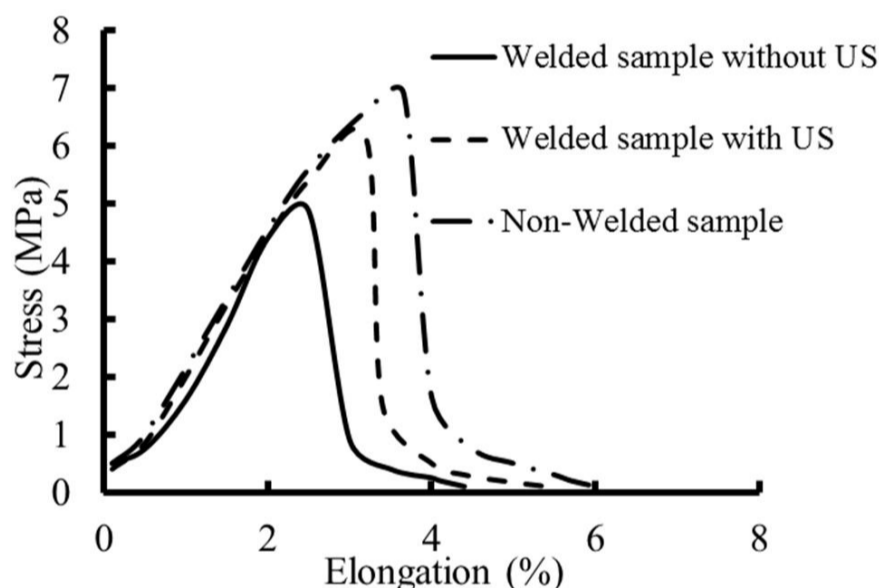


Fig. 7 Comparison of tensile strength of welded samples, no vibration and vibration with welded sample

شکل 7 مقایسه استحکام کششی نمونه‌های جوش نشده، جوش شده بدون ارتعاش و جوش شده با ارتعاش

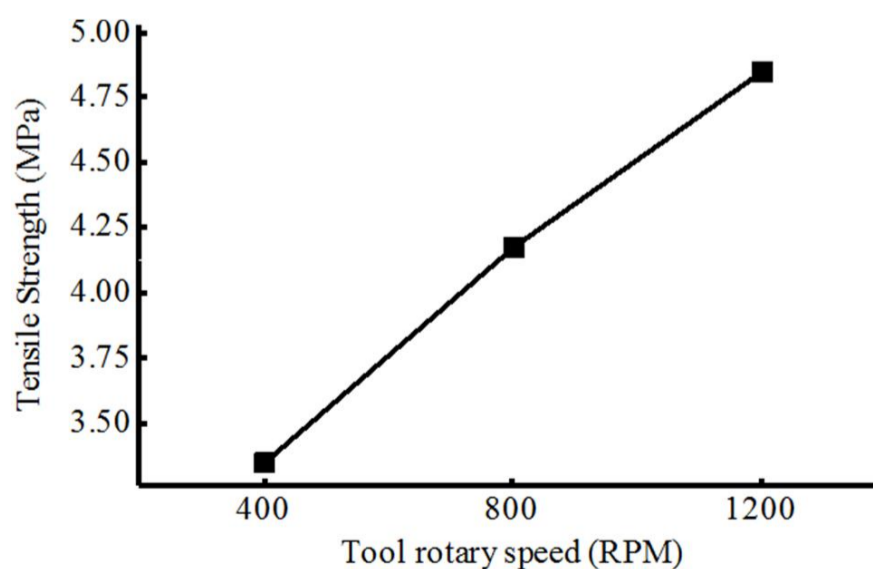


Fig. 8 Effect of rotary speed on tensile strength

شکل 8 اثر سرعت چرخش ابزار بر میزان استحکام کششی

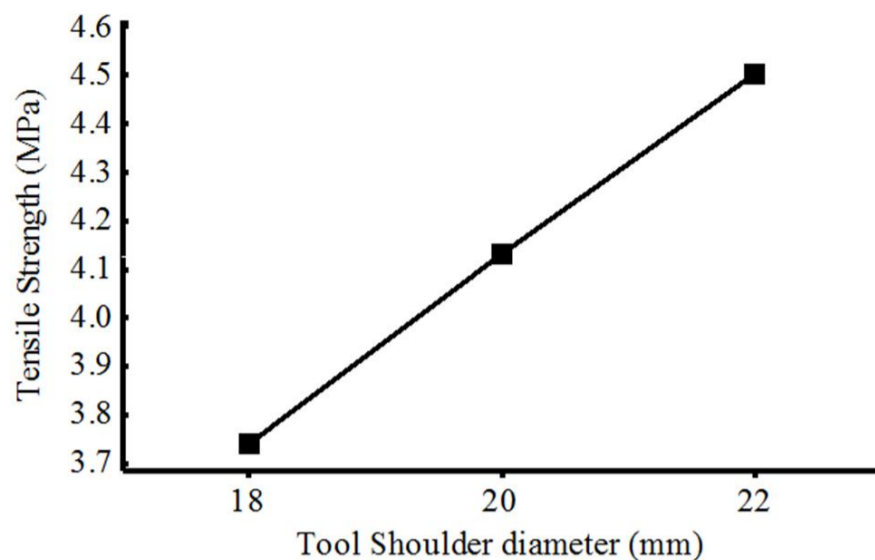


Fig. 13 Effect of shoulder diameter on tensile strength

شکل 13 اثر قطر شانه ابزار بر میزان استحکام کششی

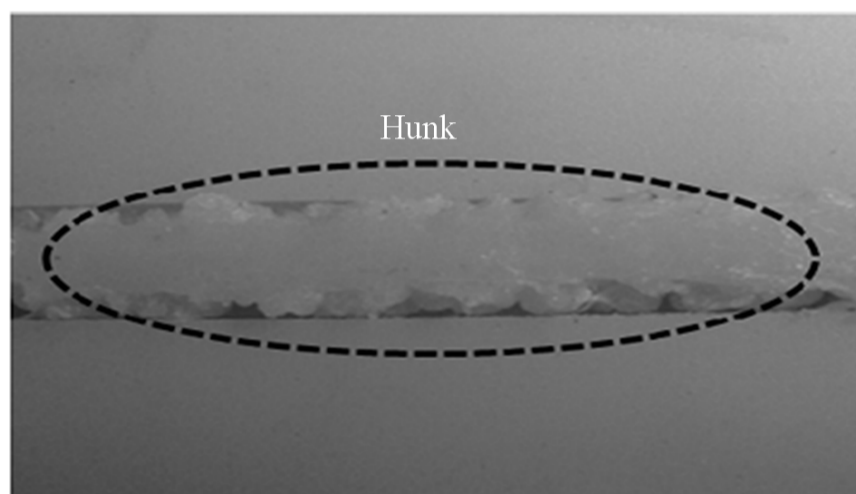


Fig. 14 Create a hunk in the line of welding effect on the choice of diameter 18 mm tool shoulder (Test No. 11)

شکل 14 ایجاد کلوخه در خط جوش در اثر انتخاب قطر شانه ابزار 18 میلی‌متر (تست 11)

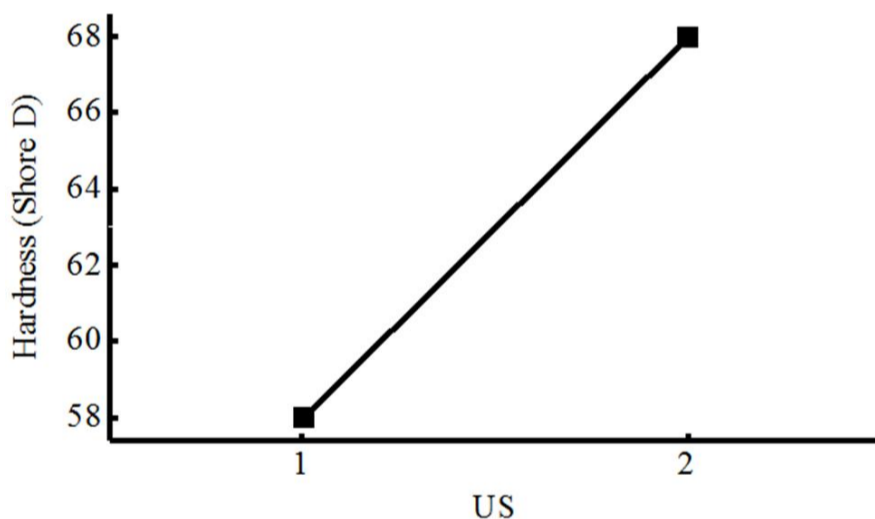


Fig. 15 Effect of ultrasonic vibration on hardness

شکل 15 اثر ارتعاش آلتراسونیک بر میزان سختی

اما از آنجایی که در مواد پلاستیکی و پلیمری ریزساختار و شبکه کریستالی وجود ندارد، جهت تحلیل میزان سختی می‌توان از پارامتری به نام تخلخل استفاده نمود. هرچه میزان تخلخل در یک نمونه بیشتر باشد، سختی آن کمتر می‌گردد. از طرف دیگر، هرچه میزان درصد تخلخل یک نمونه کمتر باشد اصطلاحاً جسم چگال‌تر بوده و سختی آن بیشتر خواهد بود [12].

3-2-1- بررسی اثر ارتعاش آلتراسونیک

در نمودار شکل 15 تأثیر اعمال ارتعاش آلتراسونیک بر سختی منطقه جوش ملاحظه می‌گردد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در اثر اعمال ارتعاش، میزان سختی در حدود 15 درصد افزایش پیدا می‌کند. علت این امر را می‌توان به وابستگی شدید سختی منطقه جوش به میزان تخلخل دانست، بدین معنی که هرچه میزان تخلخل کم‌تر باشد سختی بالاتر خواهد بود.

پیش‌تر توضیح داده شد، عمل شخم‌زنی به عمل اغتشاش غالب می‌گردد که کاهش استحکام جوش را به همراه دارد.

3-1-4- بررسی اثر قطر شانه ابزار

شکل 13 نمودار اثر قطر شانه ابزار بر تغییرات استحکام کششی را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش قطر شانه ابزار، میزان استحکام کششی افزایش پیدا می‌کند و هنگامی که قطر شانه ابزار 22 میلی‌متر می‌شود میزان استحکام کشش به بیشترین مقدار خود می‌رسد. هنگامی که قطر شانه ابزار 18 میلی‌متر می‌باشد، به دلیل کم بودن سطح تماس ابزار با ورق‌ها و همچنین کم بودن نسبت قطر پین به قطر شانه، اصطکاک مناسب و حرارت مناسب بین ابزار و ورق‌ها ایجاد نمی‌شود و در نتیجه در اثر حرارت کم، عیوبی در منطقه جوش مشاهده می‌گردد و سبب می‌شود مواد به صورت کلوخه‌ای جریان پیدا می‌کنند (شکل 14). این عدم جریان مناسب و کلوخه‌ای شدن سبب عدم پرشدن مناسب خط جوش از مواد شده و میزان استحکام کششی جوش کاهش می‌یابد [7]. در قطر شانه ابزار 20 و 22 میلی‌متر به دلیل توسعه حرارت بیشتر بر حجم ثابتی از مواد (با توجه به ثابت بودن قطر پین) میزان جریان مواد بهبود یافته و جریان مواد از حالت کلوخه‌ای به حالت خمیری تبدیل شده و خط جوش کاملاً از ماده پر می‌شود که در این شرایط استحکام کششی جوش بهبود می‌یابد.

3-2-2- بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر سختی

در فرآیندهای فلزکاری، به منظور تحلیل میزان سختی فلز از خواص متالورژیکی مانند ریزساختار، چیدمان دانه‌ها و اندازه دانه‌ها استفاده می‌گردد.

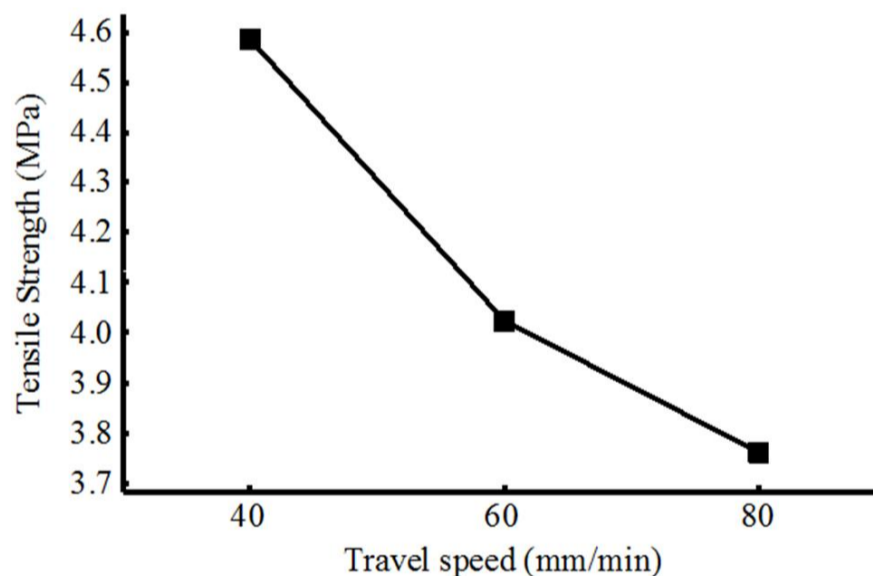


Fig. 11 Effect of travel speed on tensile strength

شکل 11 اثر سرعت پیشروی بر میزان استحکام کششی

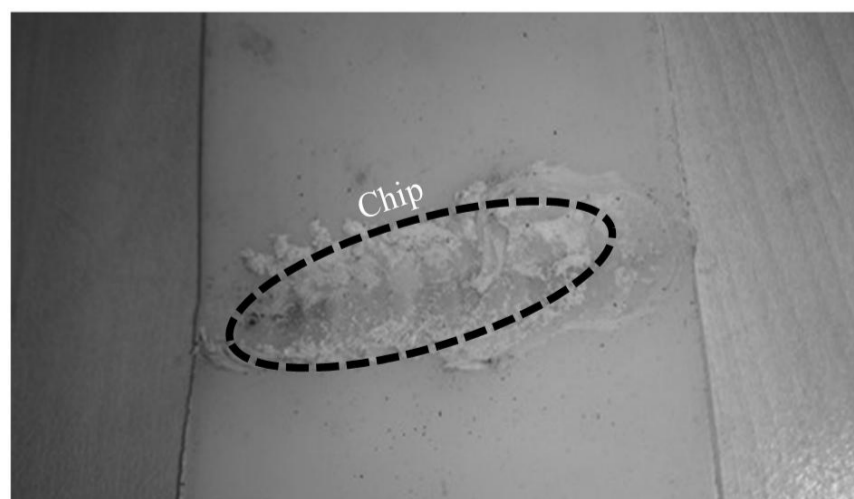


Fig. 12 Image welding line at speeds travel to 80 mm (Test No. 12)

شکل 12 تصویر خط جوش در سرعت پیشروی 80 میلی‌متر بر دقیقه (تست 12)

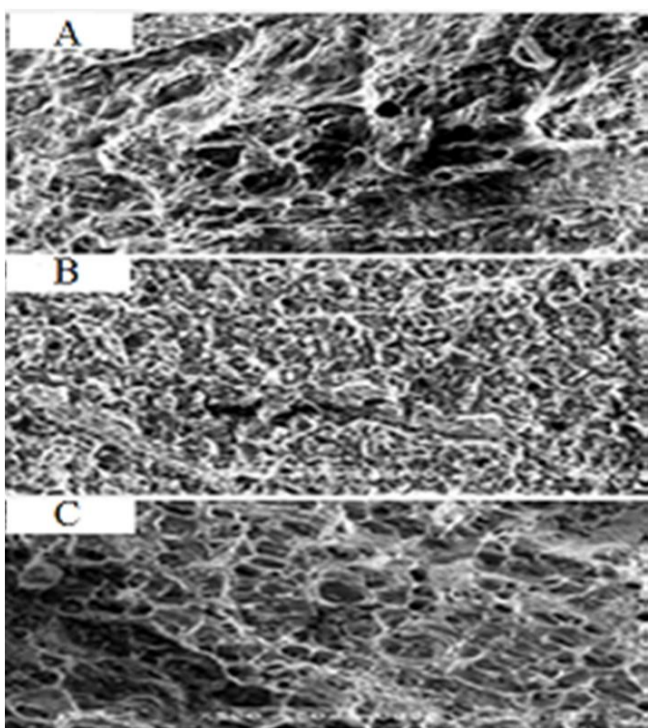


Fig. 19 Changes the amount of porosity on different tools rotation A) Test No. 10, B) Test No. 14, C) Test No. 16

شکل 19 تغییرات میزان تخلخل در سرعت‌های چرخش ابزار مختلف، تست شماره 10، B) تست شماره 14، C) تست شماره 16

بنابراین اندازه تخلخل و مقدار آن‌ها در سطح جوش بطور چشم‌گیری کاهش می‌یابد که نتیجه آن افزایش میزان سختی می‌باشد. شکل 17 نیز تغییرات تخلخل را با توجه به اعمال ارتعاش نشان می‌دهد.

3-2-2- بررسی اثر سرعت چرخش ابزار

شکل 18 نمودار تأثیر سرعت دورانی ابزار بر روی سختی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌گردد، با افزایش سرعت چرخش ابزار میزان سختی بالا رفته و در 800 دور بر دقیقه با یک افزایش 12 درصدی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. اما با افزایش بیشتر سرعت چرخش ابزار از 800 دور بر دقیقه به 1200 دور بر دقیقه میزان سختی به اندازه 4 درصد کاهش پیدا می‌کند.

همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، چرخش ابزار نقش تولید و توسعه حرارت در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را دارد. بنابراین هرچه میزان سرعت چرخش ابزار بالا رود، میزان حرارت تولید شده بین ابزار و ورق بالا رفته و حرارت لازم برای تولید مواد به وجود آمده و یک پیوستگی در سطح جوش به وجود می‌آید که این ایجاد پیوستگی سطحی سبب کاهش میزان تخلخل و افزایش سختی می‌گردد. اما با افزایش بیشتر سرعت چرخش ابزار به دلیل تولید حرارت بیشتر ویسکوزیته مواد خمیری در اثر حرارت کاهش می‌یابد و این پدیده احتمال حبس هوا را در ناحیه جوش افزایش می‌دهد. در چنین شرایطی میزان تخلخل افزایش پیدا کرده و سبب کاهش میزان سختی می‌شود.

شکل 19 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تأثیر سرعت دوران ابزار بر میزان تخلخل در سطح جوش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 19 مشاهده می‌گردد، در سرعت چرخش 800 دور بر دقیقه پهنای دهانه چاله‌های تخلخل کاهش یافته و میزان سختی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت از 800 به 1200 ملاحظه می‌گردد که میزان تخلخل مجدداً افزایش یافته و پهنای دهانه چاله‌ها کمی افزایش می‌یابد.

شکل 20 نیز نمودار تغییرات میزان تخلخل بر حسب دوران ابزار را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد اثرات دوران بر میزان تخلخل برعکس تأثیر آن بر روی سختی می‌باشد. بدین معنی که با کاهش میزان تخلخل سختی افزایش می‌یابد و با افزایش میزان تخلخل سختی کاهش می‌یابد.

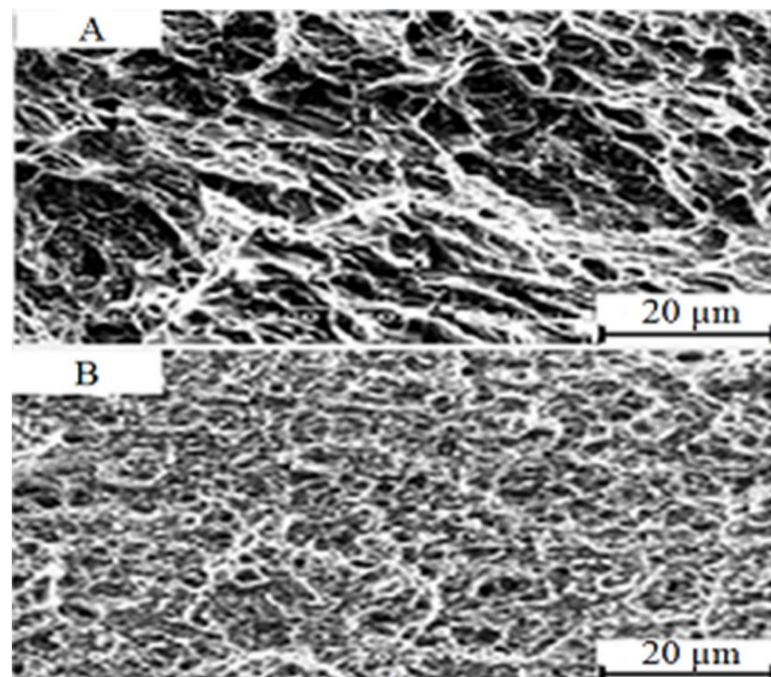


Fig. 16 Electron microscopic observations of the porosity of the surface of the image, A) without vibration (Test No. 5), B) with vibration (Test No. 18)

شکل 16 تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی تخلخل از سطح جوش، A) بدون ارتعاش (تست شماره 5)، B) با ارتعاش (تست شماره 18)

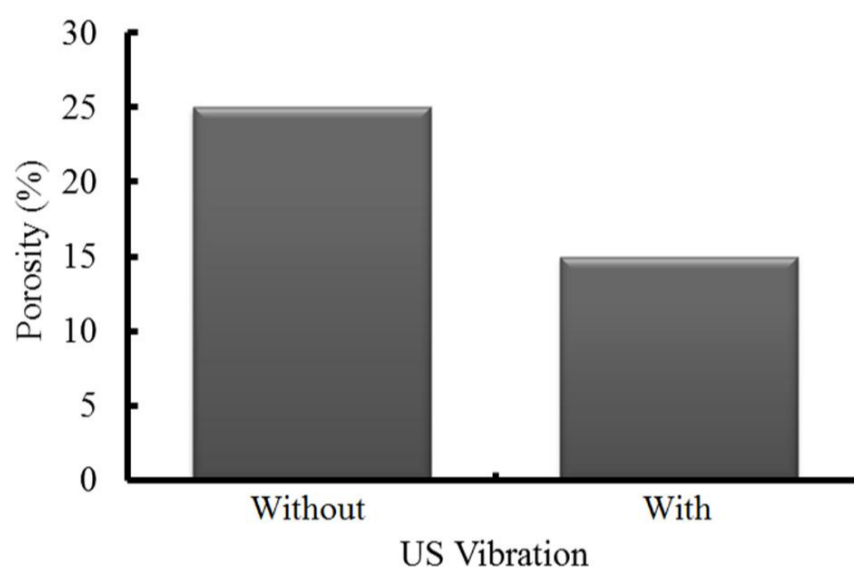


Fig. 17 Porosity changes in effect apply with ultrasonic vibration

شکل 17 تغییرات تخلخل در اثر اعمال ارتعاش آلتراسونیک

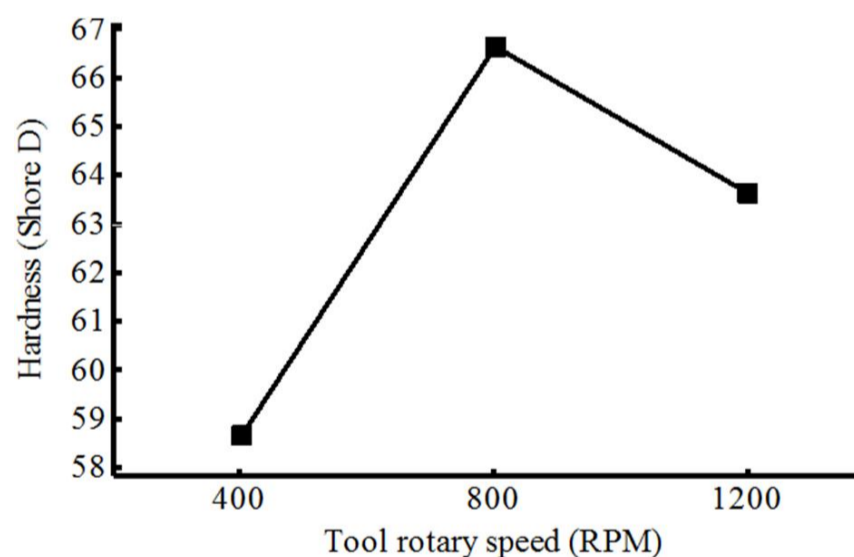


Fig. 18 Effect of rotary speed on hardness

شکل 18 اثر سرعت چرخش ابزار بر میزان سختی

هنگامی که ارتعاش آلتراسونیک به ابزار در حال جوشکاری اعمال می‌گردد، سبب اعمال لرزش با فرکانس بالا به مواد خمیری و ویسکوز می‌گردد که این امر بهبود مورفولوژی سطحی و زیر سطحی منطقه جوش شده را به همراه داشته و در نتیجه حفره‌ها و مک‌ها را از بین رفته و میزان تخلخل کاهش می‌یابد. شکل 16 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از میزان تخلخل در سطح جوش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این تصاویر مشاهده می‌گردد، اعمال ارتعاش سبب شکسته شدن پیوند شیمیایی و جریان راحت‌تر مواد می‌شود.

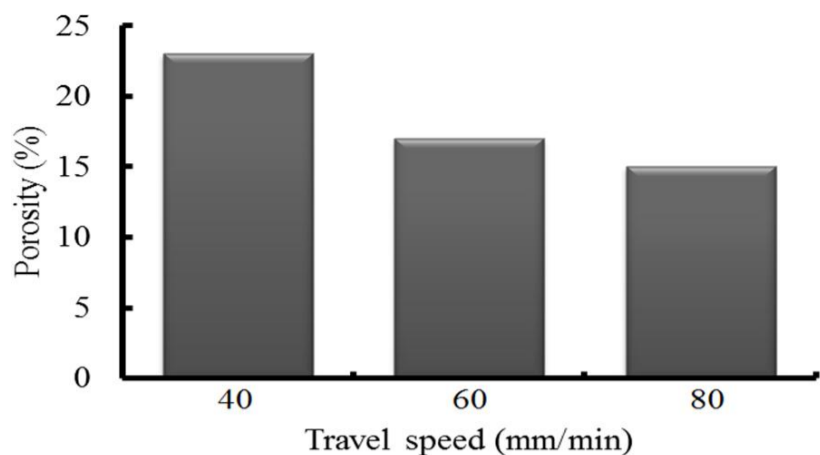


Fig. 23 Porosity changes with travel speed

شکل 23 تغییرات تخلخل با سرعت پیشروی

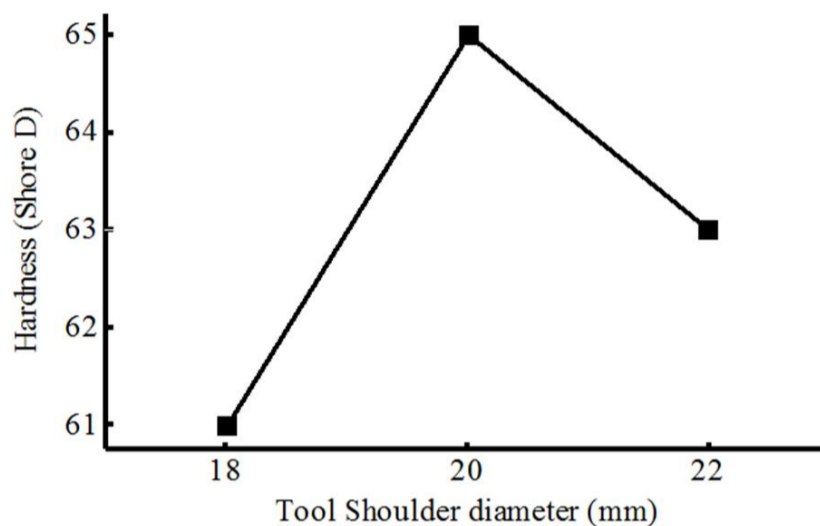


Fig. 24 Effect of shoulder diameter on hardness

شکل 24 اثر قطر شانه ابزار بر میزان سختی

اما هنگامی که سرعت پیشروی بالا می‌رود، به دلیل کاهش حرارت تولید شده در یک ناحیه احتمال حبس هوا کاهش پیدا کرده و میزان تخلخل کاهش پیدا می‌کند. در این حالت میزان سختی افزایش می‌یابد. شکل 22 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح جوش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد، در سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه به دلیل حرارت زیاد و حبس هوا سطح متخلخل می‌شود و سبب کاهش سختی می‌گردد. اما در سرعت پیشروی 80 میلی‌متر بر دقیقه احتمال حبس هوا و در نتیجه تخلخل کاهش یافته و میزان سختی افزایش می‌یابد. همچنین شکل 23 تغییرات میزان تخلخل را با افزایش سرعت پیشروی نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌گردد که با افزایش سرعت پیشروی میزان تخلخل کاهش پیدا می‌کند.

3-2-4- بررسی اثر قطر شانه ابزار

شکل 24 اثر قطر شانه ابزار بر میزان سختی را نشان می‌دهد. هنگامی که قطر شانه ابزار از 18 میلی‌متر به 20 میلی‌متر می‌رسد، به دلیل اینکه سطح بیشتری در اطراف خط جوش توسط شانه ابزار پوشانده می‌شود، از پاشش مواد به خارج خط جوش جلوگیری شده و حرارت تولیدی نیز افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی میزان درصد تخلخل کاهش پیدا کرده و افزایش سختی را به همراه خواهد داشت. اما هنگامی که قطر شانه ابزار به 22 میلی‌متر می‌رسد، به دلیل افزایش قطر شانه ابزار به قطر پین (قطر شانه بیشتر در قطر پین ثابت) میزان حرارت وارد شده به مواد بیشتر بوده و در اثر این حرارت، ویسکوزیته مواد خمیری کاهش پیدا می‌کند. این ماده با ویسکوزیته پایین احتمال، حبس هوا را در خط جوش افزایش می‌دهد. بعلاوه علی‌رغم جوشکاری با قطر شانه ابزار بزرگتر، احتمال خروج ماده با ویسکوزیته پایین از خط جوش افزایش یافته و درصد تخلخل افزایش یافته و میزان سختی کاهش می‌یابد. البته کاهش این میزان سختی تقریباً کم می‌باشد.

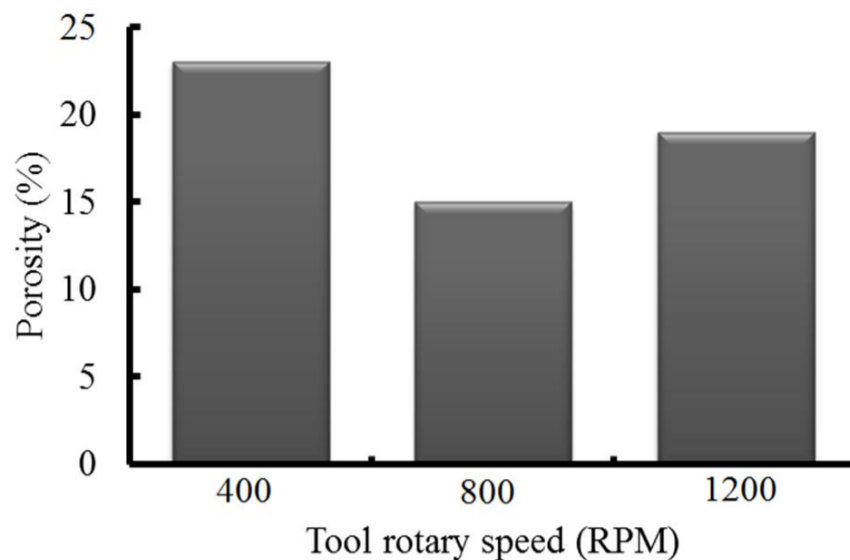


Fig. 20 Porosity changes with tool rotary speed

شکل 20 تغییرات تخلخل با سرعت چرخش ابزار

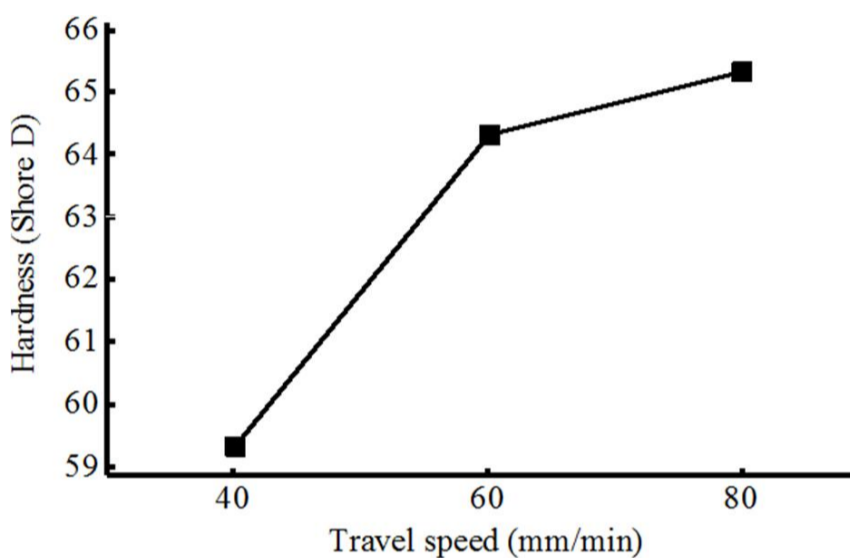


Fig. 21 Effect of travel speed on hardness

شکل 21 اثر سرعت پیشروی بر میزان سختی

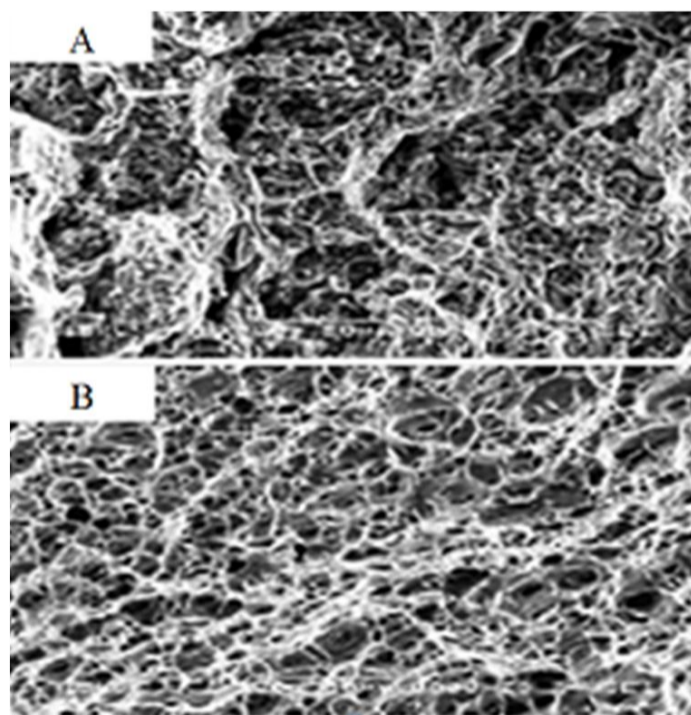


Fig. 22 Changes the amount of porosity on different advance (A) Test No. 7 (B) Test No. 6

شکل 22 تغییرات میزان تخلخل در سرعت‌های پیشروی مختلف (A) تست شماره 7 (B) تست شماره 6

3-2-3- بررسی اثر سرعت پیشروی

شکل 21 نمودار تأثیر سرعت پیشروی بر سختی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش سرعت پیشروی میزان سختی افزایش پیدا می‌کند. هنگامی که سرعت پیشروی کم می‌باشد (40 میلی‌متر بر دقیقه)، در اثر تولید حرارت بیش از حد ماده حالت خمیری با ویسکوزیته پایین پیدا کرده و احتمال حبس هوا در آن بالا می‌رود. در این حالت سطح جوش پس از سرد شدن متخلخل شده و سبب کاهش سختی می‌شود.

همچنین رتبه‌بندی این درجه‌ها را نشان می‌دهد. شکل 26 نمودار تاثیر میانگین نتایج پاسخ متغیرها نسبت به درجه‌ی تحلیل گری را نشان می‌دهد.

4-1- انتخاب ترکیب بهینه

همان‌طور که از شکل 20 مشخص است اعمال ارتعاش آلتراسونیک و انتخاب سرعت چرخشی ابزار 1200 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی در هر سطحی و قطر ابزار 22 میلی‌متر سبب رسیدن به بیشترین مقدار درجه تحلیل گری می‌شود. بنابراین می‌توان این ترکیب از پارامترها را به عنوان رشته جواب بهینه دانست که سبب رسیدن به بیشترین استحکام و سختی بطور هم‌زمان می‌شود. از آنجایی که سرعت پیشروی بر درجه تحلیل گری بی‌تاثیر بوده و انتخاب آن در هر سطحی ممکن می‌باشد، لذا اگر در سطح اول انتخاب گردد ترکیب بهینه همان آزمایش شماره شانزدهم با بیشترین درجه تحلیل گری می‌باشد. از این رو این ترکیب (بر اساس جدول 3 آزمایش شماره 16 با مشخصات $US_2N_3T_1d_3$) به عنوان جواب بهینه شناخته می‌شود.

4-2- بحث در مورد نتایج بهینه

استفاده از ارتعاش، استحکام کششی و سختی را بهبود می‌بخشد، بنابراین استفاده از ارتعاش مطلوب است. درباره سرعت چرخشی ابزار می‌توان گفت که 1200 دور بر دقیقه باعث رسیدن به بالاترین مقدار استحکام کششی، و سرعت چرخش ابزار 800 دور بر دقیقه منجر به حداکثر سختی شد. اما در بهینه‌سازی چند هدفه با توجه عامل وزنی 0.5، منطقی است که در سرعت چرخشی ابزار 1200 بیشترین پاسخ به درجه تحلیل گری می‌دهد. در مورد سرعت پیشروی بدان معنی است که سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه باعث بالاترین مقدار استحکام کششی، و از سوی دیگر، سرعت پیشروی 80 میلی‌متر بر دقیقه منجر به حداکثر سختی شد. اما، با توجه به عوامل وزنی برابر برای پاسخ، سرعت پیشروی در هر سطحی بیشترین پاسخ به درجه تحلیل گری می‌دهد.

علاوه بر این، انتخاب بالاترین مقدار قطر شانه ابزار، یعنی 22 میلی‌متر سبب بالاترین مقدار استحکام کششی شد.

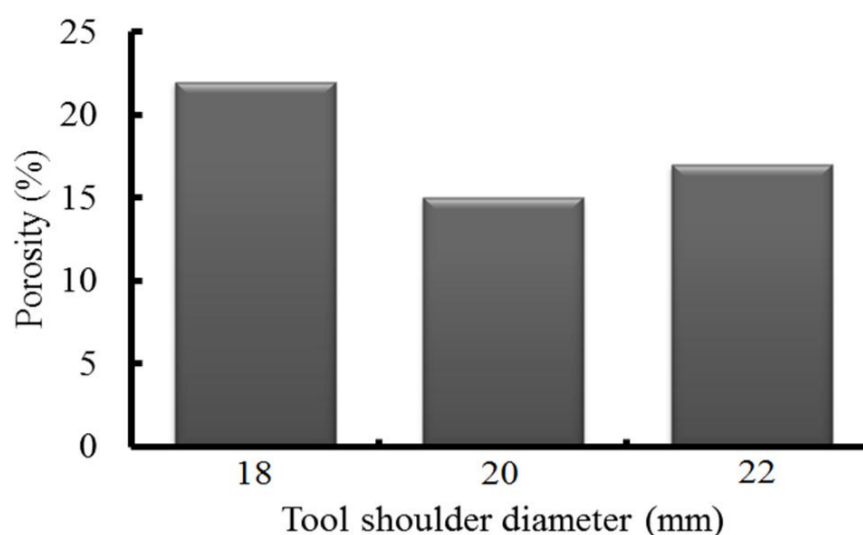


Fig. 25 Porosity changes with tool shoulder diameter

شکل 25 تغییرات تخلخل با قطر شانه ابزار

شکل 25 تغییرات درصد تخلخل با قطر شانه ابزار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، میزان درصد تخلخل با افزایش قطر ابزار ابتدا کاهش یافته و سپس با افزایش بیشتر قطر شانه ابزار میزان درصد تخلخل افزایش می‌یابد.

4- بهینه‌سازی

به منظور یافتن مقدار بهینه پارامترها برای دستیابی به حداکثر استحکام کششی و سختی از روش تجزیه و تحلیل گری¹ استفاده شده است. مراحل اجرای تجزیه و تحلیل گری همراه با جزئیات و معادلات در مراجع [16,15,7] موجود می‌باشد. مراحل مختلف برای پیاده‌سازی عبارتند از:

- نرمالیزه کردن داده‌ها
- محاسبه توالی اصلی
- محاسبه ضریب تحلیل گری
- محاسبه درجه تحلیل گری
- پاسخ پارامترها به درجه تحلیل گری
- تأیید

جدول 4، داده‌های نرمالیزه شده، مقادیر توالی اصلی، ضرایب تحلیل گری و درجه تحلیل گری را با توجه به وزن 0.5 برای استحکام کششی و سختی و

جدول 4 مقادیر نرمالیزه شده، توالی اصلی، ضرایب تحلیل گری، درجه تحلیل گری از داده‌های آزمایشگاهی

Table 4 Grey relational generations, Δ_0/s , grey relational coefficients, and grey relational grades of experimental data

شماره آزمایش	داده‌های نرمالیزه شده (GRG)		توالی اصلی (Δ_0)		محاسبه ضریب گری (GRC)		محاسبه درجه گری (GRG)	
	H	TS	H	TS	H	TS	H	TS
1	0	0.0514	1	0.9486	0.3333	0.3452	0.1696	0.3333
2	0.36	0	0.64	1	0.4386	0.3333	0.1930	0.4386
3	0.32	0.0272	0.68	0.9728	0.4237	0.3395	0.1908	0.4237
4	0.32	0.2991	0.68	0.7009	0.4237	0.4164	0.21	0.4237
5	0.68	0.2477	0.32	0.7523	0.6098	0.3993	0.2523	0.6098
6	0.64	0.284	0.36	0.716	0.5814	0.4112	0.2482	0.5814
7	0.36	0.6193	0.64	0.3807	0.4386	0.5678	0.2516	0.4386
8	0.48	0.565	0.52	0.435	0.4902	0.5347	0.2562	0.4902
9	0.44	0.2538	0.56	0.7462	0.4717	0.4012	0.2182	0.4717
10	0.48	0.5498	0.52	0.4502	0.4902	0.5262	0.2541	0.4902
11	0.6	0.148	0.4	0.852	0.5556	0.3698	0.2314	0.5556
12	0.8	0.1873	0.2	0.8127	0.7143	0.3809	0.2738	0.7143
13	0.88	0.6828	0.12	0.3172	0.8065	0.6118	0.3546	0.8065
14	1	0.6284	0	0.3716	1	0.5737	0.3934	1
15	0.96	0.3172	0.04	0.6828	0.9259	0.4227	0.3372	0.9259
16	0.68	1	0.32	0	0.6098	1	0.4024	0.6098
17	0.8	0.5982	0.2	0.4018	0.7143	0.5544	0.3172	0.7143
18	1	0.6375	0	0.3625	1	0.5797	0.3949	1

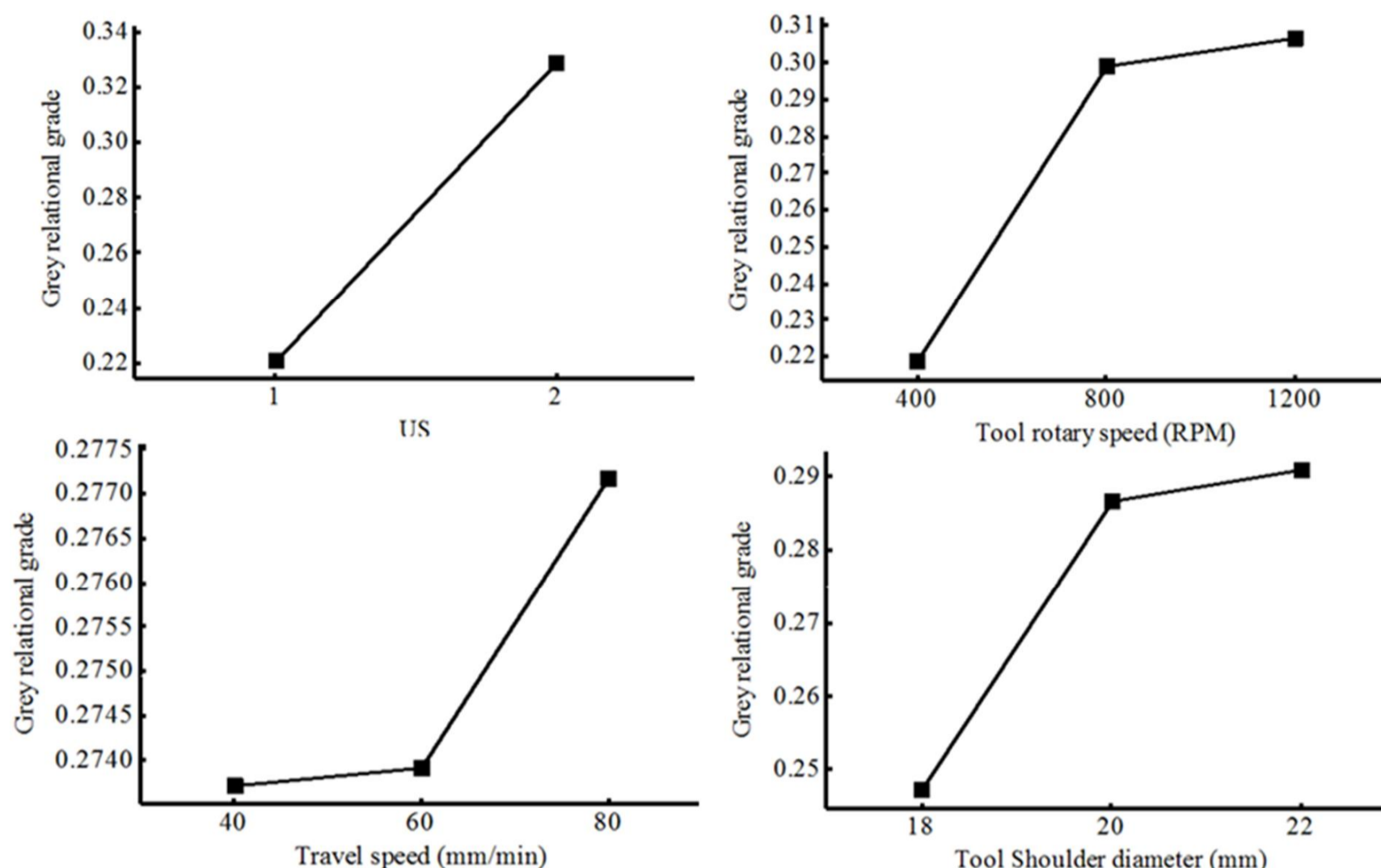


Fig. 26 Response of process factors to grey relational grade

شکل 26 پاسخ متغیرها نسبت به درجه تحلیل گری

نتایج نسبت به حالت اولیه (هنگامی که تمامی پارامترها در سطح اولیه قرار می‌گیرند) به وجود می‌آورد. این ثابت می‌کند که از روش پیشنهادی در رابطه با بهینه‌سازی محصول/ فرآیند، می‌توان بیش از یک هدف به طور هم‌زمان انجام می‌شود.

5- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک فرآیند جوشکاری ترکیبی به نام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ارتعاشات آلتراسونیک برای اتصال ورق‌های پلیمری ارائه شده است و اثرهای آن مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش اثرهای اعمال ارتعاش آلتراسونیک، سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی و قطر شانه ابزار بر میزان استحکام کششی و سختی مورد بررسی قرار گرفت. سپس روش تحلیل گری برای یافتن پارامترهای بهینه جهت رسیدن به بیشترین استحکام کششی و سختی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده بدین شرح است:

- 1- اعمال ارتعاش آلتراسونیک به ترتیب سبب بهبود 20 و 15 درصدی مقادیر استحکام و سختی خواهد شد که دلیل اصلی آن بهبود جریان مواد و کاهش تخلخل زیر سطح جوش می‌باشد.
- 2- افزایش سرعت چرخش ابزار به دلیل بهبود جریان مواد سبب بهبود استحکام شده که در مراجع [5، 7] و [13] به اثبات رسیده است. ولی توسعه حرارت زیاد در 1200 دور بر دقیقه سبب افزایش تخلخل شده و سختی را کاهش می‌دهد.
- 3- سرعت پیشروی در استحکام و سختی اثر دوگانه دارد. از طرفی با افزایش سرعت پیشروی به دلیل کاهش جریان مواد استحکام کاهش می‌یابد که با یافته‌های مراجع [5] و [7] انطباق دارد. همچنین با افزایش سرعت پیشروی به دلیل کاهش میزان تخلخل سختی افزایش می‌یابد.
- 4- افزایش قطر شانه ابزار به دلیل جلوگیری از پدیده تنزل سبب افزایش

جدول 5 نتایج به دست آمده از آزمایش تاییدی

Table 5 Results of confirmatory experiment

پارامترهای بهینه US-FSW		پارامترهای اولیه US-FSW		
پیش بینی	آزمایش			
$US_2N_3T_2d_3$	$US_2N_3T_2d_3$	$US_1N_1d_1$		سطح تنظیم
-	6.13	2.99		استحکام کششی
-	65	48		سختی
0.4024	0.4024	0.1696		استفاده از درجه تحلیل گری
بهبود رتبه تحلیل گری از سطح تنظیم اولیه به سطح تنظیم بهینه = 57.85%				

از سوی دیگر قطر شانه ابزار 20 میلی‌متر منجر به حداکثر سختی شد. بنابراین، انتخاب قطر شانه ابزار 20 میلی‌متر سبب بالاترین پاسخ به درجه تحلیل گری می‌شود.

3-4- تأیید از طریق آزمایش

پس از یافتن جواب‌های بهینه نیاز است که این جواب‌ها به وسیله آزمایشات مجددی مورد تایید قرار گیرند. از این رو نیاز است که یک آزمایش را با مشخصات جواب بهینه به دست آمده از روش تجزیه و تحلیل گری انجام داده و مقادیر استحکام و سختی و درجه تحلیل گری آن را با جواب بهینه به دست آمده مقایسه نماییم. اگر مقدار درجه تحلیل گری که از طریق آزمایش تاییدی به دست آمده است نزدیک به مقداری که از طریق برآورد به دست آمده است، باشد، روش پیشنهادی مؤثر در حل این مسئله بهینه‌سازی خواهد بود. جدول 5 مقایسه برآورد درجه تحلیل گری را با جواب به دست آمده نشان می‌دهد. با توجه به این جدول ملاحظه می‌گردد که تطابق خوبی بین جواب بهینه به دست آمده از الگوریتم تحلیل گری با جواب بهینه به دست آمده از آزمایش (با توجه به مقایسه درجه تحلیل گری وجود دارد. به علاوه نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این الگوریتم یک بهبود تقریباً 15 درصدی در

- استحکام می‌گردد. همچنین این افزایش تاحدی سختی را افزایش می‌دهد. اما هنگامی که قطر ابزار بیشتر از 20 میلی‌متر می‌شود میزان تخلخل افزایش یافته و سختی کاهش می‌یابد.
- 5- برای استحکام کششی انتخاب پارامترها با اعمال ارتعاش آلتراسونیک، سرعت چرخش 1200 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه و قطر ابزار 22 میلی‌متر سبب رسیدن به بیشترین استحکام خواهد شد.
- 6- برای سختی انتخاب پارامترها با اعمال ارتعاش آلتراسونیک، سرعت چرخش 800 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 80 میلی‌متر بر دقیقه، و قطر ابزار 20 میلی‌متر سبب رسیدن به بیشترین سختی می‌شود.
- 7- تولید حرارت، جریان مواد و تغییرات میزان تخلخل مهم‌ترین عامل در تغییرات استحکام کششی و سختی بود که مطابق با مراجع [7] و [12] می‌باشد.
- 8- نتایج بهینه‌سازی با استفاده از روش تحلیل‌گری نشان داد که انتخاب اعمال ارتعاش آلتراسونیک، سرعت چرخش 1200 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 60 میلی‌متر بر دقیقه و قطر ابزار 20 میلی‌متر سبب رسیدن به بالاترین درجه تحلیل‌گری شده و رسیدن به بیشترین مقدار سختی و استحکام کششی را سبب می‌شود.
- ### 6- مراجع
- [1] S. T. Amancio-Filho, J. F. Dos Santos, Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 49, No. 8, pp. 1461-1476, 2009.
- [2] P. De Oliveira, S. T. Amancio-Filho, J. F. Dos Santos, E. Hage, Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA, *Material Letters*, Vol. 64, No. 19, pp. 2098-2101, 2010.
- [3] 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).
- [4] L. Fratini, F. Micari, G. Buffa, V. F. Ruisi, A new fixture for FSW processes of titanium alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 271-274, 2010.
- [5] A. Bagheri, T. Azdast, A. Doniavi, An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets, *Materials and Design*, Vol. 43, No. 1, pp. 402-409, 2013.
- [6] N. Mendes, A. Loureiro, C. Martins, P. Neto, J. N. Pires, Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds, *Materials and Design*, Vol. 58, No. 1, pp. 457-464, 2014.
- [7] E. Nateghi, M. Hosseinzadeh, Experimental investigation into effect of cooling of traversed weld nugget on quality of high density polyethylene joints, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 1-14, 2015.
- [8] S. Amini, M. R. Amiri, Study of ultrasonic vibrations effect on friction stir welding, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 1, pp. 127-135, 2014.
- [9] M. Ahmadnia, A. Seidnalo, R. Teimouri, Y. Rostamiyan, K. G. Tirtashi, Determining influence of ultrasonic assisted friction stir welding parameters on mechanical and tribological properties of AA6061 joints, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78, No. 9, pp. 2009-2024, 2015.
- [10] Y. Rostamiyan, A. Seidanloo, H. Sohrabpoor, R. Teimouri, Experimental studies on ultrasonically assisted friction stir spot welding of AA6061, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 335-346, 2014.
- [11] M. Shalvandi, Y. Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi, Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief, *Materials and Design*, Vol. 46, No. 1, pp. 713-723, 2013.
- [12] M. Norouzi, M. Hamedi, V. R. Adineh, Strength modeling and optimizing ultrasonic welded parts of ABS-PMMA using artificial intelligence methods, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 1, pp. 135-147, 2012.
- [13] Y. J. Chao, X. Qi, W. Tang, Heat transfer in friction stir welding-experimental and numerical studies, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125, No. 1, pp. 125-138, 2013.
- [14] M. Riahi, H. Nazari, Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1-4, pp. 143-152, 2011.
- [15] R. Bagherian Azhiri, R. Teimouri, M. Ghasemi Baboly, Z. Leseman, Application of Taguchi ANFIS and grey relational analysis for studying, modeling and optimization of wire EDM process while using gaseous media, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, No. 3, pp. 279-295, 2014.
- [16] H. Sohrabpoor, S. P. Khanghah, R. Teimouri, Investigation of lubricant condition and machining parameters while turning of AISI 4340, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 9, pp. 2099-2116, 2014.