مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 176-182

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بهینه‌سازی پارامترهای فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم AA6063 با روش تاگوچی

قاسم جمالی[1]، سلمان نوروزی[2*]، روح‌اله جماعتی[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* بابل، صندوق پستی 4714871167، s-nourouzi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 شهریور 1396
پذیرش: 16 آبان 1396
ارائه در سایت: 10 آذر 1396

کلید واژگان:
اکستروژن اصطکاکی
بهینه‌سازی
خواص مکانیکی
تاگوچی
آلومینیوم AA6063

چکیده

در تحقیق حاضر از فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی به عنوان یک روش جدید جهت ساخت سیم از آلیاژ آلومینیوم AA6063 استفاده شده است. جهت بهینه‌سازی پارامترهای فرایند از روش طراحی آزمایش تاگوچی و آرایه استاندارد L_9 استفاده گردید. پارامترهای مهم فرایند از جمله سرعت دورانی، نیروی اعمالی، هندسه پیشانی ابزار و قطر روزنه سنبه به عنوان متغیرهای ورودی و معیارهای اندازه متوسط دانه و سختی به عنوان شاخص کیفیت در نظر گرفته شدند. آزمایش‌های کشش و میکروسختی سنجی و همچنین بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری جهت ارزیابی خواص سیم تولید شده از فرایند، مورد استفاده قرار گرفتند. در بررسی نتایج، سرعت دورانی با بیش از 63 درصد مشارکت موثرترین پارامتر و پس از آن نیروی اعمالی با درصد مشارکتی قابل توجه به عنوان دومین پارامتر موثر مشخص شد. پارامترهای هندسه پیشانی ابزار و قطر روزنه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی نمونه‌ها نداشته و به صورت پارامترهای فرعی فرایند معرفی شدند. با بررسی نمونه‌ها مشخص شد که با تنظیم صحیح پارامترهای فرایند می‌توان سیم سالم با اندازه دانه‌ای تا 23 بار ریزتر نسبت به فلز پایه تولید کرد که موجبات افزایش استحکام کششی به میزان 14 درصد را نیز به دنبال دارد.

Optimization of friction stir extrusion processing parameters for AA6063 aluminum alloy using Taguchi method

Ghasem Jamali, Salman Nourouzi*, Roohollah Jamaati

Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B 4714871167, Babol, Iran, s-nourouzi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 11 September 2017
Accepted 07 November 2017
Available Online 01 December 2017

Keywords:
Friction extrusion
Optimization
Mechanical properties
Taguchi
AA6063 aluminum alloy

ABSTRACT

In the present research, the friction stir extrusion process as a novel method for wire fabrication from AA6063 aluminum alloy was utilized. For optimization of the process parameters, the L9 standard array of Taguchi design of experiment method was used. The important process parameters include: rotational speed, force, tool face geometry and the die hole size as input variables and grain size and hardness as quality criteria was considered. The tensile test, micro hardness and metallography investigation for studding wire mechanical properties were used. The rotational speed parameter with over 63 percent and after that the force with significant contribution percentage as second parameter was determined. The tool face and the hole size do not have sizeable effect on the mechanical properties and they were introduced as minor process parameters. By investigation of samples, it was determined that with correct setup of process parameters, defect-free wire with grain size over 23 times less than the base metal could be produced. It can increase the ultimate tensile strength of 14 percent against of the base metal.

1- مقدمه

اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی به صورت یک فرایند نوین جهت تولید سیم و لوله از براده‌ها و مواد حجیم معرفی شده است. اساس کار این فرایند شبیه اکستروژن معکوس می‌باشد که جهت سهولت ایجاد سیلان فلزی از حرارت حاصل از اصطکاک استفاده می‌شود. ایده اصلی این روش از فرایند جوش اصطکاکی نشأت گرفته که اولین بار در سال 1991 توسط انجمن جوش انگلستان معرفی گردید. در مسیر گسترش این روش جوشکاری حالت جامد، فرایندهای اصطکاکی دیگری توسعه یافتند. از این روش‌ها در کاربردهایی مانند بهبود خواص مکانیکی [1]، عملیات حرارتی [2]، ساخت کامپوزیت‌های سطحی[3]، حذف عیوب موجود در ریزساختار آلیاژها [4] و همگن کردن ساختار نانو کامپوزیت آلومینیم استفاده شده است[5].

اگرچه فرایند اکستروژن اصطکاکی، فن‌آوری جدیدی می‌باشد اما تا کنون تحقیقاتی در مورد به‌کارگیری آن انجام شده است. ابوفرها قابلیت اجرای فرایند اکستروژن اصطکاکی را در جهت تولید لوله، از بیلت آلیاژ آلومینیوم AA6063T52 بررسی کرد. در این روش، یک سنبه دوار با سرعت پیشروی ثابت به درون نمونه نفوذ و در اثر اصطکاک سطح تماس سنبه با ماده، حرارت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Gh. Jamali, S. Nourouzi, R. Jamaati, Optimization of friction stir extrusion processing parameters for AA6063 aluminum alloy using Taguchi method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 176-182, 2018 (in Persian)

کافی جهت نرم شدن ماده و امکان تغییر شکل آن فراهم می‌شود [6]. دیناهاران، تولید لوله با فرایند اکستروژن اصطکاکی را برای فلز مس خالص به‌کار گرفت و موفق به تولید لوله سالم توسط این فرایند شد [7]. سرکاری خرم و همکاران، برای ساخت لوله از بیلت آلیاژ آلومینیم، فرایند اکستروژن اصطکاکی را به‌کار گرفتند [8]. انصاری و همکاران از فرایند اکستروژن اصطکاکی، جهت تولید لوله از براده‌های فلز منیزیم خالص استفاده کردند. در این تحقیق، شکل ناحیه اغتشاش با توجه به جریان فلز حین فرایند تغییر کرده و با ریزساختارهای نشان داده شده توسط ابوفرها [6] متفاوت بود. این تفاوت از کاهش سرعت پیشروی و تغییر زاویه نوک ابزار در این تحقیق ناشی می‌شد [9]. تنگ و رینولدز با استفاده از فرایند اکستروژن اصطکاکی، از براده‌های آلیاژ آلومینیوم AA2050 و AA2195 سیم تولید کردند. در این تحقیق، برای حرکت عمودی قالب بجای سرعت پیشروی ثابت، از یک جک هیدرولیک و اعمال نیرو متناسب با فشار سیال هیدرولیک استفاده شد [10]. زنگ و همکاران جهت مطالعه انتقال حرارت در فرایند اکستروژن اصطکاکی، یک مدل حرارتی ارائه و برای اعتبارسنجی آن، در هشت نقطه کلیدی از قالب، محفظه و صفحه نگهدارنده، ترموکوپل قرار دادند [11]. بوفا از فرایند اکستروژن اصطکاکی در جهت ساخت سیم از براده‌های آلیاژ منیزیم AZ31 استفاده کرد. در این تحقیق، علاوه بر بررسی تاثیر پارامترهای فرایند، اثر نسبت اکستروژن نیز در دو حالت با توجه به قطر روزنه قالب بررسی شد [12]. زنگ و همکاران از یک مدل دینامیک سیال محاسباتی[1] جهت بررسی جریان مواد در حین فرایند اکستروژن اصطکاکی استفاده کردند. مدل سه‌بعدی در شرایط غیرلغزشی بین ماده و ابزار فرض شده و ماده به صورت یک سیال غیرنیوتنی که ویسکوزیته آن به دما و نرخ کرنش وابسته است، تعریف شد [13]. شریف‌زاده، میکروسختی و خواص خوردگی سیم منیزیمی تولید شده با روش اکستروژن اصطکاکی را بررسی کرد. ریزساختار فاکتور اصلی بهبود رفتار خوردگی معرفی شده به گونه‌ای که دانه‌های ظریف حاصل از فرایند، عامل اصلی افزایش مقاومت در برابر خوردگی می‌باشند [14]. لی و تنگ جهت بررسی کرنش عرضی و طولی در فرایند اکستروژن اصطکاکی، از آلیاژ آلومینیوم AA2195 به عنوان مارکر در زمینه آلومینیوم AA6061 استفاده کردند [15]. عبدی بحنق از فرایند اکستروژن اصطکاکی، جهت تولید سیم از براده‌های آلیاژ آلومینیوم AA7277 استفاده کرد [16].

در برخی از تحقیقات فوق، از ابزار با سطح پیشانی مارپیچ و در برخی دیگر از سنبه با سطح پیشانی صاف استفاده شده است. تاکنون تاثیر هندسه ابزار بر ریزساختار محصول بررسی نشده و در اکثر تحقیقات از یک نوع هندسه پیشانی ابزار استفاده شده است. در بهینه‌سازی پارامترها، تحقیقی جامع و در برگیرنده تمام عوامل موثر بر فرایند انجام نگردیده است. در تحقیق حاضر تاثیر پارامترهای اصلی فرایند شامل: سرعت دورانی، نیرو، هندسه پیشانی سنبه و قطر روزنه سنبه مورد بررسی قرار گرفته و جهت بهینه‌سازی فرایند از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده گردیده است. ماده مورد آزمایش به‌صورت بیلت در نظر گرفته شد تا از اثر غیرهمگن بودن و تراکم غیریکنواخت براده‌های موجود در قالب بر نتایج جلوگیری شود.

2- فرایند آزمایش

2-1- مواد

ماده مورد بررسی از جنس آلیاژ آلومینیوم AA6063 بوده که ترکیب شیمیایی آن در "جدول 1" درج شده است. ابعاد قطعه‌کار به‌صورت یک استوانه با قطر وارتفاع به ترتیب 24 و 32 میلی‌متر می‌باشد که درون ماتریس یا قالب پایینی ثابت می‌شود. برای این‌که اندازه دانه و خواص ماده اولیه یکسان باشد، تمام نمونه‌ها در دمای 527 درجه سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت نگهداری (آنیل) و سپس در آب کوئنچ شده‌اند.

2-2- ابزار

ابزار مورد استفاده شامل دو قسمت اصلی سنبه و ماتریس می‌باشد که موقعیت آن‌ها در "شکل 1" نمایش داده شده است. با توجه به طرح آزمایش از چهار سنبه مختلف که در طول و قطر یکسان و در هندسه پیشانی و قطر روزنه متفاوت هستند استفاده گردیده است. طول و قطر سنبه‌ها به ترتیب 120 و 23.6 و قطر روزنه به ترتیب 5 و 7 میلی‌متر در دو حالت مختلف در نظر گرفته شده است. برای سهولت خروج سیم از سنبه، 115 میلی‌متر از سوراخ سنبه تا قطر 8 میلی‌متر بزرگتر شده است. جهت بررسی اثر هندسه ابزار، روی سطح پیشانی دو تا از سنبه‌ها مارپیچی با گام 10 میلی‌متر ایجاد گردیده است. "شکل 2" سنبه‌های مورد استفاده را با سطح مقطع صاف و مارپیچ نشان می‌دهد. ماتریس با قطر داخلی 24 میلی‌متر و قطر خارجی و ارتفاع به ترتیب 58 و 45 میلی‌متر ساخته شده و در داخل یک نگهدارنده قرار می‌گیرد. سنبه و ماتریس از جنس فولاد گرمکار H13 ساخته شده و جهت حصول به ماکزیمم سختی و استحکام تحت عملیات حرارتی سختکاری قرار گرفته است. در عملیات حرارتی، ابتدا ماتریس و سنبه‌ها در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به مدت 20 دقیقه نگهداری شده و سپس در داخل روغن کوئنچ و پس از آن در دمای 500 درجه به مدت 30 دقیقه برگشت داده شدند. با این عملیات سختی معادل با 54 HRC حاصل گردید.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم AA6063

Table 1 Chemical composition of AA6063 aluminum alloy

عنصر	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
%	98.8	0.413	0.462	0.148	0.0012	0.0217	0.01

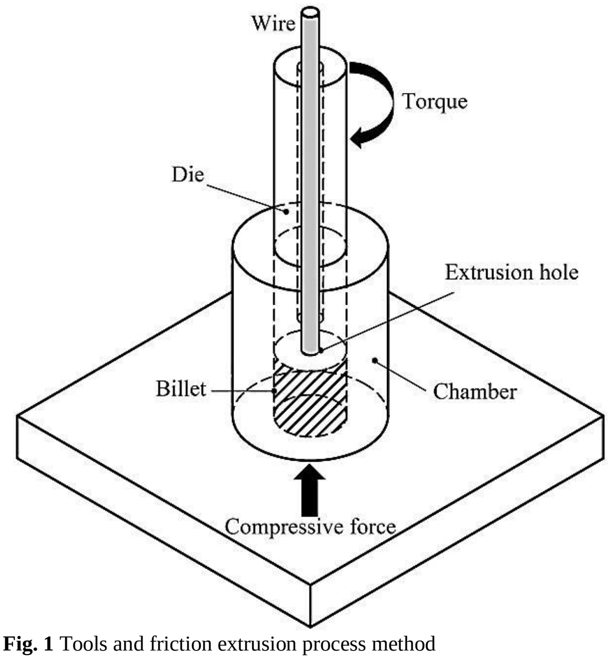

Fig. 1 Tools and friction extrusion process method

شکل 1 ابزار و روش اجرای فرایند اکستروژن اصطکاکی

[1] Computational Fluid Dynamics (CFD)

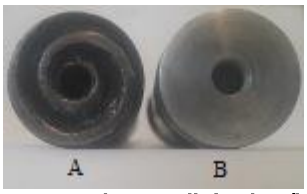

Fig. 2 Friction stir extrusion die A-scrolled and B- flat

شکل 2 قالب در اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی A – مارپیچ و B – صاف

جهت ایجاد نیروی اعمالی مطابق با "شکل 3" از یک جک هیدرولیک با قطر پیستون 37 میلی‌متر و فشار سیال هیدرولیک استفاده شده تا نیرو به صورت یکنواخت اعمال گردد. با تنظیم فشار سیال توسط شیر کنترل فشار یونیت هیدرولیک موجود در "شکل 3" روی فشارهای 2.8 ,4.2 ,5.6 مگاپاسکال و محاسبه مساحت سطح مقطع پیستون جک، نیروهای عمودی 6000, 4500, 3000 نیوتن حاصل می‌گردد. سنبه‌ها از طریق کلت و فشنگی روی محور اصلی ماشین فرز سوار می‌شوند و ماتریس به همراه صفحه نگهدارنده بالای کفشک متحرک قالب بروی میز ماشین نصب می‌گردند. برای کنترل مقدار حرکت سنبه درون ماتریس از یک ساعت اندازه‌گیری استفاده شده است که با توجه به تفاوت مساحت مقطع بیلت ورودی و سیم خروجی، طول سیم تولید شده محاسبه می‌شود. جهت کنترل دمای فرایند از یک کنترلر دیجیتال که به ترموکوپل نوع K مجهز شده، استفاده شده است.

2-3- طراحی آزمایش

روش طراحی آزمایش تاگوچی، یک روش مناسب جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها و صرفه‌جویی در زمان و هزینه است [17]. در این روش ابتدا باید سطوح مناسب برای هر پارامتر فرایند مشخص و متناسب با آن یک آرایه

Fig. 3 Friction stir extrusion process equipment's

شکل 3 تجهیزات مورد استفاده در فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی

ارتوگونال استاندارد انتخاب شود. سطوح پارامترهای فرایند با توجه به گزارش‌های پیشین و انجام آزمایش‌های اولیه، در سطوح مخلوط، دو و سه سطحی مطابق با "جدول 2" معین گردید. برای بهینه‌سازی از چهار متغیر مهم فرایند شامل: سرعت دورانی، نیروی اعمالی، هندسه پیشانی ابزار و قطر روزنه سنبه استفاده شده است. جهت طراحی آزمایش، نرم‌افزار کوالیتک 4 به‌کار گرفته شد و برای تعیین میزان اثرگذاری پارامترها از تحلیل واریانس آنوا استفاده گردید. با توجه به پارامترهای با سطوح مختلط فرایند و درجه آزادی آن‌ها از آرایه استاندارد L9 استفاده شده که با سه مرتبه تکرار مجموعا 27 آزمایش طبق ترتیب موجود در "جدول 3" انجام گرفته است.

2-4- متالوگرافی

برای بررسی ریزساختار، ابتدا سیم‌های تولید شده، در یک مقطع یکسان و در جهت عمود بر جهت اکستروژن برش خورده و سپس مانت سرد شده‌اند. نمونه‌ها با کاغذ سنباده‌های شماره 80 تا 3000 تحت عملیات سنباده‌زنی قرار گرفته و پس از آن با استفاده از پارچه و خمیر الماس یک میکرون، صیقل‌کاری شده‌اند. برای جلوگیری از سوخته شدن سطح نمونه‌ها در تمامی مراحل سنباده‌زنی و صیقل‌کاری از جریان کافی آب استفاده شده است. جهت وضوح تصویر، آشکارسازی نمونه‌ها با استفاده از محلول حکاکی پولتن اصلاح شده به مدت 120 ثانیه در دمای اتاق انجام شد. برای تهیه محلول حکاکی از ترکیب یک محلول شامل یک گرم اکسید کرم جامد در 12 میلی‌لیتر آب + 25 میلی‌لیتر اسید نیتریک، با محلول دیگر شامل 12 میلی‌لیتر اسید کلریدریک + 16 میلی‌لیتر اسید نیتریک + 1 میلی‌لیتر اسید فلوریک + یک میلی‌لیتر آب استفاده شده است. از نمونه‌ها مطابق با بزرگنمایی‌های مشخص، تصویربرداری شده و جهت مشخص نمودن اندازه دانه از نرم‌افزار تخصصی آنالیز تصویر کلمکس استفاده شده است. در نرم‌افزار ابتدا تصاویر کالیبره شده و سپس اندازه متوسط دانه‌ها مطابق با روش استاندارد ASTM E112 اندازه‌گیری گردید.

جدول 2 پارامترها و سطوح فرایند جهت طراحی آزمایش

Table 2 The parameters and it levels of the FSE process for design of experiment

شماره	پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
1	سرعت دورانی (rpm)	300	475	600
2	نیروی اعمالی (N)	3000	4500	6000
3	هندسه پیشانی ابزار	مارپیچ	صاف	
4	قطر روزنه سنبه (mm)	7	5	

جدول 3 ترتیب آزمایش‌های مورد نیاز مطابق با آرایه استاندارد L9

Table 3 Experiments arrangement according to L9 standard array

شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	نیروی اعمالی (N)	هندسه ابزار	قطر روزنه سنبه (mm)
1	300	3000	مارپیچ	7
2	300	4500	صاف	5
3	300	6000	مارپیچ	7
4	475	3000	صاف	7
5	475	4500	مارپیچ	7
6	475	6000	مارپیچ	5
7	600	3000	مارپیچ	5
8	600	4500	مارپیچ	7
9	600	6000	صاف	7

2-5- آزمایش میکرو سختی

برای بررسی سختی نمونه‌ها، از دستگاه میکروسختی‌سنج شرکت کوپا مدل MH3 استفاده شده است. نمونه‌ها پس از متالوگرافی مورد آزمایش سختی‌سنجی قرار گرفته و با توجه به معیار سختی ویکرز، بار اعمالی و زمان نگهداری به ترتیب 100 گرم و 10 ثانیه تعیین شدند.

2-6- آزمایش کشش

برای بررسی استحکام کششی نمونه‌ها از دستگاه تست کشش مدل سنتام 250 استفاده گردید. نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E8 آماده شده و قطر و طول موثر آن‌ها به ترتیب 4 و 20 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همه نمونه‌ها با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمایش کشش قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

تمام نمونه‌ها با توجه به پارامترهای فرایند به صورت سالم تولید و از نظر ظاهری دارای کیفیت سطحی تقریباً یکنواخت و بدون پیچیدگی و عاری از اعوجاج در طول سیم مشاهده شدند. در "شکل 4" نمونه‌های سیم تولید شده با این فرآیند تحت شرایط مختلف نشان داده شده است. تنظیم نادرست پارامترهای فرایند منجر به تولید سیم معیوب می‌شود. زمانی که سرعت دورانی یا نیروی اعمالی مقدار خیلی کمی داشته باشد، حرارت لازم جهت سیلان ماده فراهم نشده و تولید سیم بسیار کند انجام می‌شود. در چنین شرایطی سطح خارجی سیم ناصاف و به صورت بریده بریده مشاهده می‌شود. "شکل 4-A" یک نمونه سیم معیوب که تحت شرایط سرعت دورانی و نیروی (250 rpm, 3000 N) تولید شده را نشان می‌دهد. همچنین اگر مقدار سرعت دورانی و نیروی اعمالی خیلی زیاد باشد، با توجه به سرعت بالای تولید، امکان اعوجاج و پیچش در طول سیم به وجود می‌آید "شکل 4-B" نمونه‌ای دیگر از سیم معیوب که تحت سرعت دورانی و نیروی اعمالی زیاد (750 rpm, 6000 N) تولید شده را نمایش می‌دهد. با تنظیم مناسب پارامترها، سیم‌های با ظاهر سالم تولید می‌شود (4-C و D).

با اندازه‌گیری قطر متوسط دانه‌ها، کوچکترین اندازه دانه در نمونه شماره 4 با اندازه دانه 16.2 میکرومتر و بزرگترین اندازه دانه در نمونه شماره 9 با 35.4 میکرومتر مشاهده شد. "شکل 5" تصویر ریزساختار نمونه‌ها به همراه فلز پایه را با بزرگنمایی 200 برابر نشان می‌دهد. مقدار اندازه متوسط دانه‌ها در "جدول 4" نشان داده شده است.

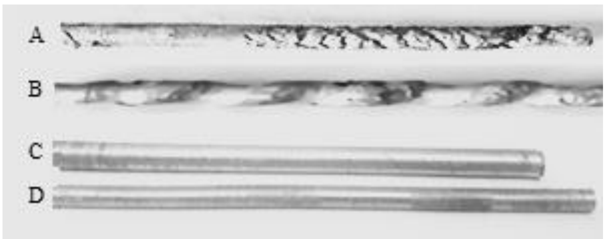

Fig. 4 Wire samples obtained from different experiment condition A,B) defect samples C, D) defect-free samples (respectively 1, 2 from table 3)

شکل 4 نمونه‌های سیم حاصل از آزمایش‌های تحت شرایط مختلف، a و b) نمونه‌های معیوب c و d) نمونه سالم (به ترتیب شماره 1و 2 از جدول 3)

جدول 4 اندازه متوسط دانه در نمونه‌ها

Table 4 Mean grain size of the samples

شماره آزمایش	1	2	3	4	5	6	7	8	9
اندازه دانه (µm)	20.2	23	25.2	16.2	23.2	22.1	25.3	32	35.4

پس از اندازه‌گیری قطر متوسط دانه‌ها توسط نرم‌افزار آنالیز تصویر کلمکس، مقدار میانگین اندازه دانه‌ها به عنوان پاسخ در نرم‌افزار طراحی آزمایش کوالیتک 4 وارد گردید. مقدار عددی تاثیر پارامترهای فرایند در "جدول 5" نشان داده شده است به طوری که سرعت دورانی با 63.8 درصد و نیروی اعمالی با 28 درصد بیشترین تاثیر و قطر روزنه سنبه با 1.7 درصد کمترین تاثیر را روی اندازه متوسط دانه‌ها دارد. پارامتر هندسه پیشانی ابزار نیز تقریباً بی اثر است زیرا با حذف آن در نرم‌افزار، خطای طراحی از مقدار 6.3 درصد به 4.8 درصد کاهش می‌یابد. بنابراین شرایط بهینه جهت دستیابی به کمترین اندازه دانه به صورت $A_2B_1C_1D_2$ حاصل می‌شود. حروف A تا D به ترتیب معرف سرعت دورانی، نیروی اعمالی، هندسه پیشانی ابزار و قطر روزنه سنبه و اعداد سطوح انتخاب شده را نشان می‌دهند.

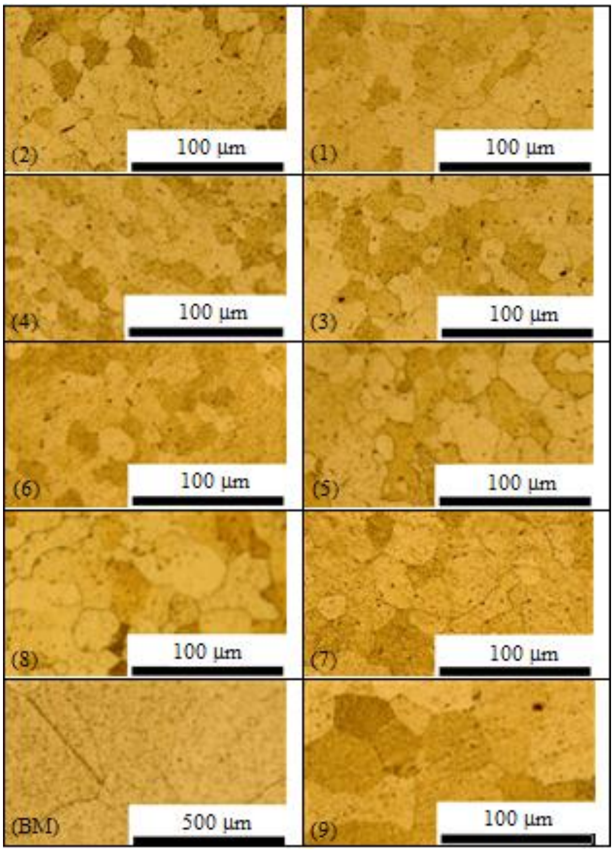

Fig. 5 Microstructure image of experiment samples according to table 3

شکل 5 تصویر ریزساختار حاصل از نمونه های آزمایش مطابق با جدول (3)

جدول 5 مقدار عددی تاثیر پارامترهای فرایند بر اندازه متوسط دانه

Table 5 Numerical value of the process parameters on the mean grain size

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	مجموع مربعات خالص	درصد مشارکت
سرعت دورانی	2	179.059	89.529	36.393	174.13	63.838
نیرو	2	81.499	40.749	16.564	76.579	28.073
هندسه ابزار	1	0.079	0.079	0.032	0	0
قطر روزنه	1	7.22	7.22	2.934	4.76	1.745
خطا	2	4.92	2.46			6.344
کل	8	272.78				100

در بررسی اندرکنش میان پارامترها، اندرکنش سرعت دورانی و نیروی اعمالی به عنوان دو پارامتر اصلی فرایند در حدود 10 درصد است. همان‌طور که در "شکل 6" نشان داده شده، خطوط ترسیمی اثر پارامترها کاملاً موازی نبوده و نسبت به یکدیگر اندکی زاویه دارند.

در روش طراحی آزمایش تاگوچی مقدار بهینه از طریق انتخاب سطوح موثر پارامترها و با استفاده از "رابطه 1" محاسبه می‌شوند[17].

$$Y_{\mathrm{OPT}} = \bar{T} + (A_2 - \bar{T}) + (B_1 - \bar{T}) + (C_1 - \bar{T}) + (D_2 - \bar{T}) \tag{1}$$

با قرار دادن مقادیر میانگین اثر پارامترها در "رابطه 1" مقدار اندازه متوسط دانه برای شرایطی که اندرکنش سرعت دورانی و نیرو در نظر گرفته نشود، حدودا 15 میکرومتر محاسبه می‌شود. در صورت در نظر گرفتن اندرکنش، اگر چه تغییری در ترتیب سطوح بهینه اتفاق نمی‌افتد اما با جایگزینی مقدار A_2B_1 در آزمون شماره 4 با مقدار 16.2 میکرومتر به جای دو پرانتز اول در "رابطه 1"، مقدار اندازه دانه بهینه به 14.8 میکرومتر کاهش می‌یابد.

بیشترین اندرکنش از نظر مقدار میان نیرو و قطر روزنه سنبه است. اگر چه قطر روزنه اثر قابل توجهی بر نتایج ندارد اما اثر متقابل آن با نیرو، مقدار اندازه دانه بهینه را تا 13.9 میکرومتر کاهش می‌دهد. اندرکنش مهم دیگر میان پارامترهای هندسه سطح ابزار و قطر روزنه سنبه رخ داده است که پس از محاسبه اثر آن، مقدار بهینه به 14.6 میکرومتر کاهش می‌یابد. مقدار سایر اندرکنش‌ها زیر 10 درصد بوده و با محاسبه اثر آن‌ها تغییر قابل توجهی در مقدار بهینه ایجاد نشد.

سختی نمونه‌ها طبق یک الگوی یکسان در مقطع عمود بر جهت اکستروژن اندازه‌گیری شد. در بعضی از تحقیقات گذشته [12] مقدار سختی در مرکز و نقاط نزدیک به سطح خارجی سیم تفاوت مشهودی داشته است. با توجه به نتایج سختی در نمونه‌های با بیشترین و کمترین مقدار سختی که در "شکل 7" گزارش شده است، تغییر قابل ملاحظه و معنی‌دار بین مقدار سختی در مرکز و حاشیه مشاهده نشد. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت میان استفاده از براده و بیلت به عنوان ماده ورودی فرایند باشد. استفاده از بیلت سبب ایجاد ریزساختاری یکنواخت‌تر در تمام قسمت‌های مقطع سیم می‌شود. دمای فرایند در نزدیکترین نقطه به سطح تماس سنبه و ماده اندازه‌گیری شد و در هیچکدام از موقعیت‌های آزمایشی از 370 درجه سانتی‌گراد تجاوز نکرد. با قرار دادن مقدار سختی در نرم‌افزار طراحی آزمایش کوالیتک و بررسی نتایج مشخص گردید که ترتیب آزمایش $A_2B_1C_1D_2$ جهت دستیابی به مقدار ماکزیمم سختی مناسب می‌باشد.

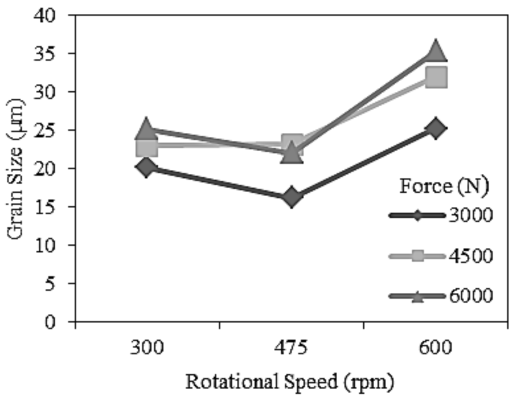

Fig. 6 Interaction diagram between the rotational speed and force

شکل 6 نمودار اندرکنش میان سرعت دورانی و نیروی اعمالی

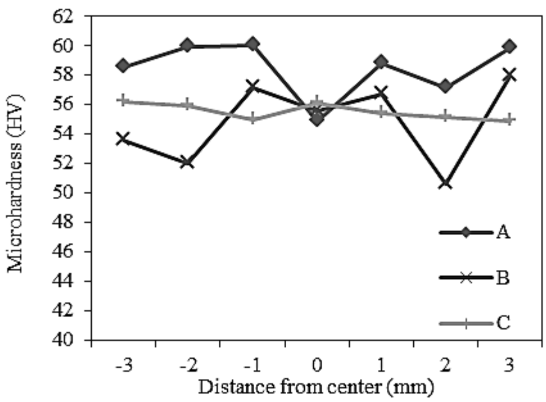

Fig. 7 Micro hardness profile in the wires section, A and B are the samples 4 and 9 according to table 3 and C is the base metal.

شکل 7 پروفیل میکروسختی در مقطع سیم‌ها، حروف A و B نمونه‌های 4 و 9 مطابق جدول 3 هستند و حرف C معرف فلز پایه است.

با بررسی اثر پارامترها مشخص گردید که مانند نتایج اندازه دانه، پارامترهای سرعت دورانی و نیروی اعمالی دارای بیشترین تاثیر و پارامترهای هندسه پیشانی ابزار و قطر روزنه سنبه دارای کمترین تاثیر در نتایج خروجی می‌باشند. در مقایسه با بررسی اندازه دانه، تاثیر پارامترهای فرعی بر روی افزایش سختی اندکی بیشتر می‌باشد. مقدار تاثیر پارامترهای مختلف در "جدول 6" نمایش داده شده است. در این تحلیل خطای طراحی آزمایش تا 3.6 درصد کاهش داشته است. با حذف پارامتر هندسه پیشانی ابزار از طرح آزمایش، مقدار خطا به بیش از 5 درصد افزایش می‌یابد که نشان از تاثیر غیرقابل انکار 1.5 درصدی این پارامتر دارد. مقدار بهینه میکروسختی حاصل از طراحی آزمایش، 60 ویکرز است. در بررسی اندرکنش میان پارامترها، نیز بیشترین تداخل میان پارامترهای فرعی فرایند است و مقدار تداخل میان پارامترهای اصلی یعنی سرعت دورانی و نیروی اعمالی بسیار ناچیز محاسبه شده است. اندرکنش بین هندسه ابزار و قطر روزنه سنبه بیشترین مقدار را نشان می‌دهد. با محاسبه تاثیر آن توسط "رابطه 1" مقدار سختی به 60.5 ویکرز افزایش می‌یابد. اندرکنش میان پارامترهای نیرو و هندسه ابزار، اگر چه از لحاظ مقدار عددی کمتر است اما تاثیر مهم‌تری بر روی سختی بهینه دارد و مقدار آن را به 60.9 ویکرز افزایش می‌دهد. سایر اندرکنش‌ها از جمله اندرکنش میان پارامترهای اصلی فرایند یعنی سرعت دورانی و نیرو تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی مقدار بهینه سختی ندارند.

برای تایید نتایج حاصل از طراحی آزمایش، ترتیب شرایط بهینه حاصل از تحلیل واریانس آنوا جهت تولید سیم، تنظیم و مطابق انتظار سیم‌های با ظاهر سالم تولید شد. ریزساختار سیم‌های تولید شده در مقطع عمود بر جهت

جدول 6 مقدار عددی تاثیر پارامترهای فرایند بر میکروسختی نمونه‌ها

Table 6 Numerical value of the process parameters on the micro hardness of the samples

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	مجموع مربعات خالص	درصد مشارکت
سرعت دورانی	2	12.563	6.281	73.021	12.39	64.907
نیرو	2	4.803	2.401	27.923	4.631	4.2062
هندسه ابزار	1	0.374	0.374	4.351	0.288	1.510
قطر روزنه	1	1.176	1.176	13.681	1.09	5.714
خطا	2	0.171	0.085			3.607
کل	8	19.088				100

اکستروژن مورد بررسی قرار گرفت و میانگین اندازه دانه 14.9 میکرومتر به‌دست آمد که بیش از 93 درصد به اندازه پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش مشابهت دارد. بنابراین اندازه متوسط دانه در شرایط بهینه 23 برابر در مقایسه با فلز پایه کاهش یافته است. تصویر ریزساختار نمونه به همراه نمودار توزیع اندازه دانه‌ها در "شکل 8" نمایش داده شده است. در بررسی مقدار سختی نمونه‌ها، مقدار میکروسختی برابر با 60.1 ویکرز حاصل شد که با مقدار 60.9 ویکرز حاصل از تحلیل نرم‌افزار مطابقت زیادی دارد.

استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول به‌عنوان دو پارامتر مهم دیگر، بیانگر خصوصیات مکانیکی در سیم‌های تولیده شده هستند. به همین منظور نمونه‌های حالت بهینه تحت آزمایش کشش قرار گرفته و نتایج آن در "شکل 9" نمایش داده شده است. در این تصویر مقدار استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه تحت شرایط بهینه و فلز پایه نشان داده می‌شود. با وجود اینکه در برخی از گزارش‌ها [10] مقدار استحکام کششی سیم حاصل از اکستروژن اصطکاکی نسبت به فلز پایه کاهش داشته است، در شرایط بهینه مقدار استحکام کششی به میزان 14 درصد نسبت به فلز پایه افزایش داشته است. همچنین درصد ازدیاد طول کلی نه تنها نسبت به فلز پایه کاهش نداشته بلکه به مقدار مختصری بهبود یافته است.

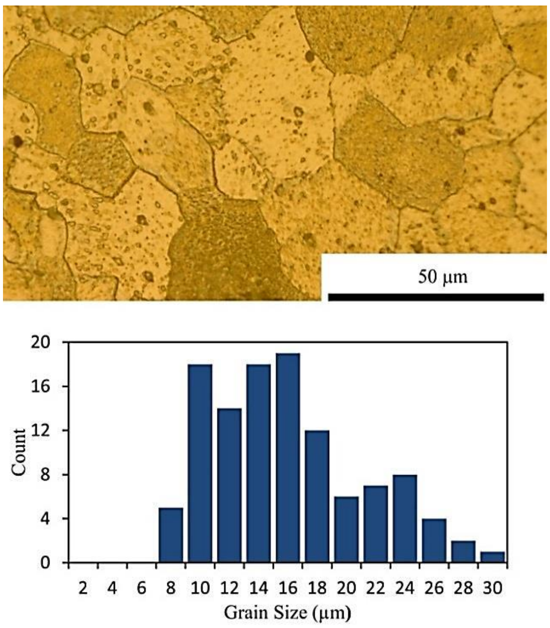

Fig.8 Microstructure image and the diagram of grain size distribution in the optimum condition sample

شکل 8 ریزساختار و نمودار توزیع اندازه دانه در نمونه شرایط بهینه

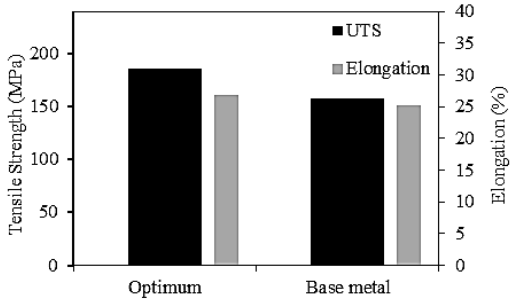

Fig. 9 Diagram of the ultimate tensile strength and elongation for both optimum condition and base metal

شکل 9 نمودار حداکثر استحکام کششی و درصد افزایش طول در حالت بهینه و فلز پایه

با بررسی نمودارهای آزمایش کشش نمونه‌ها مشخص می‌شود که با وجود تغییر شکل پلاستیک حاصل از فرایند، کماکان از شکل‌پذیری مناسبی برخوردار هستند. "شکل 10" نمودار استحکام کششی را برای فلز پایه و نمونه بهینه نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج طراحی آزمایش، سرعت دورانی موثرترین پارامتر در فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی است. عامل ریز شدن دانه‌ها در این فرایند، افزایش چگالی نابجایی‌ها بواسطه تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد که سبب فعال شدن مکانیزم‌های تبلور مجدد دینامیکی و جلوگیری از رشد دانه می‌شود [18]. سرعت دورانی سبب ایجاد تنش برشی در ماده و خرد شدن دانه‌ها می‌گردد[10]. از طرف دیگر افزایش سرعت دورانی موجب افزایش حرارت ناشی از اصطکاک ماده و ابزار شده که می تواند عاملی جهت رشد دانه‌ها باشد [19]. بنابراین مقدار مناسب این پارامتر یک حالت متوسط دارد تا سبب بهبود خواص مکانیکی شود [20].

نیروی اعمالی به‌عنوان دومین پارامتر موثر در فرایند اکستروژن اصطکاکی معرفی شده است. به گونه‌ای که در نیروهای کم با توجه به سرعت اکستروژن پایین‌تر، امکان این‌که ماده تحت تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های برشی بیشتری قرار گیرد بالاتر است که می‌تواند سبب کاهش اندازه دانه شود [20]. با افزایش نیرو، سرعت اکستروژن افزایش یافته و فرایند متمایل به شرایط اکستروژن سنتی می‌شود. البته این نکته را باید مدنظر داشت که کاهش بیش از حد نیروی اعمالی منجر به کاهش شدید سرعت اکستروژن شده و زمان کافی جهت رشد دانه در دمای بالا وجود خواهد داشت.

سومین عامل موثر بر ریزساختار قطر روزنه قالب یا سنبه می باشد. قطر روزنه کمتر، سبب مقاومت بیشتر ماده جهت خروج از روزنه می‌شود. نتیجه این مقاومت تحت تنش بالاتر قرار گرفتن ماده، تغیر شکل پلاستیک بیشتر و نهایتا کاهش اندازه دانه است. اما اگر کاهش قطر روزنه سنبه سبب کاهش شدید سرعت اکستروژن شود، با توجه به زمان و دمای کافی جهت رشد دانه نتیجه معکوس دارد [21]. بنابراین قطر روزنه سنبه می‌تواند تحت تاثیر دو پارامتر اصلی فرایند قرار گیرد.

تغییر هندسه پیشانی ابزار کوچکترین سهم را در خواص مکانیکی سیم تولید شده دارد. هنگام انجام فرایند با سنبه مارپیچ، در ابتدای فرایند که دما پایین است، مقداری ماده درون شیارهای مارپیچ سطح ابزار بجا مانده و عملاً اصطکاک از حالت لغزنده به چسبنده تبدیل می‌شود [22]. یعنی بجای اصطکاک بین ابزار و ماده، اصطکاک میان لایه‌های ماده ایجاد می‌شود. به

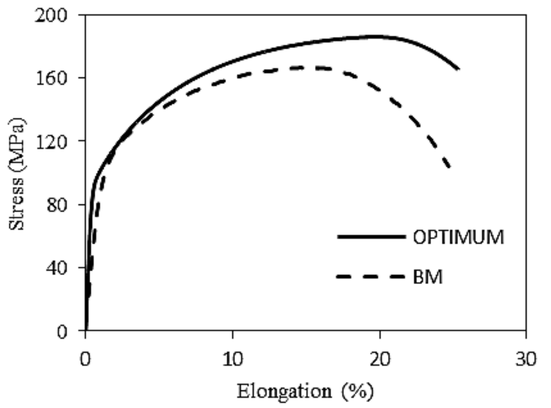

Fig. 10 Tensile strength diagram of the base metal and optimum sample

شکل 10 نمودار استحکام کششی فلز پایه و نمونه‌ی بهینه

همین دلیل تاثیر عمده‌ای از تغییر هندسه پیشانی ابزار حاصل نمی‌شود. از سویی دیگر هنگام استفاده از ابزار مارپیچ با توجه به کاهش سطح تماس بین ماده و ابزار سبب تماس تدریجی و سهولت نفوذ ابزار درون ماده شده و موجب اجرای آسان‌تر فرایند می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

با توجه به طرح آزمایش و پارامترهای مشخص شده، فرایند اکستروژن اصطکاکی به صورت موفقیت آمیزی به‌کار گرفته شد و نمونه‌های سالم در همه موقعیت‌های آزمایشی تولید شدند. با بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌ها و تحلیل نتایج آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش کوالیتک 4 اطلاعات زیر حاصل گردید.

- سرعت دورانی مهم‌ترین عامل در کاهش اندازه دانه و افزایش سختی است. تحلیل واریانس آنوا از نتایج اندازه دانه و میکروسختی درصد مشارکت بیش از 63 درصدی این پارامتر را نشان می‌دهد.
- نیروی اعمالی دومین پارامتر موثر بر ریزساختار و خواص مکانیکی است. تاثیر این پارامتر بر ریز نمودن ریزساختار اندکی بیشتر از تاثیرش بر افزایش سختی می باشد.
- ترتیب آزمایش $A_2B_1C_1D_2$ به عنوان شرایط بهینه در هر دو تحلیل مشخص شده است که در این موقعیت آزمایش، اندازه دانه تا 14.9 میکرومتر کاهش و میکروسختی تا 60.1 ویکرز افزایش داشته است. بنابراین اندازه متوسط دانه به مقدار 23 برابر نسبت به فلز پایه کاهش یافته است.
- استحکام کششی نهایی در شرایط بهینه به مقدار 14 درصد نسبت به فلز پایه افزایش و در عین حال درصد افزایش طول نسبی نیز بهبود جزئی پیدا کرده است.

5- مراجع

[1] H. S. Arora, Microstructure property relationship for friction stir processed magnesium alloy, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 16, No. 1, pp. 94-102, 2014.

[2] F. Nascimento, T. Santos, Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys, *Materials Science and Engineering*, Vol. 506, No. April, pp. 16-22, 2009.

[3] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir processing: A novel technique for fabrication of surface composite, *Materials Science and Engineering*, Vol. 341, No. 1, pp. 307-310, 2003.

[4] L. Karthikeyan, V. S. Senthil Kumar, Investigation on superplastic forming of friction stir-processed AA6063-T6 aluminum alloy, *Materials and Manufacturing*, Vol. 28, No. 3, pp. 294-298, 2013.

[5] P. B. Berbon, H. William Bingel, R. S. Mishra, Friction stir processing: a tool to homogenize nanocomposite aluminium alloys, *Scripta Mterialia*, Vol. 44, No. 1, pp. 61–66, 2001.

[6] F. Abu Farha, A preliminary study on the feasibility of friction stir back extrusion, *Scripta Materialia*, Vol. 66, No. 9, pp. 615-618, 2012.

[7] I. Dinaharan, R. Sathiskumar, Microstructural characterization of pure copper tubes produced by a novel method friction stir back extrusion, *International Conference on Advances in Manufacturing and Materials ICAMME-2014, Procedia Materials Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 1502 – 1508, 2014.

[8] M. Sarkari Khorrami, M. Movahedi, Microstructure evolutions and mechanical properties of tubular aluminum produced by friction stir back extrusion, *Materials and Design*, Vol. 65, No. 1, pp. 74-79, 2014.

[9] M. A. Ansari, R. Abdi Behnagh, Optimization of friction stir extrusion (FSE) parameters through taguchi technique, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 69, No. 7, pp. 1351–1357, 2015.

[10] W. Tang, Production of wire via friction extrusion of aluminum alloy machining chips, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 15, pp. 2231–2237, 2010.

[11] H. Zhang, X. Li, W. Tang, Heat transfer modeling of the friction extrusion process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 221, No. 1, pp. 21–30, 2015.

[12] G. Buffa, D. Campanella, AZ31 magnesium alloy recycling through friction stir extrusion process, *International Journal of Material Forming*, Vol. 9, No. 5, pp. 1-6, 2015.

[13] H. Zhang, X. Zhao, Investigation of material flow during friction extrusion process, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 85, No. 1, pp. 130–141, 2014.

[14] M. Sharifzadeh, M. A. Ansari, Evaluation of wear and corrosion resistance of pure Mg wire produced by friction stir extrusion, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 6, pp. 1847−1855, 2015.

[15] X. Li, W. Tang, A. P. Reynolds, Strain and texture in friction extrusion of aluminum, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 229, No. 1, pp. 191-198, 2016.

[16] R. Abdi Behnagh, R. Mahdavinejad, Production of wire From AA7277 aluminum chips via friction-stir extrusion (FSE), *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 45, No. 4, pp. 1484−1489, 2014.

[17] R. K. Roy, *Design of Experiments Using the Taguchi Approach*, *16 Steps to Product and Process Improvement,* pp. 286-317, New York, John Willey & Sons, 2001.

[18] Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, T. Hashimoto, S. Jogan, Microtexture in the friction-stir weld of an aluminum alloy, *Metallurgical and Materials Transactions*,Vol. 32, No. 4, pp. 941-948, 2001.

[19] K. Tahmasbi, M. Mahmoodi, Investigation of the effective parameters on the mechanical and structural properties of aluminum wire sample fabricated by friction stirextrusion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 78-84, 2017. (in Persian فارسی)

[20] M. A. Ansari, E. Sadeqzadeh Naeini, M. K. Besharati givi, G. H. Faraji, Theoretical and experimental investigation of the effective parameters on the microstructure of magnesium wire produced by friction stir extrusion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 346-352, 2015. (In Persian فارسی)

[21] M. A. Ansari, R. Abdi Behnagh, M. Narvan, Optimization of friction stir extrusion (FSE) parameters throught tagochi technique, *The Indian Institute of Metals*, Vol. 69, No. 7, pp. 1351–1357, 2016.

[22] W. Tang, X. Guo, J. C. McClure, L. E. Murr, A. Nunes, Heat input and temperature distribution in friction stir welding, *Journal of Materials Processing & Manufacturing Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 163 – 172, 1998.