مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دوره 15، شماره 6، ص‌ص 346-352

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تحلیلی و تجربی پارامترهای مؤثر بر ریزساختار سیم منیزیمی تولید شده به روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی

محمد علی انصاری[1]، عمادالدین صادق‌زاده نائینی[1]، محمد کاظم بشارتی گیوی[2]، قادر فرجی[3*]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی، ghfaraji@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 دی 1393
پذیرش: 28 فروردین 1394
ارائه در سایت: 19 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:
منیزیم
فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی
طراحی آزمایش
تحلیل واریانس

چکیده

فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی، فرآیندی نوین جهت بازیافت مواد فلزی است که توانایی تولید مواد نانومهندسی با خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب را دارا می‌باشد. نوآوری این روش، استفاده از حرارت اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک شدید برای سیلان مواد، آلیاژسازی مکانیکی و در نهایت تبدیل پودر و براده به قطعات قابل استفاده است. ریزساختار نمونه‌ها بر مبنای آزمون متالوگرافی تعیین و اندازه متوسط دانه برای 18 نمونه به‌دست آمده است. پارامترهای آزمایش با استفاده از اصول طراحی آزمایش دو عاملی و تحلیل واریانس مورد بررسی قرار گرفته و برمبنای نتایج تجربی بدست آمده صحت‌سنجی شده است. در این پژوهش تأثیر سرعت دورانی در سه سطح و سرعت پیشروی در دو سطح بر ریزساختار سیم تولید شده به روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفته است. با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش به شیوه‌ی عاملی کامل، رابطه‌ای جهت پیش‌بینی اندازه دانه برحسب پارامترهای ذکر شده ارائه شده است. هم‌چنین با استفاده از تئوری مانده‌ها، نمودار احتمال نرمال و روند تغییر مانده‌ها، اثر ورود خطای سیستماتیک و قابلیت اطمینان به داده‌های حاصل از آزمایش بررسی شده است. ناحیه بهینه مشخص‌شده در نمودار کانتوری نشان می‌دهد که سرعت دورانی 250 rpm و سرعت پیشروی 14 mm/min، شرایط مناسب برای ایجاد اندازه متوسط دانه کمینه و استحکام بیشینه را فراهم می‌کند. لازم به‌ذکر است که تحلیل واریانس نشان می‌دهد که پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و اثر تقابلی سرعت دورانی و سرعت پیشروی به‌ترتیب تأثیر معناداری بر خروجی اندازه متوسط دانه سیم تولیدی می‌گذارد.

Theoretical and Experimental Investigation of the Effective Parameters on the Microstructure of Magnesium Wire Produced by Friction Stir Extrusion

Mohammad Ali Ansari, Emadoddin Sadeqzadeh Naeini, Mohammad Kazem Besharati Givi, Ghader Faraji*

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, ghfaraji@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 January 2015
Accepted 17 April 2015
Available Online 09 May 2015

Keywords:
Magnesium
Friction Stir Extrusion
Design of Experiments
Analysis of Variance

ABSTRACT

Friction Stir Extrusion (FSE) is a modern one step process with high efficiency for conversion and recycling of materials which is capable of producing Nano-engineered material via production with good deformability, mechanical and physical properties. The novelty of this production technique is the utilization of frictional heat and severe plastic deformation for material flow mechanical alloying and finally, amendment of powder, chips and other recyclable scraps directly to useful products. Sample's microstructure was revealed and average grain size was gained for 18 samples. Experimental parameters by use of design of experiments for two factors and analysis of variance were investigated and were validated by the use of experimental results. In this study, the effect of rotational speed in 3 levels and plunge rate in 2 levels was examined on microstructure of produced wires via FSE process. Based on process parameters, an equation for grain size prediction was presented using full factorial design of experiment. Furthermore, normal possibility diagram and residual versus order based on residual theorem were evaluated for systematic error entry and reliability of experimental results. The efficient region on contour diagram reveals that suitable condition of minimum grain size and maximum strength occurred at 250 rpm for rotational speed and 14 mm/min for feed rate. It should be noted that analysis of variance showed that rotational speed, feed rate and interaction of rotational speed and feed rate, respectively, have a meaningful effect on the grain size of produced wire.

1- مقدمه

منیزیم و آلیاژهای آن امروزه در صنعت خودروسازی، هوافضا و سازه‌های فلزی بسیار پرکاربرد می‌باشد. دلیل استفاده بسیار از فلز منیزیم استحکام قابل قبول، چگالی پایین، خواص مکانیکی مناسب، ماشین‌کاری خوب، شکل‌پذیری سرد و رسانش حرارتی مناسب می‌باشد [1]. به دلیل ماشین‌کاری عالی منیزیم، حجم براده‌های تولیدی منیزیم بالا بوده و نیاز به

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. A. Ansari, E. Sadeqzadeh Naeini, M. K. Besharati Givi, Gh. 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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.18.4]

بازیافت دارد. بازیافت براده‌های منیزیم به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم (سنتی) انجام می‌شود. در روش سنتی بازیافت، براده‌های ناشی از ماشین‌کاری منیزیم با حرارت ذوب شده و ریخته‌گری می‌گردد. این روش به دلیل مصرف بالای انرژی و اکسید بالای منیزیم مقرون به صرفه نیست. در روش مستقیم بازیافت، براده‌های منیزیم بصورت یک فرآیند مستقیم به مواد با ساختار مناسب تبدیل می‌گردد [2]. این روش ابتدا توسط چینو و همکارانش در سال 2006 پیشنهاد گردیده است [3]. در روش مستقیم بازیافت از هیچ‌گونه منبع انرژی حرارتی برای فرآیند استفاده نمی‌شود و در نتیجه آلودگی ایجاد شده برای بازیافت قراضه کاهش می‌یابد [4]. روش‌های نیمه-جامد مستقیم بازیافت [4]، نظیر اکستروژن [5]، پرس-سرد [6]، پرس-گرم [7] و روش‌های تلفیقی [8] موجب بهبود ساختارهای تشکیل شده مواد بازیافتی می‌شود . به همین دلیل قطعاتی که با روش مستقیم بازیافت شده‌اند دارای استحکام بالا و ساختاری با دانه‌های یکنواخت می‌باشند [9]. فرآیند اکستروژن اصطکاکی فرآیند ترکیبی نیمه جامد از اکستروژن و اغتشاش است که توسط انجمن علمی جوش در سال 1993 ابداع گشت [10].

در فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی، ابزار چرخشی در تماس با براده‌های بازیافتی قرار گرفته که موجب تبدیل انرژی مکانیکی ابزار به انرژی گرمایی می‌گردد [11]. مواد مختلفی مانند منیزیم، آلومینیم [12] و تیتانیم را می‌توان با این روش بازیافت کرد. اخیراً بازیافت و تولید سیم آلومینیمی AA2050 و AA2195 با روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی توسط تانگ و رینولدز مورد بررسی قرار گرفته است [13]. این آزمایش عیوب مربوط به سیم و ارتباط عیوب با پارامترهای فرآیند را مورد بررسی قرار داده است.

در این تحقیق، پارامترهای فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی منیزیم که شامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی است با استفاده از اصول طراحی آزمایش و آمار مهندسی مورد بررسی قرار گرفته و برمبنای نتایج تجربی بدست آمده صحت سنجی شده است.

2- روند انجام آزمایش

2-1- طرح عاملی

بسیاری از آزمایش‌های مستلزم بررسی اثرهای دو یا چند عاملی است. بطور کلی، طرح های عاملی بیشترین کارایی را برای این نوع آزمایش دارند. منظور از طرح عاملی این است که در هر آزمایش کامل یا هر تکرار آزمایش، همه ترکیب‌های ممکن سطح های عامل‌ها بررسی شود. مثلاً، اگر a سطح از عامل A و b سطح از عامل B وجود داشته باشد، هر تکرار دربردارنده همه ab ترکیب تیمارهاست. بررسی و تحلیل نتایج تجربی فرآیندهای گوناگون با استفاده از روش طراحی آزمایش و تحلیل واریانس امکان بررسی پارامترهای مؤثر و تفسیر نتایج را فراهم می‌سازد [14].

شایان ذکر است که در این پژوهش یک آزمایش دو عاملی با عامل سرعت دورانی در سه سطح و سرعت پیشروی در دو سطح انجام شده است و سپس توسط تحلیل واریانس مورد ارزیابی قرار گرفته است.

2-2- فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی

در این آزمایش از دو قالب ثابت و متحرک استفاده شده است. قالب ثابت یا ماتریس بر روی میز دستگاه توسط گیره گرفته شده و قالب چرخنده‌ی بالایی یا سنبه که دارای سر پیچی شکل (برای هدایت حالت نیمه جامد منیزیم در فرآیند اکستروژن) بوده، دارای حرکت قائم به سمت پایین می‌باشد. هر دو قالب از فولاد H13 ساخته شده و شماتیک فرآیند در شکل 1 نمایش داده شده است.

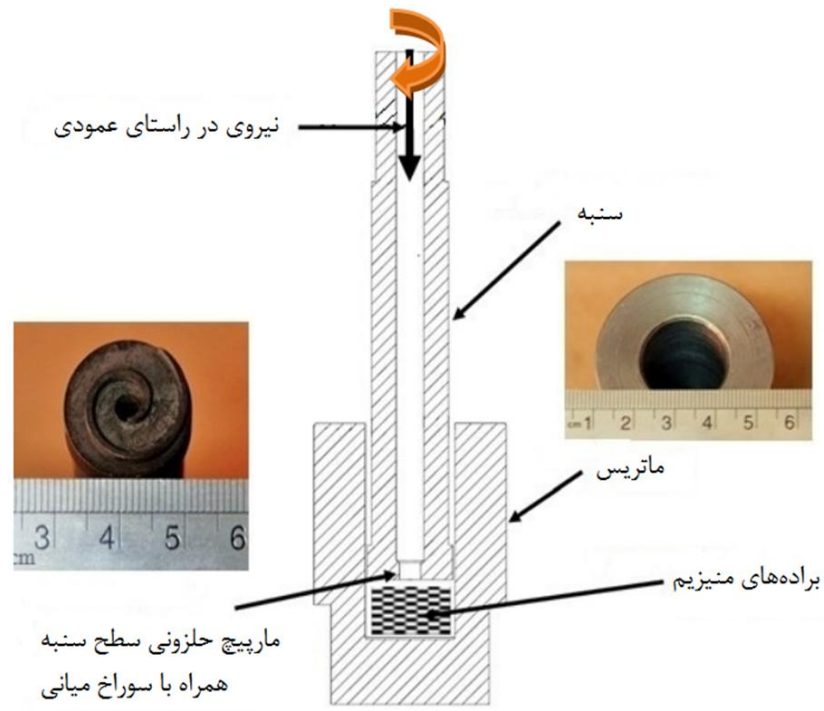
ماتریس دارای قطر 21 میلی‌متر و سنبه دارای قطر 20 میلی‌متر می‌باشد. سر پیچی شکل سنبه شبیه به طراحی ابزارهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[1] بوده که دارای سوراخ میانی با قطر 5 میلی‌متر در طول قالب است.

ماتریس بر روی میز دستگاه ثابت شده و حاوی براده‌های منیزیم می‌باشد. سنبه با چرخش در خلاف جهت عقربه‌های ساعت به داخل قالب ثابت پایینی هدایت می‌گردد. این فرآیند موجب اغتشاش براده‌های درون قالب شده که همراه با فشار عمودی که به آن اعمال می‌گردد، انرژی مکانیکی به گرمایی تبدیل می‌شود. سر پیچی شکل ابزار نیز موجب هدایت ماده‌های دچار تغییر شکل پلاستیک شده به سوراخ میانی قالب بالایی می‌گردد و عملیات اکستروژن انجام می‌گردد. زمان انجام گرفتن فرآیند بین 6 تا 10 دقیقه بوده که بسته به سرعت پیشروی و حجم ماتریس محدود می‌گردد. سرعت چرخشی و سرعت پیشروی استفاده شده در این آزمایش به ترتیب 180، 250 و 355 دور بر دقیقه و 14 و 20 میلی‌متر بر دقیقه است. سرعت برشی و پیشروی توسط دستگاه کنترل عددی تنظیم شده است.

2-3- انتخاب مواد

ماده استفاده‌شده در فرآیند، براده‌های منیزیم بوده که توسط ماشین‌کاری شمش منیزیم بدون ماده‌ی روان‌کار تهیه شده است. درصد جرمی شمش منیزیم استفاده شده در فرآیند در جدول شماره 1 ذکر شده است.

عرض و ضخامت میانگین براده‌های استفاده شده به ترتیب 4-1 و 0/2 میلی‌متر است. منیزیم استفاده شده در فرآیند در شکل 2 نمایش داده شده است.



شکل 1 اجزای مورداستفاده در فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی

جدول 1 ترکیب شیمیایی شمش منیزیم

مواد	آلومینیم	منیریم	مس	منگنز	روی	کلسیم	قلع
شمش منیزیم	0/001>	0/001>	0/006	0/03	0/005	0/005	0/002<

1- Friction Stir Welding (FSW)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.18.4]

شکل 2 براده‌های منیزیم استفاده شده در فرآیند اکستروژن

2-4- آزمایشات متالوگرافی و اندازه‌گیری اندازه دانه

میکروساختار قطعات به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری بعد از فرآیند اکستروژن مورد بررسی قرار گرفته است. ساخت نمونه‌ها برای بررسی ریز ساختاری به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM E407-07 [15] و ASTM E3-11 [16] انجام شده است. برش نمونه‌ها عمود بر راستای اکستروژن با استفاده از دستگاه وایرکات انجام گردیده و سپس نمونه‌ها با استفاده از دستگاه، مانت سرد شده و عملیات سنباده زنی با کاغذهای سنباده از جنس سیلیسیم کارباید از شماره های 180 تا 1000 آغاز شده است. کاغذ سنباده‌های 800 و 1000 بعنوان مرحله سنباده‌زنی نهایی بوده و به ترتیب معادل خمیر الماس 5 و 10 میکرون می‌باشند، با این تفاوت که تغییرشکل ایجاد شده در سطح نمونه‌ها، در صورت استفاده از این گرید کاغذ سنباده کاهش و صافی سطح نهایی بهتری نسبت به استفاده از خمیر الماس به وجود می‌آورند که در نتیجه آن عملیات مرحله پولیش تسهیل می‌گردد. لازم به ذکر است که از پاشش آب در تمامی مراحل بعنوان سردکننده باید اجتناب گردد. پولیش مکانیکی با استفاده از نمدی از جنس پارچه بدون پرز و با استفاده از خمیر الماس 1 میکرون صورت می‌پذیرد. زمان انجام پولیش مکانیکی تقریباً بین 1 تا 2 دقیقه می‌باشد. عملیات پولیش نهایی نمونه‌ها با استفاده از پودر اکسید آلومینیم[1] به همراه آب مقطر بر روی یک نمد با پرز کوتاه انجام پذیرفته است. پس از اینکه سطح نمونه‌ها بدون خراش و کاملاً آیینه‌ای شد، عملیات اچ کردن در دمای اتاق انجام می‌گیرد. محلول اچانت برای فلز منیزیم ، استیک پیکرل[2] (5 میلی‌لیتر استیک اسید[3]، 6 گرم پیکریک اسید[4]، 10 میلی‌لیتر آب و 100 میلی‌لیتر اتانول[5]) می‌باشد. در نهایت با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی ریزساختاری روی نمونه‌ها انجام شده است. متوسط اندازه دانه‌ها نیز با استفاده از روش خطی محاسبه می‌شود[17].

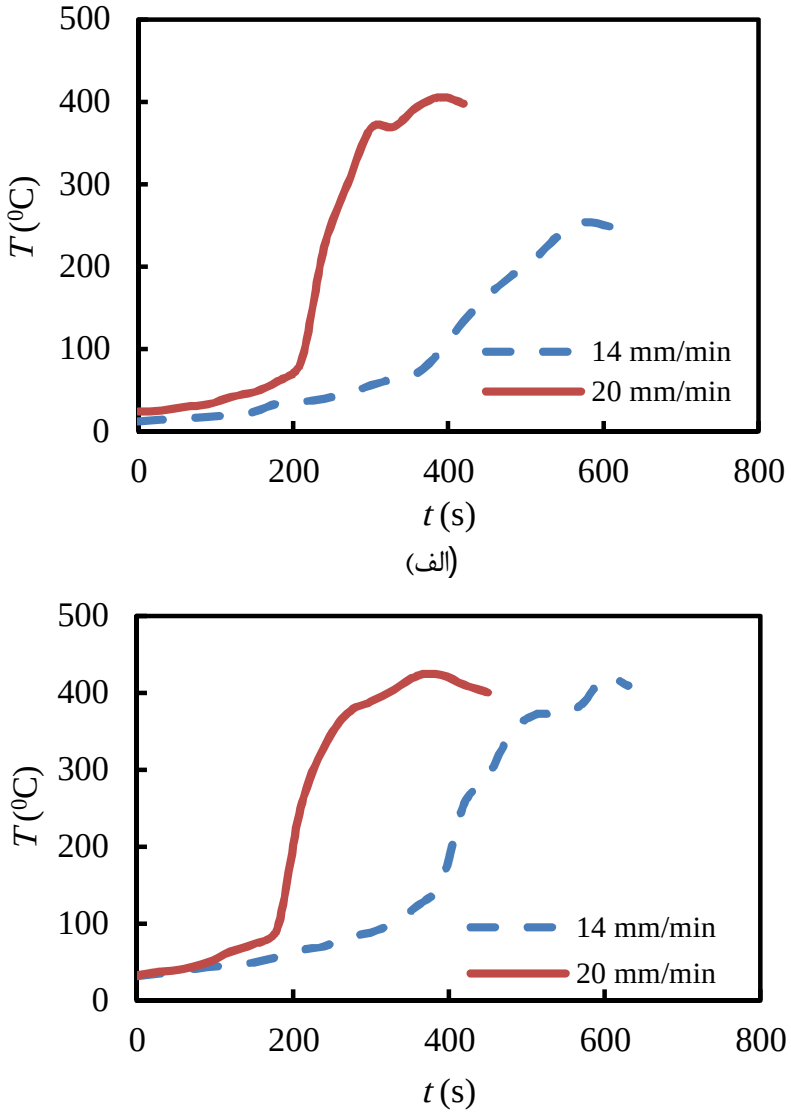
3- نتایج تجربی

3-1- آنالیز حرارتی

هدف از کنترل دمایی فرآیند بررسی اثر دما بر تغییر خواص مکانیکی و متالورژیکی سیم‌های تولید شده است. تغییرات دمایی در طول پروسه‌ی اکستروژن توسط ترمومتر اینفرارد در نقطه میانی ماتریس و با فاصله‌ی مشخص مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. نمودار دما بر حسب زمان در طول فرآیند اکستروژن در شکل 3 برای سرعت 14 میلی‌متر بر دقیقه نمایش داده شده است. بیشینه دمای تمام نمونه‌ها برای سرعت پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه بالاتر از سرعت پیشروی 14 میلی‌متر بر دقیقه است که ناشی از نرخ تغییر پلاستیک شدید در این سرعت پیشروی است.

انرژی حرارتی تولید شده در فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی از تماس سر حلزونی شکل سنبه با براده‌های منیزیم و هم‌چنین تماس براده‌های منیزیم با اجزای قالب حاصل می‌گردد. میزان حرارت تولید شده بر کیفیت سطح و میانگین اندازه دانه سیم‌ها تأثیر می‌گذارد.

با توجه به نمودارهای دمایی می‌توان دریافت که ماکزیمم دمای ایجاد شده در طول فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی 0/8 دمای ذوب منیزیم می‌باشد. هم‌چنین با توجه به نمودارها مشخص است که هرچه سرعت دورانی



(الف)

(ب)

(ج)

شکل 3 نمودار دما بر حسب زمان الف) سرعت دورانی 180 دور بر دقیقه ب) سرعت دورانی 250 دور بر دقیقه ج) سرعت دورانی 355 دور بر دقیقه

1- Al2O3
2- Acetic picral
3- Acetic Acid
4- Picric Acid
5- Ethanol

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.18.4]

افزایش یافته است، برای سرعت‌های پیشروی مشابه دما نیز افزایش یافته است. افزایش دما موجب، نرم شدگی و تغییر پلاستیک براده‌های منیزیم می‌شود که دلیل اصلی اکستروژن نیز همین اصل است. لازم به ذکر است حرارت بیش از اندازه نیز موجب بزرگ شدگی دانه‌ها شده و خواص مکانیکی نمونه‌ها را تخریب می‌کند.

3-2- بررسی ریزساختار نمونه‌ها

شکل 4 تصاویر ریزساختار فلز خام و دانه‌بندی تشکیل شده در مرکز سیم‌های تولید شده با سرعت دورانی و سرعت پیشروی مختلف را نشان می‌دهد. ریزساختار فلز خام در شکل 4-الف نشان داده شده است. مقایسه‌ی بین تصویر فلز خام با نمونه‌های بدست آمده از اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی نشان دهنده‌ی آن است که دانه‌های تشکیل شده در سیم‌ها بهبود یافته‌اند که ناشی از تبلور مجدد است. تبلور مجدد دانه‌ها که در طول فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی شکل می‌گیرد، تبلور مجدد دینامیک نامیده می‌شود [18]. شکل‌های 4-ب و 4-ج به ترتیب نشان دهنده ریزساختار سیم‌های تولیدی با سرعت دورانی 180 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 14 و 20 میلی‌متر بر دقیقه است. هر دو سیم با سرعت دورانی پایین تولید شده است. در این دو نمونه نسبت به قطعه خام، دانه‌ها کوچک شده و بهبود یافته است. شکل‌های 4-د و 4-ه به ترتیب بیانگر ریزساختار سیم‌های تشکیل شده با سرعت دورانی 250 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 14 و 20 میلی‌متر بر دقیقه است. شکل‌های 4-و و 4-ز نیز به ترتیب نشان دهنده‌ی ریزساختار ایجاد شده با سرعت دورانی 355 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 14 و 20 میلی‌متر بر دقیقه است.

هر دو سرعت 250 و 355 دور بر دقیقه دارای ریزساختاری بدون عیب و حفره بوده که در آن دانه‌ها بهبود یافته‌اند. تصاویر نشان داده‌شده از نمونه‌ها دارای ساختاری یکنواخت است و شامل نواحی دوقلویی می‌باشد. فرآیند مکانیکی ناشی از حرکت ابزار باعث ایجاد نیروی برشی در فرآیند اکستروژن می‌گردد و به دلیل آنکه فلز منیزیم دارای ساختار هگزاگونال فشرده[1] می‌باشد نواحی دوقلویی تشکیل می‌شوند. دوقلویی معمولاً در فلزات با ساختار هگزاگونال فشرده و مکعب مرکز پر[2] تشکیل می‌شود. ناگفته نماند که تغییر شکل در فلزات به دو روش حرکت نابجایی و تشکیل دوقلویی انجام می‌گیرد[18].

4- روش مطالعه

در این مطالعه قرار است به دو سوال زیر پاسخ داده شود:

1.- پارامترهای سرعت پیشروی و سرعت دورانی چه تأثیری بر ریزدانه شدن و اندازه دانه دارد؟

2.- آیا می‌توان با انتخاب درست این دو پارامتر به حداکثر استحکام ماده تولیدی به این روش دست یافت و مقادیر این پارامترها چه خواهد بود؟

پاسخ به این دو سوال وضعیت فرآیند را به‌طور کامل مشخص می‌کند. با مطالعه و تحلیل طرح عاملی ارائه شده و با تعداد آزمایش اندک به‌راحتی می‌توان پارامترهای غیرمؤثر را کنار گذاشته و با انجام آزمایش‌های بیشتر روی پارامترهای مؤثر می‌توان به یک طراحی محصول مقاوم دست یافت.

4-1- بررسی اندازه متوسط دانه‌ها

اندازه‌ی دانه‌ها تعیین کننده‌ی خواص مکانیکی فلزات می‌باشند. در فلزات هر چه دانه‌ها کوچکتر شوند مقاومت کششی افزایش و چکش پذیری فلز بهبود می‌یابد. اندازه متوسط دانه برای هر نمونه در جدول 2 نمایش داده شده است. اندازه متوسط دانه برای هر نمونه توسط روش تقاطع یا خطی محاسبه شده است که بر طبق استاندارد ASTM E 112-82 و ASTM E 112-98 می‌باشد. دامنه‌ی اندازه دانه برای نمونه‌ها بین 1/5 تا 61 میکرومتر می‌باشد. مقادیر اندازه متوسط دانه در شکل 5 به‌صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است.

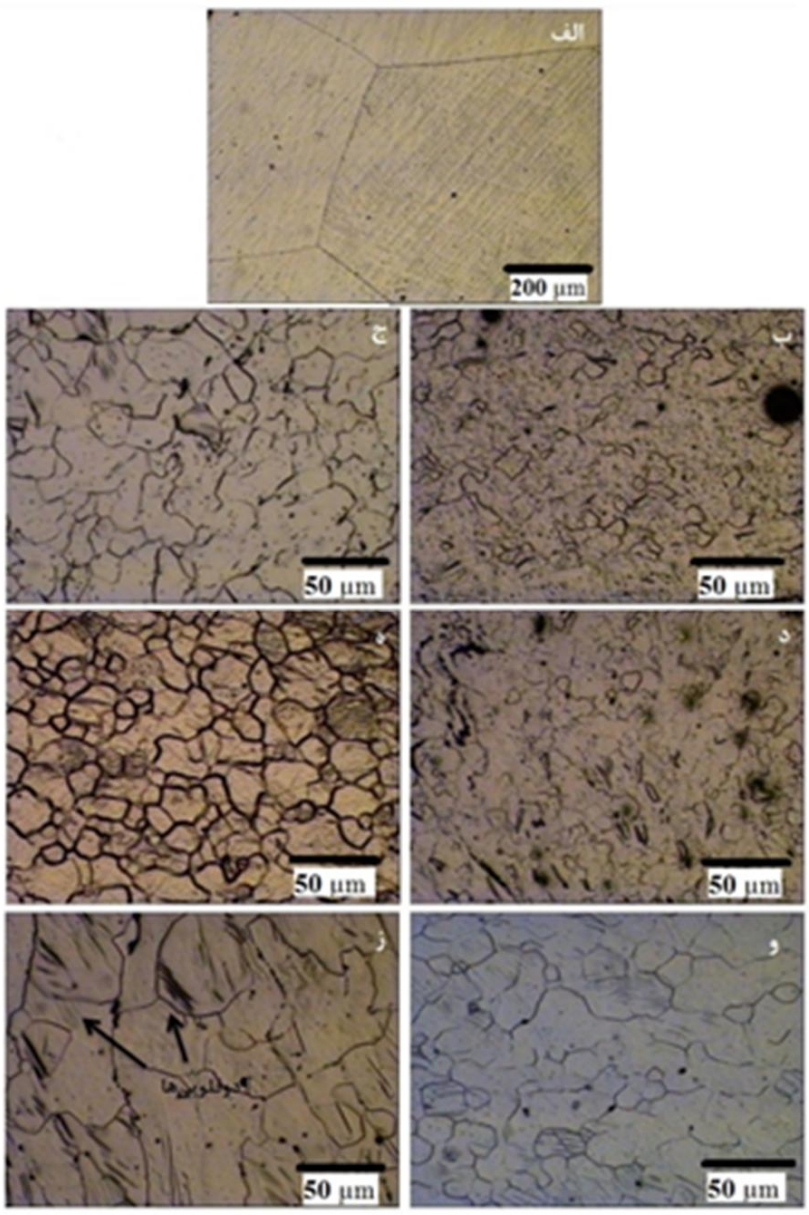
4-2- تحلیل واریانس[3]

تحلیل واریانس برای شناسایی پارامترهای آزمایش و اثر پارامترها مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از تحلیل واریانس بررسی اهمیت پارامترهای آزمایش و تأثیر آن بر اندازه‌ی دانه‌ها می‌باشد. نتایج تحلیل واریانس برای بررسی اندازه متوسط دانه در جدول 3 آورده شده است. در این میان مقدار p و عدد فیشر برای تعیین میزان تأثیر پارامترها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ابتدا اثر عامل‌های اصلی و عامل‌های تقابلی محاسبه شده است. به عنوان مثال اثر عامل A با تفاوت میانگین پاسخ ها در بالاترین سطح پارامتر و پایین ترین آن برابر است[19].

در ادامه و در روش سوم بررسی می شود که آیا این پارامترها واقعاً بر تابع هدف تأثیرگذار هستند و آیا پارامترهای مؤثر دیگر وجود ندارد. برای این‌که پارامترهای تأثیر گذار باشند دو روش وجود دارد:

1- مقدار P از 0/05 کوچکتر باشد.

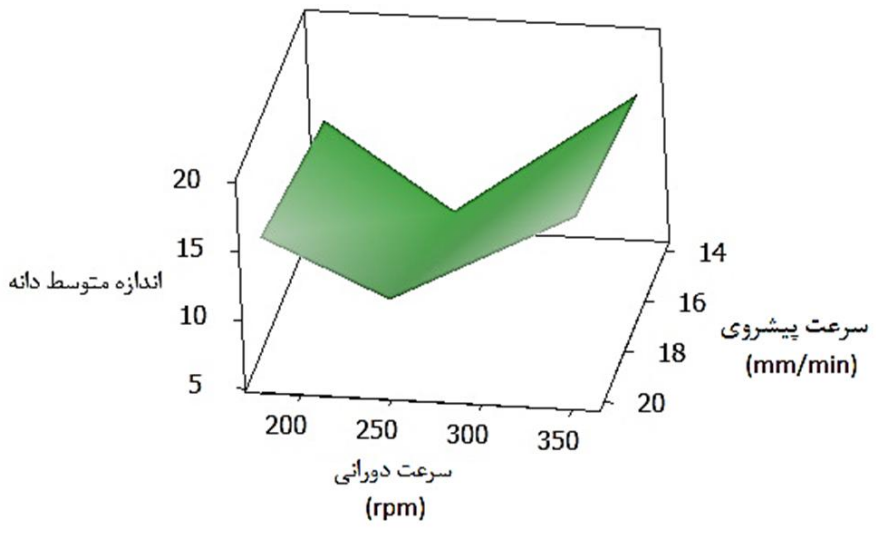
2- مقدار عدد فیشر از آن‌چه در جدول 3 با توجه به پارامترها مشخص می‌شود، بزرگتر باشد.



شکل 4 نمایش ریزساختار تشکیل شده در قطعه خام و نمونه‌ها

1- Hexagonal Closed Pack (HCP)
2- Body Centered Cubic (BCC)
3- Analysis of variance (ANOVA)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.18.4]



شکل 5 نمودار سه‌بعدی اندازه متوسط دانه بر حسب سرعت دورانی و سرعت پیشروی

مقادیر P نشان داده شده در جدول 3 در هرسه حالت، کمتر از 0/05 شده است. سرعت دورانی و سرعت پیشروی هردو با سه رقم اعشار مقدار صفر اختیار کرده‌اند که نشان از تأثیر بالای این دو پارامتر دارد. اثر متقابل نیز با فاصله مناسبی از 0/05 اثر بالای خود را، در مقیاس کمتر نسبت به دو پارامتر فوق نشان می‌دهد.

از طرف دیگر یافتن پارامترهای مؤثر را از طریق عدد فیشر نیز می‌توان بررسی کرد. مقادیر عدد فیشر از جدول مرجع با توجه به سطح معنی‌دار بودن (که 0/05 اختیار شده است) و درجه آزادی پارامتر و خطا بصورت رابطه (1) حاصل شده است.

$$f_{0.05,1,12} = 4.75 \quad , \quad f_{0.05,2,12} = 3.89 \qquad (1)$$

بنابراین با توجه به این که عدد فیشر هر پارامتر از عدد فیشر مرجع متناظر با آن بزرگتر است، هر سه پارامتر در این روش پارامتر مؤثر ارزیابی می‌شوند.

5- تحلیل نتایج

باتوجه به این‌که سطح معنادار بودن برای α، 0/05 درنظر گرفته شده است، مقادیر حاصل از تحلیل واریانس نشان می‌دهد که پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و اثر متقابل، پارامترهای تأثیرگذار بر ریزدانه‌شدن سیم تولیدی با استفاده از فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی است.

5-1- تحلیل اثرات اصلی

شکل 6 نشان دهنده اثرات پارامترهای اصلی بر اندازه متوسط دانه ریزساختار تشکیل شده است. با توجه به شکل 5، با افزایش سرعت دورانی از 180 دور بر دقیقه به 250 دور بر دقیقه، دانه‌های تشکیل شده ریزتر می‌گردند که دلیل آن افزایش تغییر شکل مواد است که همراه با افزایش مکان‌های جوانه‌زنی می‌باشد. افزایش مکان‌های جوانه‌زنی ناشی از تغییر شکل شدید ماده است که موجب انتقال انرژی بیشتر به براده‌ها می‌گردد. هرچه مکان‌های جوانه‌زنی نیز افزایش می‌یابد، بزرگ شدن دانه‌ها محدود شده و موجب کوچکتر شدن دانه‌ها و بهبود خواص ماده می‌گردد.

با افزایش مجدد سرعت دورانی از 250 دور بر دقیقه به 355 دور بر دقیقه، انرژی حرارتی ناشی از اصطکاک افزایش یافته که موجب افزایش مجدد اندازه متوسط دانه‌ها می‌گردد. هم‌چنین با توجه به نمودار اثر اصلی سرعت پیشروی، نمونه‌ی تولید شده با سرعت پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه به دلیل تولید حرارت بیشتر دارای اندازه متوسط دانه بزرگتری نسبت به سرعت پیشروی 14 میلی‌متر بر دقیقه است. بنابراین با توجه به دو نمودار اثر اصلی، می‌توان دریافت که سرعت دورانی برابر 250 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 14 میلی‌متر بر دقیقه دارای کمینه اندازه دانه و بیشینه استحکام می‌باشد.

5-2- تحلیل اثرات متقابلی

در شکل 7 نمودارهای اثرهای تقابلی نمایش داده شده است که در هر دو نمودار خط‌ها دو به دو با هم موازی نیستند و این مسأله نشان دهنده موجود بودن اثر تقابلی است. از طرف دیگر میزان افزایش یا کاهش اندازه دانه بر حسب سرعت پیشروی وابسته به سرعت دورانی است. درحقیقت ترکیب سرعت دورانی و سرعت پیشروی تعیین‌کننده مقدار اندازه متوسط دانه است.

5-3- فرمول رگرسیون

برای محاسبه معادله رگرسیون ابتدا باید معادله‌ای که شامل تمام ضرایب و عوامل بحرانی و غیر بحرانی است، حاصل شود. سپس متناسب با جدول تحلیل واریانس و بعد از مشخص شدن عوامل بحرانی و مهم، معادله به‌دست آمده اصلاح و معادله اصلی رگرسیون که تنها شامل اثر عوامل بحرانی و تأثیرگذار است نوشته می‌شود. درنهایت معادله رگرسیون اندازه متوسط دانه در رابطه (2) ارائه شده است.

اندازه متوسط دانه = - 3/15004 + (0/03152 × سرعت دورانی) + (0/651838 × سرعت پیشروی) - (0/000601504 × سرعت‌پیشروی × سرعت دورانی) (2)

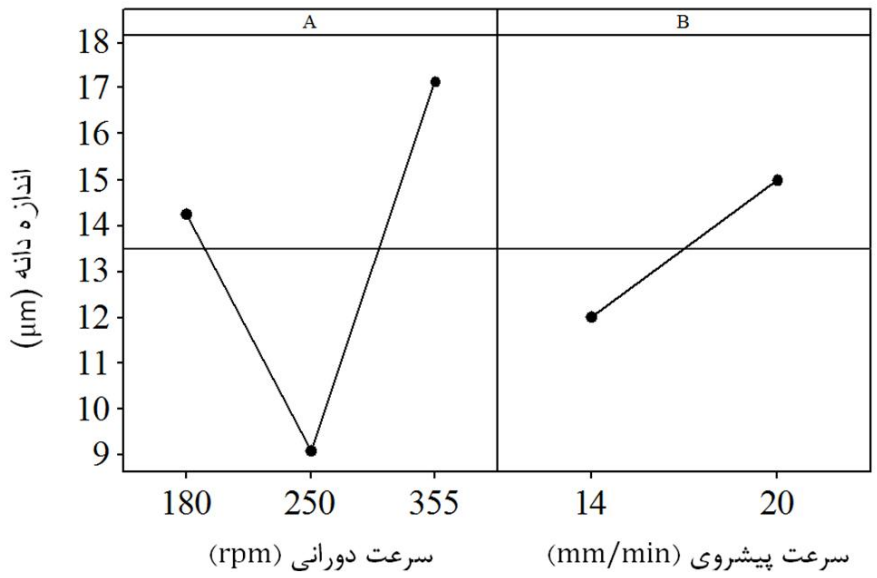
جدول 2 اندازه متوسط دانه

سرعت دورانی rpm	سرعت پیشروی mm/min14 اندازه متوسط دانه (µm)	سرعت پیشروی mm/min20 اندازه متوسط دانه (µm)
180	12/3	14/9
	13/1	15/4
	13/8	16
250	7/7	10/9
	6/8	11/4
	6/1	11/8
355	15/9	17/6
	16/1	18/2
	16/4	18/7

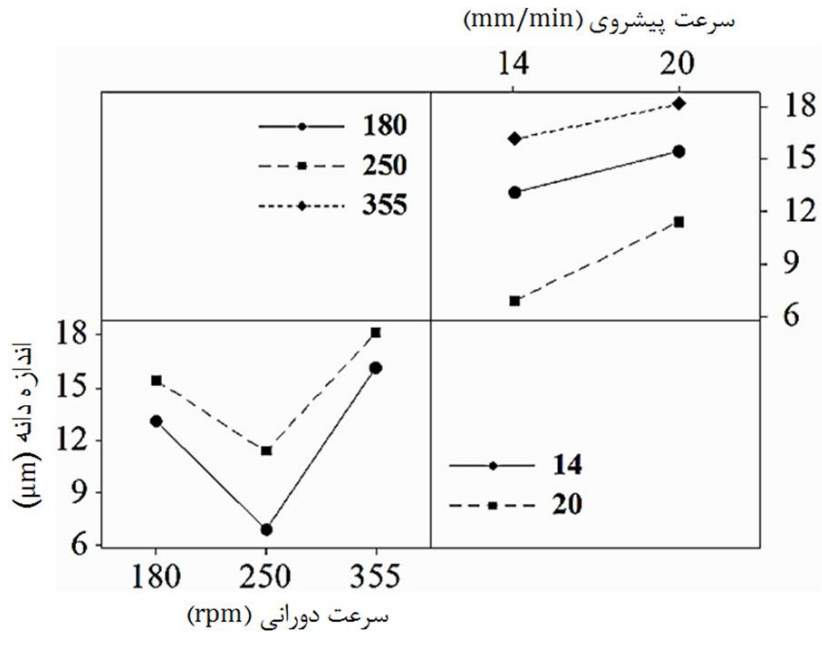
جدول 3 نتایج تحلیل واریانس

پارامتر	درجات آزادی	مجموع مربعات تنظیم شده	مجموع متوسط مربعات	عدد فیشر	مقدار p
سرعت دورانی	2	198/59	99/30	286/4	0/000
سرعت پیشروی	1	39/61	36/61	114/3	0/000
اثر متقابل	2	5/37	2/69	7/75	0/007
خطا	12	4/16	0/35		
مجموع	17	247/73			

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.18.4]



شکل 6 نمودار اثرات اصلی بر اندازه متوسط دانه



شکل 7 نمودار اثرات متقابلی اندازه متوسط دانه

5-4- مانده‌ها

تحقیق درباره تخلف از فرض‌های اساسی و کفایت مدل، از طریق بررسی مانده‌ها میسر است. مانده مربوط به مشاهده k ام در تیمار i از عامل A و تیمار j از عامل B، از رابطه (3) پیروی می کند :

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ij} \quad (3)$$

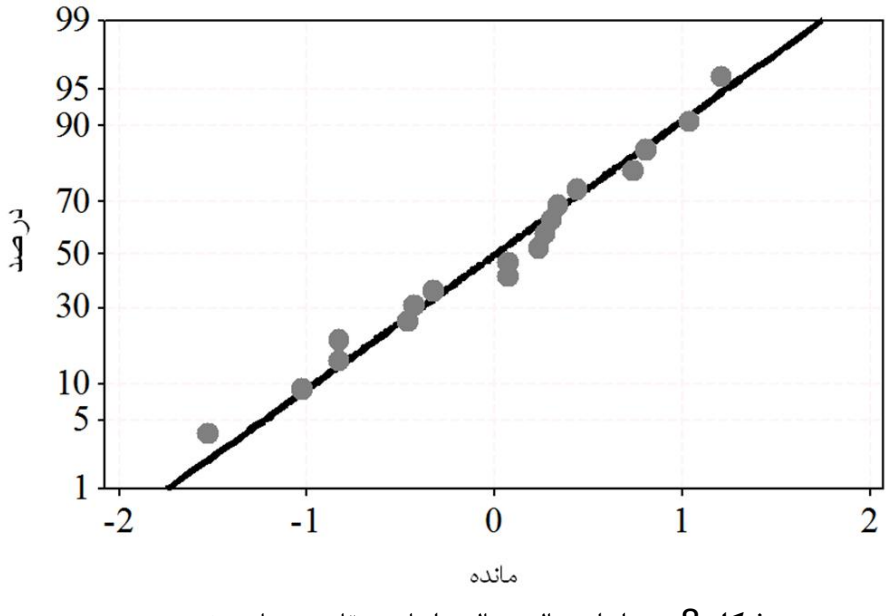
که $\bar{y}_{ij}$ مقدار مشاهده شده توسط مدل در تیمار i از عامل A و تیمار j از عامل B می باشد. بررسی مانده ها باید بخش خودکار هر تحلیل واریانس را در برگیرد. اگر مدل مناسب باشد، مانده‌ها باید بی‌ساختار باشد؛ یعنی، مانده‌ها نباید از هیچ الگوی مشهودی پیروی کنند. از طریق بررسی مانده‌ها بسیاری از انواع نبود کفایت مدل و تخلف از فرض‌های بنیادی را می‌توان کشف کرد. وارسی فرض نرمال بودن را می توان با ترسیم بافت نمای مانده‌ها انجام داد. رسم کردن نمودار احتمال نرمال مانده‌ها شیوه‌ای بسیار سودمند برای حصول این امر است. اگر توزیع خطای بنیادی، نرمال باشد، این نمودار به خط مستقیم شبیه خواهد بود ولی اگر خطاهای سیستماتیک و انحرافی وجود داشته باشد، داده پرتی در بین داده‌ها وجود خواهد داشت و نقاط از خط ترسیمی فاصله خواهند داشت. در ترسیم این خط باید توجه کنیم که تأکید بیشتری بر مقادیر مرکزی نمودار در مقایسه با مقادیر کرانی آن داشته باشیم. همانطور که در شکل 8 مشاهده می‌شود اکثریت مانده‌ها حول خط راست قرار دارند؛ به جز چند داده میانی که از خط راست تبعیت نمی کند و این مسأله موجب اندکی اختلال در فرض نرمال بودن خطاها می گردد. اما از آنجا که انحراف موجود شدید نیست، می توان از آن صرفنظر کرد و با تقریب خوبی فرض نرمال بودن را پذیرفت.

نمودار شکل 9 نیز تأییدی است بر این‌که مقادیر مانده از روند خاصی تبعیت نمی‌کنند و علل به‌وجود آورنده آن‌ها کاملاً اتفاقی‌اند و خطای سیستماتیک در آزمایش و داده‌های حاصل از آن وجود ندارد.

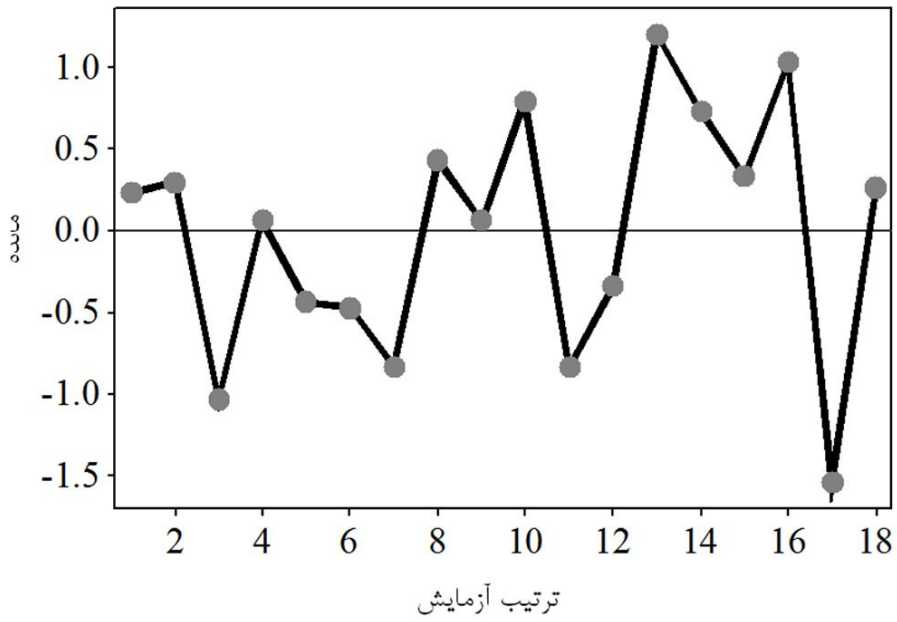
منحنی‌های کانتور در شکل 10، نشان‌دهنده این مطلب هستند که هرچه سرعت دورانی به سطح میانی و سرعت پیشروی به سطح پایین خود نزدیک شود، پارامتر متوسط اندازه دانه کاهش می‌یابد. در حقیقت می‌توان دریافت، ناحیه بین منحنی با مقدار اندازه متوسط دانه 8 میکرومتر و خط عمودی، که کمترین مقدار اندازه دانه را دارد ناحیه بهینه از نظر خواص مکانیکی می‌باشد.

6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش انجام گرفته یکی از جدیدترین روش‌های بازیافت فلزات با استفاده از فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی از نظر اندازه متوسط دانه ارزیابی شده است. براین اساس باتوجه به اصول طراحی آزمایش، طرح دوعاملی بر روی محصول تولیدی فرآیند اجرا شده است. عامل سرعت دورانی در سه سطح و عامل سرعت پیشروی در دوسطح و با سه تکرار صورت گرفته است. بر این مبنا 18 آزمایش انجام و تحلیل واریانس پارامترهای مؤثر شناسایی شده است. بنابراین پارامتر سرعت دورانی و سرعت پیشروی با تأثیر بالا و اثر تقابلی با تاثیر کمتر، باتوجه به تئوری فیشر و مقدار p اثر معنا داری دارند.

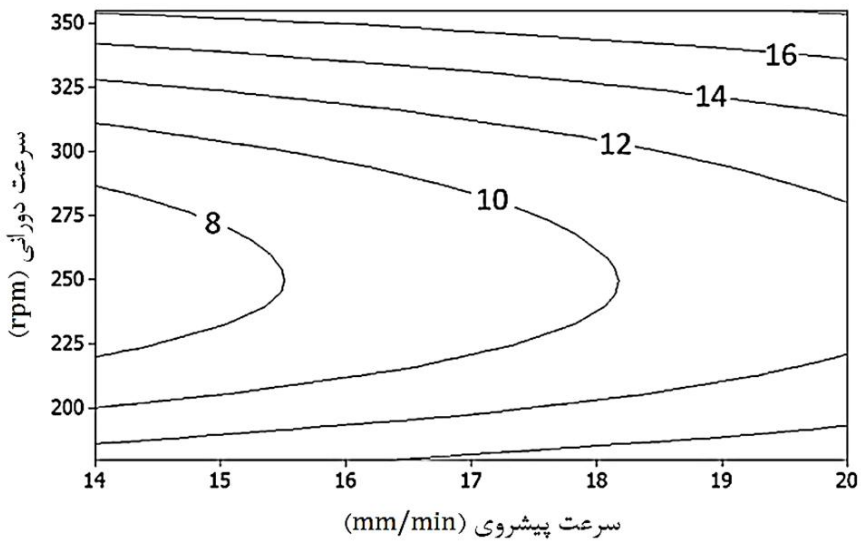


شکل 8 نمودار احتمال نرمال براساس مقادیر مشاهده‌شده



شکل 9 نمودار روند تغییر مانده‌ها در آزمایش‌ها

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.18.4]



شکل 10 نمودار کانتوری اندازه متوسط دانه برحسب سرعت پیشروی و سرعت دورانی

با توجه به اعداد به‌دست آمده از جدول 2، اندازه متوسط دانه نمونه‌ها در سرعت دورانی 250 دور بر دقیقه مقدار کمینه اختیار کرده‌اند. این درحالی است که در سرعت‌های دورانی 180 و 355 دور بر دقیقه، اندازه متوسط دانه بزرگ‌تر است. دلیل این پدیده مطابق شکل 3، آن است که حرارت تولیدی در سرعت 180 دور بر دقیقه کمتر از میزان لازم و در سرعت 355 دور بر دقیقه بیش از حد لازم بوده و موجب رشد نامطلوب دانه می‌گردد.

در بخش دیگری از این پژوهش ورود خطای سیستماتیک به آزمایش‌های انجام‌گرفته مورد بررسی قرار گرفته است. برهمین اساس با استفاده از تئوری مانده‌ها، نمودار احتمال نرمال و روند تغییر مانده رسم شده است. این نمودارها، نشان‌دهنده نرمال بودن مقادیر و عدم ورود جدی خطای سیستماتیک به آزمایش هستند. درنهایت با استفاده از نمودار کانتوری اندازه متوسط دانه، ناحیه بهینه برای دستیابی به کمینه اندازه متوسط دانه و بیشینه استحکام کششی مشخص شده است. در این ناحیه که اندازه متوسط دانه زیر 8 میکرومتر است سرعت دورانی بین 225 تا 280 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی بین 14 تا 15 میلی‌متر بر دقیقه پیشنهاد شده است.

7- مراجع

[1] T. Zhang, Z. Ji, S. Wu, Effect of extrusion ratio on mechanical and corrosion properties of AZ31B alloys prepared by a solid recycling process, *Materials & Design,* Vol. 32, No. 5, pp. 2742-2748, 2011.

[2] M.-l. HU, Z.-s. JI, X.-y. CHEN, Q.-d. WANG, W.-j. DING, Solid-state recycling of AZ91D magnesium alloy chips, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* Vol. 22, pp. s68-s73, 2012.

[3] Y. Chino, R. Kishihara, K. Shimojima, H. Hosokawa, Y. Yamada, C. e. Wen, H. Iwasaki, M. Mabuchi, Superplasticity and cavitation of recycled AZ31 magnesium alloy fabricated by solid recycling process, *Materials transactions,* Vol. 43, No. 10, pp. 2437-2442, 2002.

[4] J. Gronostajski, H. Marciniak, A. Matuszak, New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling, *Journal of materials processing technology,* Vol. 106, No. 1, pp. 34-39, 2000.

[5] M. Mabuchi, K. Kubota, K. Higashi, New recycling process by extrusion for machined chips of AZ91 magnesium and mechanical properties of extruded bars, JIM, *Materials Transactions,* Vol. 36, No. 10, pp. 1249-1254, 1995.

[6] R. Chiba, T. Nakamura, M. Kuroda, Solid-state recycling of aluminium alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 211, No. 11, pp. 1878-1887, 11, 2011.

[7] M. Nakanishi, M. Mabuchi, N. Saito, M. Nakamura, K. Higashi, Tensile properties of the ZK60 magnesium alloy produced by hot extrusion of machined chip, *Journal of materials science letters,* Vol. 17, No. 23, pp. 2003-2005, 1998.

[8] T. Ying, M.-Y. Zheng, X.-S. Hu, K. Wu, Recycling of AZ91 Mg alloy through consolidation of machined chips by extrusion and ECAP, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* Vol. 20, pp. s604-s607, 2010.

[9] Y. Chino, T. Hoshika, M. Mabuchi, Enhanced corrosion properties of pure Mg and AZ31Mg alloy recycled by solid-state process, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 435, pp. 275-281, 2006.

[10] W. Thomas, J. NICHOLAS, J. Needham, M. Murth, *Friction Stir Butt Welding international Patent Application* No PCT/GB92/02203, 1995.

[11] Southwire Company: Friction Stir Extrusion: A Revolutionary Solid-State Materials Synthesis and Recycling Technology for Energy-Efficient Sustainable Manufacturing, Oak Ridge, TN, DOE EERE Industry Technologies Program, Southwire Company and Oak Ridge National Laboratory, pp. 2011.

[12] R. A. Behnagh, R. Mahdavinejad, A. Yavari, M. Abdollahi, M. Narvan, Production of Wire From AA7277 Aluminum Chips via Friction-Stir Extrusion (FSE), Metallurgical and Materials Transactions B, pp. 1-6, 2014.

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

[14] H. M. N. M. Hoseinpour Gollo, G.H. Liaghat, S. Jelvani, Theoretical and Experimental Study of the Effects of Process Parameters on Bending Angle in Laser Bending process, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 10, No. 3, pp. 67-86, 2010 (In Persian).

[15] ASTM Standard #E407-07, *Standard test methods for microetching,* 2004.

[16] ASTM Standard #E3-11, *standard test methods for Sample grounding and polishing,* 2004.

[17] ASTM Standard #E8M-E384-11, *standard test methods for determining average grain size,* 2004.

[18] W. D. Callister, D. G. Rethwisch, *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*: John Wiley & Sons, 2012.

[19] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*: John Wiley & Sons, 2008.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.18.4]