



بررسی پارامترهای موثر بر فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸

مهرداد وحدتی^{۱*}، سید علیرضا رسولی^۲

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* vahdati@kntu.ac.ir، ۱۹۳۹۵-۱۹۹۹، صندوق پستی

چکیده

عموماً سوپرآلیاژها در رده مواد با قابلیت ماشین‌کاری ضعیف قرار دارند. حذف آلودگی‌های فلزی، لکه‌ها و اکسیدها بر عملکرد آن‌ها تاثیرگذار است. از جمله روش‌هایی که از میدان مغناطیسی برای کنترل براده‌برداری استفاده می‌کند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی است. از دیگر فواید بسیار مهم این روش جهت استفاده در پرداخت کاری مواد با استحکام بالا و شرایط خاص می‌باشد. یک دسته از این مواد سوپرآلیاژها می‌باشند. در این مقاله به بررسی فرآیند سایشی مغناطیسی بر روی سطح ورق سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۱۸ پرداخته شده است. از آنجا که فرآیند مذکور وابستگی شدیدی به پارامترهای موثر دارد، برخی از این پارامترها مانند درصد ذرات پودر ساینده، فاصله آهن‌ریا تا قطعه کار، سرعت دورانی کله‌گی ماشین ابزار فرز، نرخ پیشروی و سایز ذرات ساینده بر مقدار کاهش زبری متوسط سطح بررسی می‌گردند. طراحی آزمایش‌ها توسط روش‌های مبتنی بر آمار و توسط نرم‌افزار مینی‌تب صورت گرفته است. مدل سطح پاسخ، طرح پیشنهادی انجام آزمایش‌ها می‌باشد. از طریق آنالیز واریانس پارامترهای موثر و معادله رگرسیون حاکم بر فرآیند استخراج می‌گردد. همچنین شرایط بهینه پرداخت کاری سایشی مغناطیسی نیز قابل استخراج می‌باشد.

کلید واژگان: پرداخت کاری سایشی مغناطیسی، اینکونل ۷۱۸، آزمایش، شبیه‌سازی

Study of the parameters affecting the magnetic abrasive finishing (MAF) process of Inconel 718 super alloy

Mehrdad Vahdati*, Seyed Alireza Rasouli

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, vahdati@kntu.ac.ir

ABSTRACT

Super alloys are generally being indexed in the category of materials with poor machinability. Also, the removal of metal contamination stains and oxides affect the process performance. Magnetic Abrasive Finishing (MAF) is the method of using magnetic field to control the metal removal. Another important benefit of this process is polishing of materials with high strength. A bunch of these materials are super alloys. In this paper, the magnetic abrasive finishing of the nickel-base Inconel 718 super alloy have been studied. Since the process has severe dependence on the effective parameters, some of these parameters have been studied such as magnetic field strength, gap, rotational speed and feed rate on the value of the average roughness of surface. Design of experiments carried out by method based on statistics using Minitab software. Response surface model is proposed method for design of experiments. Regression equation of the process and the effective parameters were extracted from the variance analysis. The optimum conditions of magnetic abrasive finishing were also extracted.

Keywords: Experiment, Inconel 718, Magnetic Abrasive Finishing, Simulation.

۱- مقدمه

ماشین‌کاری شده نقش مهمی در خواص مکانیکی سوپرآلیاژ دارد. عموماً سوپرآلیاژها در رده مواد با قابلیت ماشین‌کاری ضعیف قرار دارند، زیرا همان خصوصیتی که این مواد را برای کار در دماهای بالا مناسب ساخته‌اند، باعث تضعیف قابلیت ماشین‌کاری آن‌ها شده‌اند. سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل که از خانواده فولادهای زنگ نزن هستند، در شرایط عملیات حرارتی یکسان آسان‌تر از سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت ماشین‌کاری می‌شوند. اکثر روش‌های معمول برای بهبود قابلیت ماشین‌کاری در سوپرآلیاژها مؤثر واقع نمی‌شوند. اصلاح آلیاژ و عملیات حرارتی به خاطر اثرات مضر که می‌توانند روی خواص مکانیکی داشته باشند، عموماً مؤثر نیستند [۲].

یکی از راه حل‌های ارائه شده، استفاده از فرآیندهای الکتریکی در ماشین‌کاری قطعات است. پس از به کارگیری مشخص شده است که این روش‌ها نیز چندان نتایج مطلوبی را بر جا نمی‌گذارند. به عنوان مثال در آلیاژهای پایه نیکل ماشین‌کاری شده به روش الکتروشیمیایی دیده شده است

سوپرآلیاژها، آلیاژهای پایه نیکل، پایه آهن و پایه کبالت هستند که معمولاً در دماهای بالاتر از ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شوند. سوپرآلیاژهای پایه آهن - نیکل مانند آلیاژ IN۷۱۸ از فن‌آوری فولادهای زنگ نزن توسعه یافته‌اند و معمولاً به صورت کار شده می‌باشند. یکی از ویژگی‌های مهم سوپرآلیاژها، وابستگی غیرعادی استحکام آن‌ها به دما است. در فلزات خالص و اکثر آلیاژها با افزایش دما استحکام کاهش پیدا می‌کند. این حالت در سوپرآلیاژهای استحکام یافته وجود ندارد [۱].

در ساخت قطعات سوپرآلیاژها از ماشین‌کاری استفاده می‌شود و بر روی هر قطعه‌ای به تعدادی مراحل ماشین‌کاری نیاز است. ماشین‌کاری سوپرآلیاژها در مقایسه با فولادها بر هزینه‌تر است. بخش زیادی از هزینه‌های ماشین‌کاری سوپرآلیاژها به خاطر سرعت برش‌کاری آن‌ها است که در حدود ۵ تا ۱۰ درصد سرعت برش‌کاری فولادها می‌باشد. شرایط سطحی قطعه

Please cite this article using:

M. Vahdati, S.A. Rasouli, Study of the parameters affecting the magnetic abrasive finishing (MAF) process of Inconel 718 super alloy, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 257-264, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

متصل شده‌اند. نیروی اعمالی بر ذرات مغناطیسی باعث نفوذ ذرات ساینده با سختی بالا (مانند اکسید آلومینیوم، کاربید سیلیسیم و...) در سطح قطعه‌کار می‌گردد. مقدار نیروی اعمالی و مقدار نفوذ در حد میکرو نیوتن و میکرو متر و حتی کمتر می‌باشد. با اعمال حرکت نسبی مابین جاروبک ساینده و قطعه-کار مکانیزم میکرو براده برداری صورت می‌پذیرد. با توجه به منعطف بودن جاروبک ساینده امکان پرداخت کاری هر سطحی با هرگونه پیچیدگی وجود دارد. استفاده از میدان مغناطیسی باعث اعمال نیروی یکنواخت بر سطح قطعه‌کار می‌گردد [۵].

تنش‌های برشی بسیار ناچیز به علت عمق نفوذ بسیار اندک، اعمال تنش‌های فشاری، کاهش حرارت ایجاد شده نسبت به سایر فرآیندهای پرداخت کاری از مزایای این روش می‌باشد. همچنین نسبت به روش‌های شیمیایی نیز آلودگی محیط زیست ایجاد نمی‌گردد.

در گذشته این فرآیند بیشتر بر سطوح فلزات فرومغناطیس صورت گرفته است [۶]. تحقیقاتی مبتنی بر انجام این فرآیند بر فلزات غیرفرومغناطیسی مانند فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ انجام شده است [۸،۷]. قطعاتی از جنس آلومینیوم، برنج، منیزیم و سرامیک نیز در تحقیقات گذشته بررسی شده‌اند [۹-۱۲]. در این مطالعه اثر فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی می‌گردد. پارامترهای موثر بر فرآیند و شرایط بهینه پرداخت-کاری سایشی مغناطیسی از نتایج این تحقیق می‌باشد.

۲- آزمایش‌ها

۲-۱- شبیه‌سازی و اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی (تسلا)

کارایی روش‌های سایشی مغناطیسی بر مواد فرومغناطیس نسبت به مواد غیر فرومغناطیس بیشتر می‌باشد. ایجاد مدار بسته مغناطیسی مابین قطب آهن‌ربا و فلز فرومغناطیس باعث تراکم بیشتر پودر ساینده مغناطیسی و نتایج مطلوب می‌گردد. امکان نگهداری پودر ساینده مغناطیسی در سرعت‌های بالای دورانی در این حالت وجود داشته و پودر بر سطح قطعه‌کار متمرکز می‌باشد. در واقع فلز فرومغناطیس مانند قطب مخالف آهن‌ربا عمل می‌کند. اما در فلزات غیرفرومغناطیس چنین حالتی رخ نمی‌دهد. جهت بهتر شدن نتیجه می‌توان از قرارگیری آهن‌ربا با قطب مخالف (نسبت به آهن‌ربا نصب شده بر کله‌گی فرز) در زیر قطعه‌کار استفاده کرد. اینکونل ۷۱۸ جزء مواد غیر فرومغناطیس با ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی نزدیک به ۱ می‌باشد. آنالیز شیمیایی اینکونل ۷۱۸ مور استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارایه شده است.

در جدول ۲ خصوصیات مکانیکی و فیزیکی این سوپرآلیاژ آورده شده است.

جدول ۱ آنالیز شیمیایی اینکونل ۷۱۸

اینکونل	%V	%W	%Fe	%Mo	%Cr	%Mn	%Al
۷۱۸	۰/۰۲	۰/۱۹۴	۱۵/۹۰	۱/۸۴	۱۷/۹۷	۰/۰۹۱	۰/۴۵۴
%Nb	%Ni	%Si	%Hf	%Ti	%Ta	%Cu	%Co
۴/۱۵	۵۷/۶	۰/۰۱۰	۰/۲۱۴	۱/۱۳	۰/۲۶۹	۰/۰۳۴	۰/۱۲۲

جدول ۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی اینکونل ۷۱۸

ضریب هدایت	نقطه چگالی	سختی	مدول	تنش
حرارتی	ذوب	(HV150)	الاسیسیته	تسلیم
(w/mk)	(oc)	(g.cm3)	(GPa)	(MPa)
۱۱/۲	۱۳۰۰	۸/۱۹	۳۷۰	۲۰۶
				۱۱۱۰

که استحکام خستگی به خاطر حذف تنش‌های فشاری سطحی در حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین پرداخت کاری سطوح سوپرآلیاژها نیز اهمیت فراوانی دارد. مواردی مانند آلودگی فلزی، لکه‌ها و اکسیدها و پوسته‌ها می‌توانند بر کارایی سوپرآلیاژها تأثیر بگذارند.

سطح قطعات ساخته شده از آلیاژهای مقاوم به حرارت پس از برخورد با ابزار برشی، قالب‌های شکل‌دهی، ابزار ماشین‌کاری و یا نگهدارنده‌های عملیات حرارتی به فلزات دیگری آلوده می‌شود. آلودگی‌های فلزی همیشه مضر نیستند، ولی وجود آن‌ها در بعضی از شرایط مخرب است. به‌عنوان مثال آلیاژ IN۷۵۰ ممکن است تحت تأثیر فلز روی باقی‌مانده از تماس با سطوح قالب-های کشش قرار نگیرد، اما ذرات ریز آلومینیوم در دماهای بالا با آلیاژ ترکیب شده و مقاومت خوردگی و استحکام ناحیه آلوده را کاهش می‌دهند [۳].

لکه‌ها لایه‌های بسیار نازک اکسیدی هستند که در بعضی از کاربردها مانند جوش کاری یا لحیم کاری سخت، باید از سطح قطعات حذف شوند. ویژگی اصلی سوپرآلیاژها نه تنها استحکام دما بالا بلکه مقاومت اکسیداسیون بالا می‌باشد. مقاومت اکسیداسیون با تشکیل اسید محافظ اکسید کروم و اکسید آلومینیوم به‌وجود می‌آید. اکسیدها گاهی پوسته نامیده می‌شوند، حتی زمانی که نسبتاً نازک و دارای خاصیت حفاظت‌کنندگی هستند. در واقع پوسته‌ها لایه‌های ضخیم‌تر اکسیدها هستند و حذف اکسیدها و پوسته‌ها از سطح برای بهبود کارایی قطعات انجام می‌گیرد.

اما جهت حذف موارد ذکر شده معمولاً در مواردی مانند آلودگی فلزی سعی بر این است که توسط روش‌هایی مانند افزودن روانکار یا مواد جدید پیش‌گیری صورت گیرد. در غیر این صورت جهت حذف از روش‌های شیمیایی و یا مکانیکی استفاده می‌شود. حذف آلودگی‌ها به روش شیمیایی یا مکانیکی باعث کاهش مقدار قابل توجهی از تنش‌های باقی‌مانده مفید می‌گردد و حتی ممکن است به جای آن‌ها تنش باقی‌مانده غیرمفید ایجاد شود. روش‌های شیمیایی حذف آلودگی‌های سطحی باعث واکنش بعضی از آلودگی‌ها با مواد شیمیایی تمیزکننده و خسارت بین دانه‌ای می‌شود. این نوع خسارت نه تنها ظاهر قطعه را نامناسب می‌سازد بلکه شکاف‌هایی در روی سطح ایجاد می‌کند که این شکاف‌ها عمر خستگی و خزش سوپرآلیاژها را کاهش می‌دهند. روش مؤثر برای حذف آلودگی فلزی سطح قطعات، تمیزکاری با مواد ساینده به روش‌های خشک و مرطوب مانند پولیش با مواد سرامیکی و تمیزکاری دورانی می‌باشد. تعیین روش‌های مکانیکی مناسب برای تمیزکاری قطعات، به عواملی نظیر شکل قطعه، کیفیت سطح تمام شده مورد نیاز و میزان خطای مجاز ابعاد بستگی دارد. در روش‌های حذف مکانیکی امکان حذف مقداری از فلز سطح قطعه نیز وجود دارد. پولیش دستی توسط نمد و ذرات ساینده مانند اکسید آلومینیوم از جمله روش‌های مکانیکی است. عدم امکان دسترسی پودر ساینده به تمامی نقاط در قطعاتی با شکل‌های پیچیده و یکنواخت نبودن نیروی وارده از جمله معایب این دسته از روش‌ها می‌باشد [۴].

از طرف دیگر استفاده از روش‌های پرداخت کاری تحت کنترل نیروی -مغناطیسی و توسط ذرات ساینده مغناطیسی در حال پیشرفت می‌باشد. در روش‌های پرداخت کاری سایشی مغناطیسی با اعمال میدان مغناطیسی توسط آهن‌ربا دائم، ذرات مغناطیسی به صورت زنجیروار به یکدیگر متصل می‌شوند. از کنار هم قرار گرفتن زنجیره‌ها، جاروبک مغناطیسی تشکیل می‌شود. ذرات ساینده سائز کوچکتری نسبت به ذرات مغناطیسی داشته و توسط روش‌های مکانیکی، متالورژی پودر (زینتر) و یا استفاده از روانکار به ذرات مغناطیسی

لازم به ذکر است میزان تاثیر آهنربا قطب مخالف به ابعاد آهنربا و فاصله آن تا قطعه کار نیز بستگی دارد. شرایط مورد استفاده در شبیه سازی و اندازه گیری در جدول ۳ آورده شده است. در اندازه گیری های صورت گرفته کلیه تجهیزات مورد استفاده به علت عدم تاثیر بر میزان چگالی شار مغناطیسی از مواد غیر فرومغناطیس تهیه شده اند. در شکل ۳ نتایج به دست آمده از اندازه گیری آورده شده است. همان طور که مشخص است هماهنگی با نتایج شبیه سازی وجود دارد. البته مقادیر شبیه سازی در بیشترین مقدار تفاوت ۲۸٪ بیشتر می باشد.

۲-۲- شرایط انجام آزمایش

به علت مشکل های استفاده از آهنربای الکتریکی جهت ایجاد میدان مغناطیسی از آهنربای دائمی نمودیم- بر- آهن استفاده شده است. جهت انجام آزمایش های از فیکسچر آلومینیومی جهت نگهداری آهنربا استوانه ای N۳۵ با ابعاد قطر ۲۵ mm و ارتفاع ۱۰ mm استفاده شده است. همچنین فیکسچر نگهداری قطعه کار اینکونلی از جنس تفلون می باشد. که در قسمت تحتانی محل نگهداری قطعه کار به صورت کشویی محلی جهت آهنربا قطب مخالف تعبیه شده است. نمونه های آزمایشی از جنس اینکونل ۷۱۸ با ابعاد (۳ mm × ۲۰ mm × ۶۰ mm) می باشند. تغییر در میزان زبری متوسط سطح به عنوان خروجی آزمایش ها مد نظر است. به همین علت قبل از اندازه گیری زبری سطح نمونه ها به مدت ۲۰ دقیقه در حمام آلتراسونیک^۱ حاوی استون قرار می گیرند. سپس در موقعیت مرکز نمونه های آزمایشی و در منطقه ای به طول ۵۰ mm و عرض ۳۰ mm در ۸ نقطه عملیات اندازه گیری زبری سطح توسط دستگاه زبری سنج (surtronic 3+) با طول کات آف ۰/۸ طبق استاندارد DIN EN ISO ۰۲۷۴:۱۹۹۸ انجام می شود.

با میان گیری مابین نتایج، مقدار زبری سطح متوسط نمونه های آزمایشی به دست می آید. جهت انجام آزمایش ها از دستگاه فرز ۳ محوره (CNC)^۲ استفاده شده است. در شکل ۴ نحوه انجام آزمایش ها به همراه تجهیزات نشان داده شده است.

روش پرداخت کاری سایشی مغناطیسی به پارامترهای متنوع و زیادی وابسته است (حدوداً ۱۴ پارامتر). بررسی همزمان این تعداد فاکتور نیاز به تعداد آزمایشات زیادی دارد که بررسی و کنترل خطاهای موجود نیز بسیار دشوار می باشد. در این مطالعه به کمک روش های مبتنی بر آمار، پارامترهای فاصله نمونه تا آهنربا (گپ)، سرعت دورانی، نرخ پیشروی، درصد ذرات ساینده و سائز ذرات ساینده بررسی شده اند. از روش آماری سطح پاسخ جهت تنظیم و تعیین تعداد آزمایش ها استفاده است. این روش تعداد آزمایش ها مورد نیاز را کاهش داده و به راحتی با آنالیز واریانس^۵ بر روی نتایج، می توان فاکتورهای موثر، نحوه تاثیر و شرایط بهینه را به دست آورد [۱۳].

جدول ۳ شرایط شبیه سازی و اندازه گیری

پارامترها	
نوع آهنربا	۳۵N
قطعه کار	IN۷۱۸
فیکسچر آهنربا	Al۷۰۷۵
گپ (فاصله بین آهنربا و قطعه کار)	۲mm

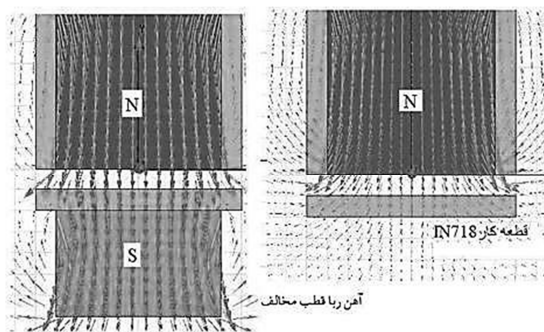
1. NdFeB
2. Bath ultrasonic
3. cut off
4. Computer numerical control(CNC)
5. Analysis of variance(ANOVA)

جهت بررسی اثر قرارگیری آهنربا مخالف از شبیه سازی و آزمایش ها استفاده شده است. در شبیه سازی توسط نرم افزار المان محدود ماکسول نتیجه قرارگیری آهنربا با قطب مخالف بر میزان متوسط چگالی شار مغناطیسی به دست آمده است. از طریق دستگاه تسلا متر نیز این تفاوت اندازه گیری شده و با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است. در شکل ۱، نحوه اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی توسط دستگاه تسلا متر (PHWVE) در محدوده ۲۰- تسلا به همراه آهنربا زیر قطعه کار نشان داده شده است.

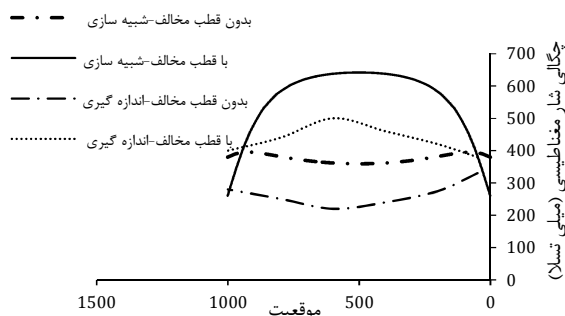
شکل ۲ نشان دهنده نحوه تاثیر قطب مخالف در بردار چگالی شار مغناطیسی است. همچنین در شکل ۳ در فاصله ۲ میلی متر از سطح آهنربا و در طول اینکونل ۷۱۸ (۱۶ mm) نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی (میلی تسلا) در هر دو حالت بدون قطب مخالف و با وجود قطب مخالف به دست آمده از شبیه سازی و اندازه گیری نمایش داده شده است.



شکل ۱ نحوه انجام اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی توسط تسلا متر



شکل ۲ بردار چگالی شار مغناطیسی در اینکونل ۷۱۸



شکل ۳ نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی (میلی تسلا) در اینکونل ۷۱۸ (شبیه سازی)

رسیدن به هدف به دست آمد که به همراه مقادیر درصد تغییرات زبری سطح در جدول ۶ آرایه شده است. برای جلوگیری از خطاهای احتمالی آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شده‌اند و از انجام آزمایش‌ها به ترتیب جدول خودداری شده است.

جدول ۵ مقادیر کد شده فاکتورهای ورودی آزمایش

فاکتورهای ورودی	$-\alpha$	۱-	۰	۱	$-\alpha$
گپ (mm)	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵
درصد وزنی ذرات ساینده (Wt%)	۱۰	۱۷/۵	۲۵	۳۲/۵	۴۰
سایز ذرات ساینده	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰
نرخ پیشروی (mm/min)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
سرعت دورانی اسپیندل (rpm)	۱۰۰	۶۰۰	۱۱۰۰	۱۶۰۰	۲۱۰۰

جدول ۶ آزمایش‌های انجام شده و مقادیر

شماره	گپ (mm)	درصد وزنی (%)	سایز ذرات (مش)	نرخ پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	Ra Δ (%)
۱	۱/۵	۱۷/۵	۶۰۰	۲۰	۱۶۰۰	۴۲/۶
۲	۲/۵	۱۷/۵	۶۰۰	۲۰	۶۰۰	۳۳/۸
۳	۱/۵	۳۲/۵	۶۰۰	۲۰	۶۰۰	۳۷/۶
۴	۲/۵	۳۲/۵	۶۰۰	۲۰	۱۶۰۰	۱۶/۶
۵	۱/۵	۱۷/۵	۱۰۰۰	۲۰	۶۰۰	۵۱/۵
۶	۲/۵	۱۷/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۶۰۰	۳۴/۶
۷	۱/۵	۳۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۶۰۰	۴۳/۹
۸	۲/۵	۳۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۶۰۰	۳۵/۰
۹	۱/۵	۱۷/۵	۶۰۰	۴۰	۶۰۰	۲۵/۱
۱۰	۲/۵	۱۷/۵	۶۰۰	۴۰	۱۶۰۰	۱۹/۱
۱۱	۱/۵	۳۲/۵	۶۰۰	۴۰	۱۶۰۰	۲۴/۸
۱۲	۲/۵	۳۲/۵	۶۰۰	۴۰	۶۰۰	۲۷/۹
۱۳	۱/۵	۱۷/۵	۱۰۰۰	۴۰	۱۶۰۰	۴۶/۵
۱۴	۲/۵	۱۷/۵	۱۰۰۰	۴۰	۶۰۰	۳۴/۹
۱۵	۱/۵	۳۲/۵	۱۰۰۰	۴۰	۶۰۰	۴۵/۱
۱۶	۲/۵	۳۲/۵	۱۰۰۰	۴۰	۱۶۰۰	۱۳/۴
۱۷	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۳۸/۷
۱۸	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۴۲/۶
۱۹	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۳۸/۷
۲۰	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۳۹/۱
۲۱	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۳۶/۸
۲۲	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۴۴/۵
۲۳	۱/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۴۸/۰
۲۴	۳/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۱۸/۹
۲۵	۲/۰	۱۰/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۳۳/۵
۲۶	۲/۰	۴۰/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۳۰/۱
۲۷	۲/۰	۲۵/۰	۴۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۳۱/۰
۲۸	۲/۰	۲۵/۰	۱۲۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۴۷/۴
۲۹	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۱۰	۱۱۰۰	۵۰/۹
۳۰	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۵۰	۱۱۰۰	۳۱/۹
۳۱	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۰۰	۲۹/۵
۳۲	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۲۱۰۰	۱۹/۲
۳۳	۲/۰	۲۵/۰	۸۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۴۶/۲



شکل ۴ انجام فرایند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر سطوح اینکونل

جدول ۴ ثابت‌های آزمایش

مقدار	پارامتر
IN۷۱۸	جنس قطعه کار
۴ گرم	مقدار پودر
۴۰۰ مش	سایز ذره آهن
کاربید سیلیسیم	ذره ساینده
SAE۳۰	روانکار
۵٪	نسبت درصد روانکار در پودر
N۳۵	نوع آهن‌ربا

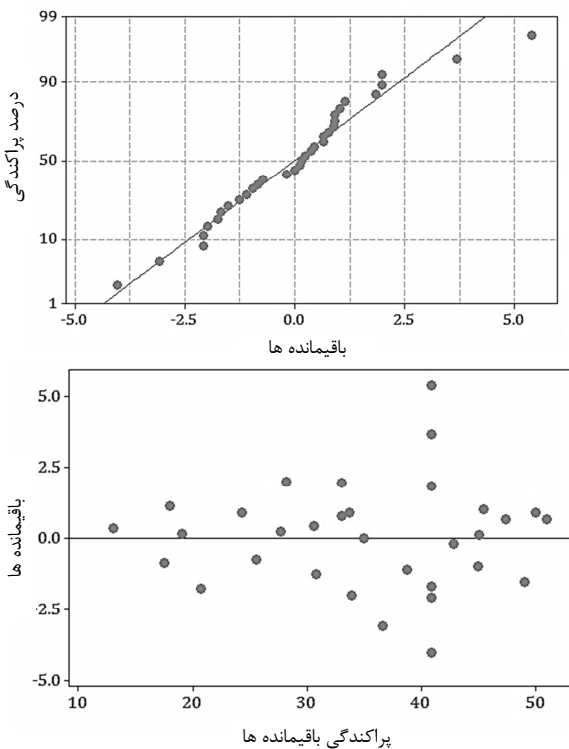
جهت طراحی و تحلیل آزمایش از نرم‌افزار آماری مینی‌تب^۱ نسخه ۱۶ استفاده شده است. سایر پارامترهای مورد استفاده در انجام آزمایش ثابت در نظر گرفته شده، که در جدول ۴ درج گردیده است. جهت انجام آزمایش‌ها از پودرهای ترکیبی نامتصل استفاده شده است. این روش نسبت به سایر روش‌های تولید پودر (زینتر و آلیاژسازی مکانیکی) راحت‌تر و کم هزینه‌تر می‌باشد. ذرات آهن به عنوان فاز مغناطیس شونده با سایز ۴۰۰ با ذرات کاربید سیلیسیم (مش‌های گوناگون، نسبت ترکیب‌های مختلف) توسط همزن مکانیکی به مدت ۲۰ دقیقه در سرعت‌های مختلف مخلوط می‌شوند. با توجه به سطح مقطع آهن‌ربا و فضای مابین آهن‌ربا و نمونه، حجم پودر مورد نیاز مشخص می‌گردد. با وزن‌کشی حجم مشخص شده، مقدار پودر برحسب گرم به دست می‌آید. در هر آزمایش پودر جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع و میزان روانکار نیز بر کیفیت سطح و نتایج بسیار تاثیر دارند. در این آزمایش‌ها از روانکار SAE۳۰ با درصد ترکیب ۵٪ نسبت به حجم پودر استفاده می‌شود. خروجی^۲ مهم مدنظر در طراحی آزمایش، درصد تغییرات صافی سطح می‌باشد که طبق رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\Delta Ra(\%) = \frac{\text{سطح زبری ثانویه} - \text{سطح زبری اولیه}}{\text{سطح زبری اولیه}} \times 100 \quad (1)$$

پارامترهای مورد بحث در این آزمایش مطابق جدول ۵ در ۵ سطح و به همراه مقادیر آن‌ها آورده شده‌اند.

با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته به روش سطح پاسخ^۳ برای تعداد ۵ فاکتور و تعیین $\alpha=2$ ، تعداد ۳۳ آزمایش به همراه ۲ بلوک برای

1. Minitab
2. response
3. Response Surface Method(RSM)



شکل ۵ نمودارهای مربوط به توزیع باقیمانده‌ها

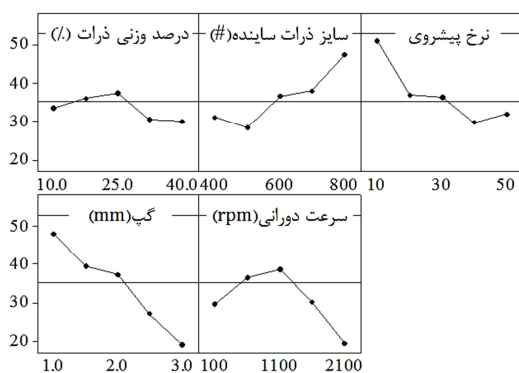
۲-۴- اثر پارامترهای موثر

برای تحلیل دقیق اثر پارامترهای موثر در فرآیند انجام شده می‌بایست به دقت اثر فاکتور اصلی و برهم کنش‌های موثر فاکتورها را مورد تحلیل قرار داد. همان‌طور که از جدول ۶ و ضرایب p بدست می‌آید تمامی فاکتورها موثر هستند. نمودار نحوه تاثیر فاکتورهای اصلی در شکل ۶ آورده شده است.

۲-۴-۱- اثر فاکتورهای اصلی

۲-۴-۱-۱- اثر گپ

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است، با افزایش میزان فاصله آهن‌ربا تا سطح نمونه میزان تغییرات زبری متوسط سطح کاهش پیدا می‌کند. با افزایش فاصله از سطح آهن‌ربا میزان خطوط شار مغناطیسی عبوری از سطح موردنظر



شکل ۶ اثر فاکتورهای اصلی

۲-۲- تحلیل داده ها و نتایج آزمایش

با توجه نتایج به دست آمده برای تغییرات زبری سطح، تحلیل و اصلاح مدل سازی و حذف عوامل غیرموثر، جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون حاکم بر مساله به صورت کد شده برای خروجی در جدول ۷ آمده است. لازم به ذکر است که پارامترهایی در فرآیند موثر هستند که مقدار p بدست آمده با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵ درصد برای آن‌ها از ۰/۰۵ کمتر باشد.

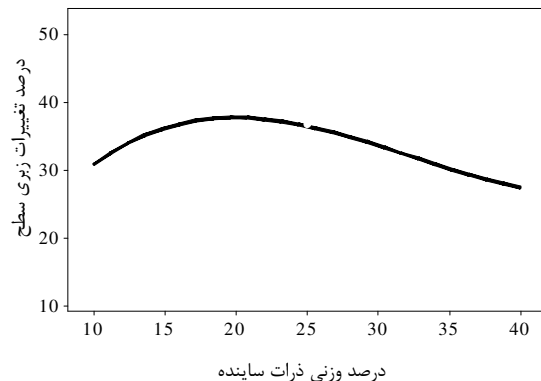
با توجه به نتایج به دست آمده از جدول آنالیز واریانس و اصلاح مدل، معادله رگرسیون منطبق شده با مدل به صورت غیرکد شده برای خروجی برحسب پارامترهای ورودی ماشین‌کاری به صورت رابطه (۲) خواهد بود:

$$\Delta R_a(\%) = -77.54 + 44.87 \times G + 2.41 \times P + 0.068 \times M - 0.40 \times F + 0.070 \times V - 6.815 \times G^2 - 0.03 \times P^2 - 0.022 \times G \times M - 0.011 \times G \times V \quad (2)$$

همچنین $R = Sq(adj) = 91.66\%$ و $R = Sq = 94.79\%$ مدل است که نشان دهنده دقت خوب مدل‌سازی به روش سطح پاسخ به کار رفته می‌باشد. همچنین نمودارهای مربوط به تحلیل و پراکندگی باقیمانده‌ها در شکل ۵ آمده است که مناسب و منطبق هستند. عدم انطباق مدل نیز غیرموثر شده است.

جدول ۷ ضرایب مدل رگرسیون و عدم انطباق در مدل اولیه و اصلاح شده

ترم ها	مقدار P	ضریب معادله	مقدار P	ضریب معادله
عدد ثابت	۰/۰۰۰	۴۰/۸۷۰۸	۰/۰۰۰	۴۰/۸۶۷۹
بلوک	۰/۹۸۱	-۰/۰۱۴۳	-	-
گپ	۰/۰۰۰	-۶/۶۶۹۲	۰/۰۰۰	-۶/۶۶۹۲
درصد وزنی	۰/۰۰۸	-۲/۱۰۷۵	۰/۰۰۳	-۲/۱۰۷۵
سایز ذرات	۰/۰۰۰	۴/۵۹۰۸	۰/۰۰۰	۴/۵۹۰۸
نرخ پیشروی	۰/۰۰۰	-۴/۰۳۶۷	۰/۰۰۰	-۴/۰۳۶
سرعت دورانی	۰/۰۰۱	-۲/۹۲۲۵	۰/۰۰۰	-۲/۹۲۲۵
گپ×گپ	۰/۰۱۳	-۱/۷۰۴۱	۰/۰۰۵	-۱/۷۰۳۹
درصد وزنی×درصد وزنی	۰/۰۰۴	-۲/۱۲۱۶	۰/۰۰۱	-۲/۱۲۱۴
سایز ذرات×سایز ذرات	۰/۶۴۷	-۰/۲۷۲۹	-	-
نرخ پیشروی×نرخ پیشروی	۰/۶۵۱	۰/۲۶۹۶	-	-
سرعت دورانی×سرعت دورانی	۰/۰۰۰	-۳/۹۸۷۹	۰/۰۰۰	-۳/۹۸۷۷
گپ×درصد وزنی	۰/۲۵۷	-۰/۹۵۱۲	-	-
گپ×سایز ذرات	۰/۰۱۶	-۲/۲۷۷۵	۰/۰۰۷	-۲/۲۷۷۵
گپ×نرخ پیشروی	۰/۴۶۶	۰/۶۰۱۳	-	-
گپ×سرعت دورانی	۰/۰۰۴	-۲/۸۹۲۵	۰/۰۰۱	-۲/۸۹۲۵
درصد وزنی×سایز ذرات	۰/۲۲۲	-۱/۰۳۰۰	-	-
درصد وزنی×نرخ پیشروی	۰/۲۶۸	۰/۹۲۸۷	-	-
درصد وزنی×سرعت دورانی	۰/۰۰۵	-۲/۷۶۲۵	۰/۰۰۱	-۲/۷۶۲۵
سایز ذرات×نرخ پیشروی	۰/۵۱۶	۰/۵۳۵۰	-	-
سایز ذرات×نرخ پیشروی	۰/۶۰۵	-۰/۴۲۳۳	-	-
نرخ پیشروی×سرعت دورانی	۰/۴۹۱	-۰/۵۶۷۵	-	-
عدم انطباق	۰/۳۶	-	۰/۴۹۱	-



شکل ۸ اثر فاکتور اصلی درصد ذرات ساینده

۲-۴-۱-۳- اثر سایز ذرات ساینده

با افزایش سایز مش، قطر متوسط ذرات ساینده کاهش پیدا می‌کند. با کاهش قطر ذرات ساینده و در ترکیب وزنی ثابت میزان تعداد ذرات ساینده افزایش پیدا می‌کند. افزایش تعداد ذرات ساینده باعث افزایش تعداد لبه‌های برنده می‌گردد که باعث افزایش کارایی فرآیند می‌شود. از طرف دیگر با افزایش تعداد ذرات ساینده مقدار نیروی وارد بر ذرات ساینده از طرف ذرات مغناطیسی نیز کاهش و در نتیجه میزان عمق نفوذ در حد ایده‌آل باقی می‌ماند و سطحی با زبری سطح بسیار مناسب ایجاد می‌گردد.

۲-۴-۱-۴- اثر نرخ پیشروی

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است با کاهش نرخ پیشروی میزان تغییرات زبری سطح افزایش پیدا می‌کند. در نرخ پیشروی‌های پایین می‌توان به سطح‌های بسیار مناسب رسید. در واقع با سرعت پیشروی کم در هر منطقه تعداد ذرات ساینده بیشتری می‌توانند فرآیند میکرو و یا نانو براده برداری را انجام دهند. و پستی و بلندی‌های بیشتری را هموار نمایند. همچنین معمولاً در نرخ پیشروی‌های پایین در ماشین‌کاری مواد نرم براده‌های پیوسته ایجاد می‌گردد که خود باعث کاهش زبری متوسط سطح می‌شود.

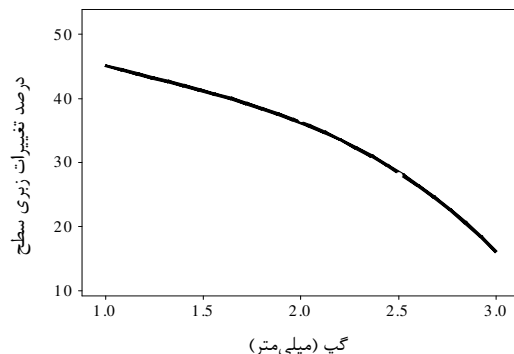
۲-۴-۱-۵- اثر سرعت دورانی

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است با افزایش سرعت دورانی میزان تغییرات زبری سطح افزایش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش سرعت دورانی در هر موقعیت تعداد ذرات ساینده بیشتری می‌توانند فرآیند براده برداری را انجام دهند. همچنین بطور کلی در ماشین‌کاری با افزایش سرعت برشی می‌توان به سطحی مطلوب رسید. به علت تغییر رفتار پلاستیکی ماده در سرعت‌های برشی بالا، نیروهای برشی کمتر می‌شود و به همین علت کیفیت سطح با افزایش سرعت بهبود می‌یابد. اما این روند مناسب تغییرات با افزایش سرعت دورانی ادامه پیدا نمی‌کند، زیرا با افزایش بیش از حد سرعت دورانی نیروی گریز از مرکز وارد بر ذرات ساینده و مغناطیسی بر نیروی مغناطیسی اعمالی از طرف آهن‌ربا غلبه کرده و در نتیجه ذرات ساینده به سمت کناره‌ها متمایل می‌گردند و در بسیاری از مواقع از جاروبک ساینده جدا می‌شوند. کاهش تعداد ذرات ساینده باعث کاهش کارآمدی ذرات ساینده می‌گردد. اثر این فاکتور در شکل ۹ نشان داده شده است.

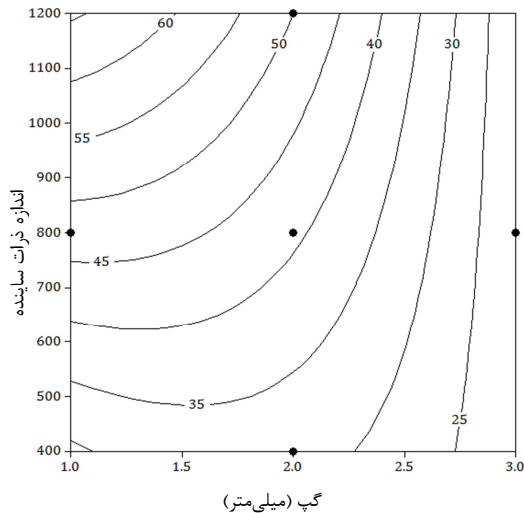
یا به تعبیری دیگر چگالی شار مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند. میزان نیروی مغناطیسی به میزان چگالی شار مغناطیسی وابسته است. در نتیجه با افزایش فاصله میزان نیروی مغناطیسی وارده کاهش پیدا می‌کند. این کاهش از دو طریق بر میزان تغییرات زبری سطح اثر می‌گذارد. ابتدا با کاهش مقدار نیروی مغناطیسی؛ از آن‌جا که در آزمایش‌ها از پودرهای با اتصال ضعیف (روانکار) استفاده شده است، در حرکت دورانی آهن‌ربا توانایی نگهداری پودرهای با فاصله از سطح آهن‌ربا را نداشته و پودرهای ساینده به اطراف پرتاب می‌شوند. بنابراین تعداد لبه‌های ساینده کاهش پیدا کرده و میزان تغییرات نیز کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر با کاهش مقدار نیروی مغناطیسی میزان نفوذ در سطح قطعه کار بسیار کاهش پیدا می‌کند و به این ترتیب ذرات ساینده توانایی حذف پستی و بلندی‌های با ارتفاع بیشتر از عمق نفوذ را نخواهند داشت. در نتیجه میزان تغییرات کاهش پیدا می‌کند. طبق جدول ضرایب رگرسیون مشخص است تأثیر فاکتور گپ از سایر فاکتورها بسیار بیشتر است. همچنین از آن‌جا که درجه دوم این فاکتور موثر می‌باشد، مشخص می‌گردد که رفتار این فاکتور بصورت خطی نبوده و انحنا خواهد داشت. در شکل ۷ این انحنا دید می‌شود.

۲-۴-۱-۲- اثر درصد وزنی ذرات ساینده

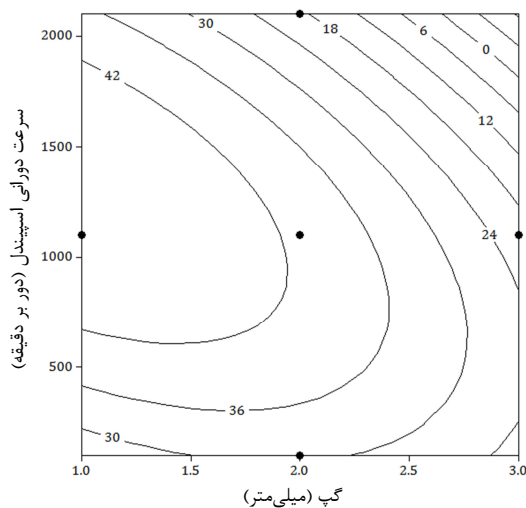
همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است با افزایش میزان پودر ساینده در ترکیب مکانیکی پودر تا حد مشخصی، میزان تغییرات زبری سطح افزایش پیدا کرده ولی این روند صعودی ادامه پیدا نمی‌کند. با ادامه افزایش میزان ذرات ساینده، میزان تغییرات زبری سطح کاهش پیدا می‌کند. ابتدا با افزایش درصد وزنی ذرات ساینده میزان لبه‌های برنده وارد بر سطح قطعه کار افزایش پیدا می‌کند که باعث افزایش میزان تغییر زبری سطحی می‌گردد. این افزایش از طرف دیگر باعث کاهش نیروی وارده بر هر ذره ساینده می‌گردد. که در نتیجه میزان عمق نفوذ افزایش پیدا نمی‌کند. مقدار بیش از حد نیروی مغناطیسی باعث عمق نفوذ بیشتر و در نتیجه خراشیدگی سطح می‌گردد که تأثیر نامطلوبی بر میزان زبری متوسط سطح می‌گذارد. اما با افزایش درصد ذرات ساینده میزان ذرات مغناطیسی موجود در پودر ترکیبی ساینده کاهش پیدا می‌کند. از آن‌جا که این ذرات واسطه اعمال نیروی مغناطیسی بر ذرات ساینده می‌باشند. در نتیجه با کاهش آن‌ها این نیرو به خوبی منتقل نشده و میزان عمق نفوذ از مقدار ایده‌آل کمتر شده و تأثیر فرآیند کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر در سرعت دورانی بالا جاروبک ساینده مغناطیسی توانایی نگهداری ذرات ساینده را نخواهد داشت و در نتیجه میزان ذرات ساینده و در نتیجه لبه‌های برنده کاهش پیدا می‌کند. با توجه به موثر بودن درجه دوم فاکتور درصد ذرات ساینده، این تأثیر در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷ اثر فاکتور اصلی گپ



شکل ۱۱ اثر برهم کنش گپ و سایز ذرات ساینده



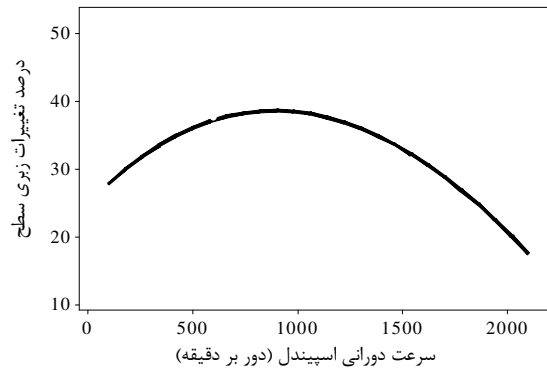
شکل ۱۲ اثر برهم کنش گپ و سرعت دورانی

با کاهش گپ و کاهش قطر ذرات می‌توان به بالاترین میزان تغییرات زبری سطح رسید. در شکل ۱۲ نیز اثر برهم کنش گپ و سرعت دورانی نشان داده شده است.

همان‌طور که مشخص است در گپ‌های کم می‌توان در بازه سرعت‌های بین ۶۰۰rpm تا ۱۶۰۰rpm به تغییرات مناسبی رسید. در گپ ۲/۵mm سرعت از ۶۰۰rpm تا ۱۶۰۰rpm میزان تغییرات کاهش می‌یابد. در گپ ۱/۵mm در محدوده ذکر شده تغییری صورت نمی‌پذیرد. در گپ ۲mm نیز در سرعت ۱۱۰۰rpm می‌توان به ۴۰٪ در تغییرات زبری سطح رسید.

۲-۵-ارایه بهترین حالت انجام آزمایش‌ها

با توجه نتایج بیان شده از تحلیل نمودارها و مدل‌سازی ریاضی حاکم بر آزمایش، نرم‌افزار نیز یک پیشنهاد بهینه را معرفی و مقدار بیشینه تغییرات زبری سطح را پیش‌بینی می‌کند. نتایجی که از تحلیل آزمایش‌ها بیان شده، با دقت بسیار خوبی تایید می‌شود و می‌توان به تغییرات زبری سطح بیش از ۷۵٪ دست یافت. نتایج مذکور در جدول ۸ آورده شده است. در شکل ۱۳ تاثیر فرآیند بر روی سطح قطعه‌کار نشان داده شده است.

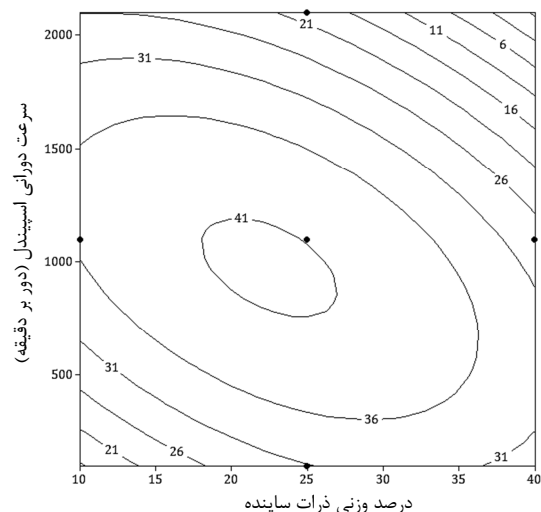


شکل ۹ اثر فاکتور اصلی سرعت دورانی

۲-۴-۲- اثر برهم کنش فاکتورها

طبق نتایج آنالیز واریانس مشخص است که اثر متقابل فاکتورهای گپ-سرعت دورانی و گپ-سایز ذرات و اثر متقابل فاکتورهای درصد ذرات ساینده-سرعت دورانی نیز موثر می‌باشند. در تحلیل نمودارهای اثر برهم کنش فاکتورهای موثر، سایر پارامترها در حالت تعادل آزمایش‌ها (نقطه مرکزی) در نظر گرفته شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است رابطه بین درصد ذرات ساینده و سرعت دورانی بصورت بیضی‌های متحدالمرکز می‌باشد. در میزان ثابت درصد وزنی پودر ساینده در دو سرعت متفاوت می‌توان به تغییر زبری یکسان رسید. با ثابت بودن سرعت دورانی نیز با دو سطح درصد ذرات ساینده می‌توان به تغییرات زبری سطح یکسان رسید. در محدوده سرعت ۱۱۰۰rpm و درصد ترکیب ذرات ساینده ۲۰ الی ۲۵ درصد می‌توان به بیشترین میزان تغییرات زبری سطح رسید. در سرعت ۱۱۰۰rpm با افزایش میزان درصد به بیشترین میزان تغییرات رسیده و با افزایش بیشتر درصد ذرات ساینده، میزان تغییرات کاهش پیدا می‌کند. البته در سرعت ۱۶۰۰rpm با افزایش درصد ذرات ساینده روند نزولی می‌باشد. در محدوده سرعت ۱۰۰rpm و ۲۱۰۰rpm نیز نتیجه مطلوبی بدست نمی‌آید. در شکل ۱۱ اثر برهم کنش سایز ذرات و گپ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ اثر برهم کنش سرعت دورانی و درصد ذرات ساینده

- [2] E. Ezugwu, J. Bonney, Finish machining of nickel-base Inconel 718 alloy with coated carbide tool under conventional and high-pressure coolant supplies, *Tribology transactions*, Vol. 48, No. 1, pp. 76-81, 2005.
- [3] T. T. Öpöz, X. Chen, Experimental study on single grit grinding of Inconel 718, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 68, No. 1, pp. 56-65, 2014.
- [4] D. Aspinwall, R. Dewes, E.-G. Ng, C. Sage, S. Soo, The influence of cutter orientation and workpiece angle on machinability when high-speed milling Inconel 718 under finishing conditions, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 12, pp. 1839-1846, 2007.
- [5] V. Jain, Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 20, pp. 6022-6038, 2009.
- [6] R. S. Mulik, P. M. Pandey, Magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 5-8, pp. 501-515, 2011.
- [7] B. Girma, S. S. Joshi, M. Raghuram, R. Balasubramaniam, An experimental analysis of magnetic abrasives finishing of plane surfaces, *Machining science and Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 323-340, 2006.
- [8] L. D. Yang, C. T. Lin, H. M. Chow, Optimization in MAF operations using Taguchi parameter design for AISI304 stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 42, No. 5-6, pp. 595-605, 2009.
- [9] M. Givi, A. F. Tehrani, A. Mohammadi, Polishing of the aluminum sheets with magnetic abrasive finishing method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 9-12, pp. 989-998, 2012.
- [10] S. Kim, J. Kwak, Magnetic force improvement and parameter optimization for magnetic abrasive polishing of AZ31 magnesium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 18, pp. s369-s373, 2008.
- [11] T. W. Kim, D.-M. Kang, J. S. Kwak, Application of magnetic abrasive polishing to composite materials, *Journal of mechanical science and technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 1029-1034, 2010.
- [12] S. D. Mun, Micro machining of high-hardness materials using magnetic abrasive grains, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 5, pp. 763-770, 2010.
- [13] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*: John Wiley & Sons, 2008.



شکل ۱۳ تاثیر عملکرد پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر سطح ورق اینکونل ۷۱۸

جدول ۸ بهینه سازی

بهینه سازی	گپ (میلی متر)	درصد وزنی ذرات ساینده	سایز ذرات ساینده	نرخ پیشروی	سرعت دورانی	ΔRa (%)
نرم افزار	۱	۱۷/۸۷	۱۲۰۰	۱۰	۱۴۵۳	۷۵/۷۲
آزمایش	۱	۱۸	۱۲۰۰	۱۰	۱۴۵۳	۶۲/۱

۳- نتیجه و جمع بندی

با بررسی آنالیز آزمایش‌ها پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر سطح اینکونل ۷۱۸ مشخص گردید که گپ، درصد ذرات ساینده، نرخ پیشروی، سرعت دورانی و سایز ذرات ساینده بر میزان تغییرات زبری سطح موثر هستند.

- فاصله بین آهن ربا و سطح نمونه بیشترین تاثیر را بر میزان کاهش پستی و بلندی‌های سطح دارد. با کاهش فاصله، میزان تغییرات زبری سطح افزایش پیدا می‌کند.
- با کاهش قطر ذرات ساینده، میزان نیروی وارده بر هر ذره کاهش و در نتیجه می‌توان به سطح اینکونل صاف و براق رسید.
- با افزایش درصد ذرات ساینده تا محدوده ۲۲٪ میزان تغییرات زبری سطح افزایش و با افزایش میزان درصد پودر ساینده، میزان تغییرات کاهش پیدا می‌کند.
- سرعت دورانی نیز رفتار مشابهی مانند درصد ذرات ساینده دارد. با افزایش سرعت دورانی تا ۱۱۰۰ دور بر دقیقه، تغییرات زبری سطح تا ۵۲٪ افزایش پیدا کرده ولی روند صعودی ادامه نمی‌یابد.
- با کاهش نرخ پیشروی میزان تغییرات صافی سطح بیشتر می‌گردد. برهم کنش گپ با سرعت دورانی و گپ با سایز ذرات ساینده نیز موثر می‌باشد. همچنین برهم کنش سرعت دورانی با نسبت ذرات ساینده نیز بر میزان تغییرات زبری سطح موثر می‌باشد.
- با تنظیم آزمایش‌ها با شرایط بهینه، سرعت دورانی ۱۴۵۳ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۱۰ میلی‌متر در دقیقه، درصد ذرات ساینده ۱۷/۸۷٪، سایز ذرات ساینده ۱۲۰۰ مش و گپ ۱ میلی‌متر می‌توان تغییرات زبری سطح را ۶۲٪ کاهش داد که با مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون کمتر از ۱۵٪ خطا دارد.
- چگالی شار مغناطیسی با جای‌گذاری آهن‌ربا قطب مخالف در زیر قطعه کار تا ۳۵٪ افزایش پیدا می‌کند.

۴- مراجع

- [1] P. L. Tso, Study on the grinding of Inconel 718, *Journal of materials processing technology*, Vol. 55, No. 3, pp. 421-426, 1995.