بررسی تأثیر عملیات دانه زنی بر بهبود کیفیت سطوح ماشینکاری شده با فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی

ولی علی میرزالو[۱]
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مجید قریشی[۲]
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۰۵/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۱۰/۰۵)

چکیده

کیفیت نامناسب سطوح حاصل از فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی مانع از به کارگیری این روش برای ماشینکاری قطعات حساسی مثل پره موتورهای توربین گازی می‌شود. بنابراین، در صورت استفاده از این روش برای ماشینکاری ریشه پره نیاز به عملیات نهایی برای بهبود کیفیت سطوح می‌باشد. در این مقاله، نتایج حاصل از بکارگیری روش دانه زنی برای بهبود کیفیت یک سطح ماشینکاری شده با فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی، با استفاده از روش آماری طراحی آزمایش‌ها، بررسی می‌شود. در طراحی آزمایش‌ها دو عامل زبری سطح و مقدار ضخامت لایه سفید برداشته شده به عنوان متغیرهای پاسخ و عواملی چون نوع ذرات استفاده شده، فشار و مدت زمان اعمال فرآیند به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. بعد از انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری متغیرهای پاسخ، با استفاده از روش آماری آنالیز واریانس، تأثیر متغیرهای ورودی بر پاسخ‌ها بررسی شده و حالت بهینه متغیرهای ورودی به دست آمده مجدداً شرایط بهینه به صورت تجربی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که دانه زنی تحت شرایط خاصی توانایی حذف لایه سفید همراه با زبری سطح مناسب و سختی سطح لازم را دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ماشینکاری تخلیه الکتریکی، کیفیت سطح، دانه زنی، طراحی آزمایش‌ها

Quality Improvement of Surfaces Machined by Wire Electrical Discharge Process through Sand Blasting

V.A. Mirzaloo
Mech. Eng. Dep't.
Amirkabir Univ. of Tech.

M. Ghoreishi
Mech. Eng. Dep't.
K.N.Toosi Univ. of Tech.

ABSTRACT

Because of unsuitable surface quality resulted from wire electrical discharge machininig (WEDM), this method is not used for manufacturing of accurate parts, such as blades of gas turbine engines. Therefore, a post treatment is needed after WEDM. In this study, the application of sand blasting as a post treatment is investigated by design of experiment (DOE) technique. In this method, pressure, duration of the process, and the type of particles used in sand blasting process as input variables, as well as roughness and thickness of removed layer as response variables are considered. After performing the experiments and measuring the responses, the effects of inputs on response variables are investigated and the the optimal amount of inputs are obtained. The results show that sand blasting under specific condition can remove the recast layer with suitable roughness and hardness.

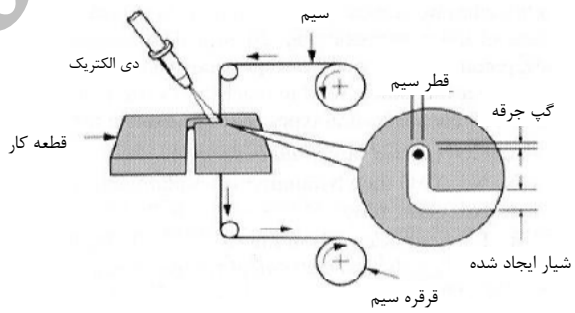
Key Words: Electrical Discharge, Machining, Surface Quality, Sand Blasting, Design of Experiment

۱- دانشجوی دکترا: valimirzaloo@aut.ac.ir
۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): ghoreishi@kntu.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

روش تخلیه الکتریکی سیمی[1] نوعی فرآیند ماشینکاری با تخلیه الکتریکی محسوب می‌شود که در آن از سیم به عنوان الکترود ابزار استفاده می‌شود. ماشینکاری با تخلیه الکتریکی یک روش ماشینکاری غیرسنتی است که در آن مواد رسانای الکتریکی با استفاده ازجرقه‌های کنترل شده بین الکترود ابزار و قطعه کار در داخل یک سیال دی الکتریک ماشینکاری می‌شود. به ماشین‌هایی که با فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی کار می‌کنند وایرکات گفته می‌شود. در وایرکات، مطابق شکل **۱** الکترود سیمی به طور پیوسته از درون قطعه کار عبور می‌کند و عملیات جرقه زنی بین سطح الکترود و سطح قطعه کار انجام می‌شود. از آنجا که در این نوع ماشینکاری هیچ نوع نیرویی بین ابزار و قطعه کار در حین ماشینکاری ایجاد نمی‌شود لذا از این فرآیند به طور وسیعی برای ماشینکاری فولادهای با استحکام بالا، کاربیدهای تنگستن و فولادهای آلیاژی سخت استفاده می‌شود.



شکل (۱): فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی.

اغلب مطالعات در زمینه بهبود فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی در زمینه نرخ براده برداری و صافی سطح انجام شده است. بررسی میکروسکوپی کیفیت سطح و تأثیر عواملی ماشینکاری بر آن، به دلیل نیاز به تجهیزات بیشتر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که در ماشینکاری با فرآیند تخلیه الکتریکی تنها ۱۵٪ مواد ذوب شده، توسط دی الکتریک شسته و دفع می‌شود و بقیه مواد باقی مانده در اثر خنک‌کاری سریع بر روی سطح منجمد می‌شوند که از آن به عنوان لایه منجمد شده یاد می‌شود [۱]. در مطالعه‌ای که هاسکالیک و همکارانش بر روی اثر عواملی وایرکات بر یکپارچگی سطح انجام داده‌اند نشان می‌دهد که ضخامت لایه سفید تقریباً متناسب با مقدار انرژی پالس‌ها بوده و زبری سطح و دانسیته ترک‌ها در لایه سفید با افزایش زمان روشنی پالس‌ها و میزان ولتاژ مدار باز افزایش می‌یابد و همچنین میزان نفوذ ترک‌ها در منطقه متأثر از حرارت[2] وابسته به انرژی پالس‌ها است [۲]. قانم و همکارانش نشان داده‌اند که نوع فولاد تأثیر زیادی در تغییرات سختی سطح ماشینکاری شده و تنش‌های پسماند سطحی و ضخامت لایه‌های سطحی دارد [۳]. طوری که در فولادهای سختی ناپذیر تنها یک لایه تغییر یافته سطحی با ساختار دندیریتی به وجود می‌آید ولی در فولادهای سختی پذیر علاوه بر لایه دندیریتی، دو لایه دیگر شامل لایه‌های مارتنزیتی کوئنچ شده و انتقال به وجود می‌آید. همچنین افزایش دانسیته سطحی ترک‌های ناشی از فرآیند باعث کاهش تنش‌های پسماند سطحی می‌شود. ولتروپ در مطالعه‌ای بر روی اثر وایرکات بر خواص خستگی فولادهای ضد زنگ مقاومت بالا، نشان داده است که این فرآیند به طور موثری مقاومت به خستگی فولاد مارتنزیتی سخت شده را کاهش می دهد و تأثیر این فرآیند بر خواص خستگی مربوط به لایه‌های سطحی تغییر یافته می‌باشد [۴]. میزان تأثیر لایه‌های تغییر یافته سطحی بر خواص خستگی با ضخامت آن ارتباط مستقیم دارد. زیرا یک لایه ضخیم سطحی شامل تنش‌های پسماند کششی بالا می‌باشد که احتمال ترک خوردگی و رشد ترک‌ها بالا می‌باشد. و همچنین گزارش داده است که چون این اثر مضر با کاهش شدت عواملی ماشینکاری به احتمال قوی کاهش نمی‌یابد عملیات پرداخت نهایی مانند سنگ زنی، پولیش‌کاری، ماشینکاری شیمیایی برای حذف لایه سطحی تغییر یافته لازم است. در زمینه بهبود سطح حاصل از ماشینکاری با فرآیندهای تخلیه الکتریکی مطالعات اندکی صورت گرفته است. سانگ و همکارانش [۵] مطالعه‌ای را روی حذف میکروترک‌های سطحی ناشی

1- Wire Electrical Discharge Machininig

2- Heat Affected Zone

Archive of SID

www.SID.ir

از فرآیند تخلیه الکتریکی میکرونی بر روی قطعه سیلیکونی انجام داده‌اند و درباره دو نوع عملیات نهایی بر اساس اچ کردن شیمیایی برای حذف میکروترک‌ها بحث کرده‌اند و نشان داده‌اند که در صورتی که انرژی جرقه‌ها کم باشد ترک‌ها را می‌توان حذف کرد. ژان‌گو و همکارانش[۶] از روش دانه زنی سایشی میکرونی[۳] برای بهبود کیفیت سطح نوعی کامپوزیت ماشینکاری شده با وایرکات استفاده کرده‌اند و نشان داده‌اند که با این روش می‌توان لایه‌های آسیب دیده سطحی را حذف کرد و زبری سطح را هم کاهش داد. مطالعات دیگری که در مورد بکارگیری عملیات دانه زنی برای بهبود سطح انجام شده است نشان می‌دهد که دانه زنی باعث افزایش چقرمگی، بهبود سختی و صافی سطح می‌شود همچنین باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در سطح و بهبود مقاومت به خستگی در نتیجه افزایش عمر قطعه کار می‌شود[۸-۷].

کیفیت نامناسب سطح حاصل از فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی با توجه به مکانیزم حرارتی این روش تاکنون مانع از به کارگیری این روش برای ماشینکاری ریشه پره موتورهای توربین گازی شده است. در حالت کلی با توجه به وجود عیوبی مانند میکروترک‌ها و حفره ها در لایه منجمد شده و ترد بودن این لایه و لایه متأثر از حرارت و کششی بودن تنش‌های پسماند سطحی که همه این موارد مقاومت به خستگی و در نتیجه عمر پره را کاهش می‌دهند، در صورت استفاده از این روش برای ماشینکاری ریشه پره، نیاز به عملیات نهایی برای بهبود کیفیت سطح می‌باشد[۹]. برای حذف لایه‌های تغییر یافته سطحی، روش‌های مختلفی مانند سنگ‌زنی، ماشینکاری الکتروشیمیایی، عملیات حرارتی، دانه زنی[۴] و پولیش‌کاری وجود دارد که هر کدام از این روش‌ها دارای محاسن و معایبی می‌باشند.

در این مقاله نتایج حاصل از به کارگیری روش دانه زنی برای بهبود کیفیت سطح با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها[۵] بررسی می‌شود. بدین منظور با توجه به این که از میان مؤلفه‌های کیفیت سطح دو عامل زبری سطح و ضخامت لایه سفید نقش مهمی دارند در طراحی آزمایش‌ها دو عامل زبری سطح و مقدار ضخامت برداشته شده به عنوان متغیرهای خروجی در نظر گرفته شده و عواملی نوع ذرات استفاده شده، فشار و مدت زمان اعمال فرآیند به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. بعد از طراحی آزمایش‌ها، عملیات دانه زنی مطابق این طراحی بر روی سطح نمونه‌های وایرکات شده اعمال شده و متغیرهای خروجی (زبری سطح و مقدار ضخامت برداشته شده) اندازه‌گیری گردید. سپس با استفاده از روش آماری آنالیز واریانس، تأثیر متغیرهای ورودی بر خروجی بررسی گردید. طراحی آزمایش‌ها یک روش تحلیلی آماری برای مدلسازی و بررسی اثر متغیرهای ورودی یک فرآیند بر یک یا تعدادی از متغیرهای خروجی که تابع ناشناخته ای از متغیرهای ورودی هستند می‌باشد. مزیت این روش امکان بررسی اثر تعامل فاکتورها و به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌های لازم است. در این روش بعد از طراحی و انجام آزمایش‌ها، برای تحلیل داده‌ها از روش آنالیز واریانس استفاده می‌شود. که در آن با استفاده از محاسبه واریانس و تست فرضیه‌ها با روش F تست، عوامل مؤثر و همچنین اثر تعواملی مهم مشخص می‌شوند و در مرحله بعدی نحوه اثر این فاکتورها و محدوده مناسب آنها با استفاده از نمودارهای اثرهای اصلی و اثر تعوامل و کانتورها به دست می‌آید[۱۰]. به دلیل حجم محاسبات نسبتاً بالا در تحلیل داده‌ها، نرم افزارهای مختلفی برای این روش به وجود آمده که استفاده از این روش را آسان کرده است. در این تحقیق از نرم افزار MINITAB استفاده شد.

۲- طراحی و انجام آزمایش‌ها

عوامل مختلفی از جمله فشار، نوع ذرات، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار، زاویه وزش ذرات نسبت به سطح قطعه‌کار، زمان اعمال فرآیند درکیفیت سطح نهایی حاصل از فرآیند دانه‌زنی می‌توانند مؤثر باشند. برای بررسی اثر عوامل فوق بر کیفیت سطح نهایی با توجه به هزینه بالای ماشینکاری و بررسی کیفیت سطح نمونه‌ها بررسی همه عوامل هزینه بر است. بر اساس تجربیات قبلی و آزمایش‌ها اولیه از بین

1- Abrasive-micro-blasting
2- Sand Blasting
3- Design of Exprements

Archive of SID

www.SID.ir

عوامل فوق، فشار، جنس و زمان عملیات در کیفیت سطح نهایی نقش مهمی داشتند به همین دلیل در این تحقیق اثر این عوامل بررسی می‌شود.

برای تعیین سطح[6] عوامل، ابتدا چند نمونه تحت عملیات دانه‌زنی قرار گرفتند با توجه به نتایج حاصله عامل مدت زمان (T) در دو سطح ۲۰ و ۵۰ ثانیه و عامل فشار (P) در دو سطح ۲۰psi و ۱۰۰psi و عامل نوع ذره (S) در سه سطح اکسید آلومینیم ۱۸۰ مش (نوع۱)، اکسید آلومینیم۱۵۰مش (نوع۲)، دانه شیشه‌ای[7] ۲۲۰ مش(نوع۳) در نظر گرفته شد. در نتیجه یک طرح فاکتوریل کامل[8] دارای ۲×۲×۳ یعنی ۱۲ تا آزمون خواهیم داشت که حالت‌های مختلف به صورت جدول **۱** خواهد شد.

بعد از ماشینکاری نمونه‌ها با دستگاه وایرکات ساخت شرکت شارمیلز سوئیس مدل 4020SI، فرآیند دانه زنی طبق جدول **۱** بر روی نمونه‌ها اعمال شد. برای انجام عملیات دانه زنی نمونه‌ها از دو نوع دستگاه دانه‌زنی دمش بخاری[9] و دمش خلأیی[10] و که به صورت خشک عملیات دانه‌زنی را انجام می‌دهند استفاده گردید. ذرات نوع اکسیدآلومینیم ۱۵۰مش و دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش با دستگاه نوع دمش بخاری و ذرات نوع اکسیدآلومینیم ۱۸۰ مش با دستگاه نوع دمش خلأیی استفاده شدند. و بعد از اتمام عملیات، عواملی زبری سطح و تغییر ضخامت نمونه‌ها به عنوان متغیرهای خروجی اندازه‌گیری شد که در جدول **۱** مقادیر آنها نشان داده شده است. در این جدول P فشار، S نوع ذره، T زمان اعمال فرآیند، StdOrder شماره استاندارد آزمایش‌ها را نشان می دهد. Ra و H به ترتیب متغیرهای پاسخ زبری سطح و کاهش ضخامت نمونه‌ها هستند.

۳- تحلیل آزمایشات

با توجه به این که دو متغیر پاسخ (Ra,H) در نظر گرفته شد. در تصمیم‌گیری دخیل هستند، لذا هرکدام از آنها را به طور جداگانه تحلیل کرده و با توجه به نتایج حاصل از هر دو متغیر خروجی، مقادیر مناسب عوامل تعیین می‌شوند.

۳-۱- زبری سطح

با توجه به این که آزمایش‌ها فقط یک بار انجام شدند، اگر همه اثرهای اصلی و اثرتعامل[11] در نظر گرفته شوند به دلیل صفر شدن خطای میانگین مربع‌ها[12](MSE) نمی‌توان تحلیل را انجام داد بنابراین، با توجه به این که اثر تعامل هر سه فاکتور (S,P,T) به احتمال قوی ناچیز خواهد بود لذا از این اثر صرف نظر گردید و سپس تحلیل انجام شد. با انجام تحلیل توسط نرم افزار، جدول آنالیز واریانس[13] به صورت جدول **۲** خواهد شد. با فرض خطای نوع اول به اندازه α=۰/۱ مشاهده می‌شود که اثرهای اصلی نوع ذره (S) و فشار (P) و اثر تعامل نوع ذره و فشار (SP) در مقدار زبری سطح مؤثر هستند و فاکتور زمان تأثیر چندانی در زبری سطح نمونه‌ها ندارد.

برای بررسی صحت فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها نمودار توزیع نرمال خطا مطابق شکل **۲** بررسی می‌گردد. همان طور که مشاهده می‌شود در نمودار احتمال نرمال بودن، توزیع داده‌ها به خط مربوطه نزدیک است ولی هنوز مقداری با آن فاصله دارند. با توجه به مشخص شدن اثرهای مهم این بار با حذف اثرهای غیر مهم و نگهداشتن اثرهای مهم، تحلیل مجدداً تکرار می‌شود. این بار جدول آنالیز واریانس به صورت جدول **۳** می‌شود. مشاهده می‌شود که مقادیر P از خطای نوع اول خیلی کمتر است. در نمودار توزیع نرمال خطا هم مطابق شکل **۳** مشاهده می‌شود که این بار در نمودار توزیع نرمال خطا توزیع داده‌ها روی خط مربوطه منطبق هستند. بنابرین فرض نرمال بودن داده‌ها که از فرضیات اولیه تحلیل آنالیز واریانس می‌باشد فرض معقولی بوده است.

1- Level
2- Glass Bead
3- Full Factorial Design
4- Vapour Blast
5- Vacuum Blast

6- Intractions
7- Mean Squar Error
8- Anova

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (۱): طراحی آزمایش‌ها و مقادیر عواملی ورودی و خروجی.

StdOrder	Blocks	S	P(psi)	T(s)	Ra (μ in)	H (μm)
1	1	1	20	20	19.8	36
2	1	1	20	50	24.4	0.001
3	1	1	100	20	45.1	5
4	1	1	100	50	44	40
5	1	2	20	20	47.5	17
6	1	2	20	50	50	104
7	1	2	100	20	72.3	4
8	1	2	100	50	65.5	51
9	1	3	20	20	51.7	16.875
10	1	3	20	50	38.4	0.001
11	1	3	100	20	43.2	67
12	1	3	100	50	33.5	39

S: نوع ذره **P:** فشار **T:** مدت زمان **Ra:** زبری سطح **H:** کاهش ضخامت نمونه

جدول (۲): آنالیز واریانس برای زبری سطح.

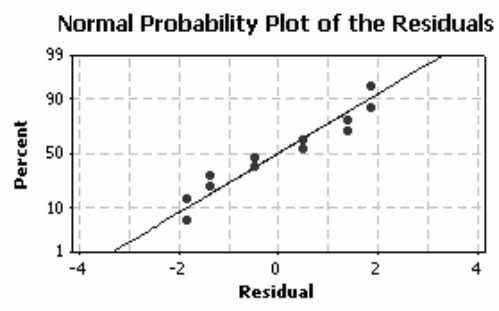
Source	DF	SS	MS	F	P
S	2	1351.54	675.77	61.00	0.016
P	1	429.60	429.60	38.78	0.025
T	1	47.20	47.20	4.26	0.175
S*P	2	525.31	262.66	23.71	0.040
S*T	2	92.73	46.37	4.19	0.193
P*T	1	10.83	10.83	0.98	0.427
Error	2	22.16	11.08		
Total	11	2479.38			

MS: میانگین مربعات **F**: عدد فیشر **P**: مقدار احتمال

DF: درجه آزادی **SS**: مجموع مربعات

جدول (۳): آنالیز واریانس برای زبری سطح با حذف اثرهای غیر مؤثر.

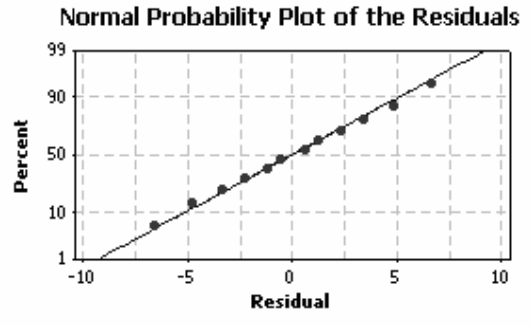
Source	DF	SS	MS	F	P
S	2	1351.54	675.77	23.45	0.001
P	1	429.60	429.60	14.91	0.008
S*P	2	525.31	262.66	9.11	0.015
Error	6	172.92	28.82		
Total	11	2479.38			



شکل (۲): نمودار توزیع نرمال خطا.

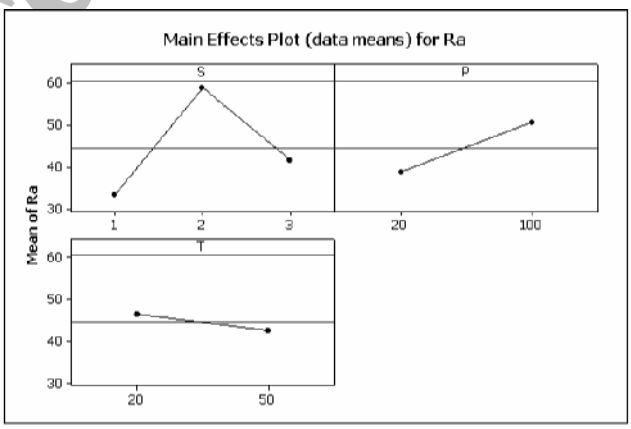
Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۳): نمودار توزیع نرمال خطا بعد از حذف اثرهای غیر مهم.

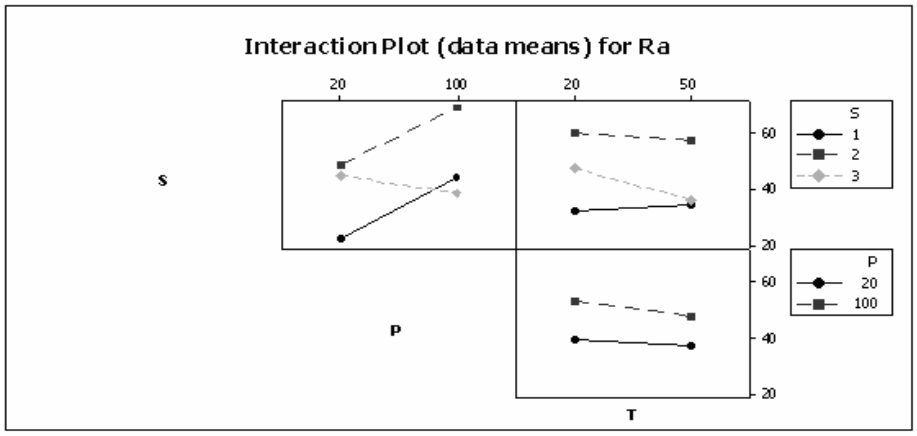
در شکل **۴** نمودارهای اثرهای اصلی نشان داده شده است همان طور مشاهده می‌شود با توجه به اینکه زبری سطح اولیه نمونه‌ها زیر ۱۰میکروواینچ بود، در اثر اعمال فرآیند دانه‌زنی زبری سطح به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. در مورد تأثیر نوع ذره بر زبری مشاهده می‌شود که به ترتیب نوع ذره اکسید آلومینیوم ۱۵۰مش، دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و اکسید آلومینیوم ۱۸۰مش، زبری سطح بیشتری را ایجاد می‌کنند. با افزایش فشار زبری سطح افزایش می‌یابد و با تغییر زمان زبری سطح به مقدار خیلی کم کاهش می‌یابد. در شکل **۵** نمودارهای اثر تعامل فاکتورها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عوامل فشار و نوع ذره اثر تعامل دارند طوری که در نوع ذره‌های اکسید آلومینیم ۱۵۰ و ۱۸۰ مش با افزایش فشار زبری افزایش می‌یابد ولی در نوع ذره دانه شیشه‌ای با افزایش فشار زبری کاهش می‌یابد. دو فاکتور نوع ذره و زمان هم اثر تعامل خیلی کمی دارند. در شکل **۶** نمودار کانتوری مربوط به دو اثر مهم نوع ذره و فشار نشان داده شده است. از روی این نمودار می‌توان مقادیر مناسب برای عوامل مهم را از لحاظ زبری سطح تعیین نمود. مشاهده می‌شود که کمترین زبری سطح مربوط به ناحیه سفید است که نوع ذره اکسید آلومینیم ۱۸۰مش و کمترین فشار(۲۰psi) می‌باشد و بیشترین زبری سطح مربوط به ناحیه تیره رنگ است که مبین نوع ذره اکسید آلومینیم ۱۵۰ مش و بیشترین فشار(۱۰۰psi) می‌باشد. با توجه به اینکه زبری سطح مورد نیاز برای پره مورد نظر کمتر از ۶۳ میکروواینچ باشد لذا مطابق شکل **۶** از لحاظ زبری سطح تنها انتخاب یکی از دو نوع ذره اکسید آلومینیم۱۸۰مش و دانه شیشه‌ای۲۲۰مش بدون محدودیت عوامل زمان و فشار مجاز است.



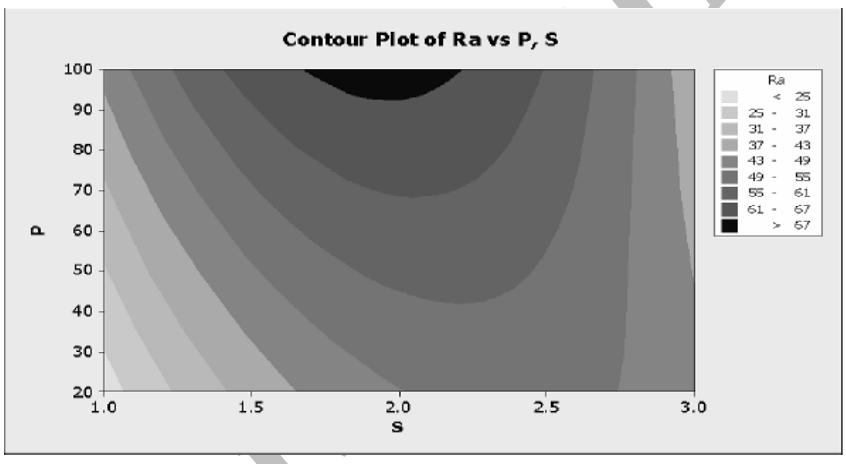
شکل (۴): نمودارهای اثرهای اصلی فاکتور ها بر زبری سطح.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۵): نمودارهای اثر تعامل فاکتورها بر زبری سطح.



شکل (۶): نمودار کانتوری مربوط به تأثیر دو فاکتور نوع ذره و فشار بر زبری سطح.

۳-۲- تغییر ضخامت

با توجه به اینکه ضخامت لایه سفید در هریک از نمونه‌ها غیریکنواخت بوده و امکان اندازه‌گیری میزان ضخامت برداشته شده در اثر اعمال فرآیند دانه‌زنی با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی[1] (SEM) خیلی مشکل است، لذا برای به دست آوردن میزان ضخامت برداشته شده، قبل و بعد از اعمال فرآیند، ضخامت نمونه‌ها با دستگاه اندازه‌گیری مختصاتی[2] (CMM) با دقت ۰/۵ میکرون اندازه‌گیری گردید. بدین منظور ابتدا سطح مقابل سطح وایرکات شده، سنگ‌زنی شد و سپس با قرار دادن این سطح بر روی میز دستگاه CMM و با مبنا گرفتن سطح میز دستگاه، ضخامت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. مقدار ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از دانه‌زنی و مقدار تغییر ضخامت در جدول **۴** نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل دقت بالایی ندارند، طوری که با توجه به منفی بودن بعضی مقادیر می‌توان گفت نتایج حداقل ۲۲ میکرون خطا دارند که احتمالاً به دلیل دقت پایین دستگاه اندازه گیری است.

این بار هم با صرف نظر از اثر تعامل هر سه فاکتور (S,P,T) تحلیل انجام گردید. با انجام تحلیل توسط نرم افزار، جدول آنالیز واریانس به صورت جدول **۵** خواهد شد. مشاهده می‌شود که مقادیر P از حداکثر خطای نوع اول که ۰/۱ فرض شده است بالاتر هستند، بنابراین در صورت صحت فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها هیچ کدام از

1- Scanning Electron Microscope
2- Coordinate Measuring Machine

Archive of SID

www.SID.ir

عوامل مؤثر نیستند. برای بررسی صحت فرض نرمال بودن، نمودار توزیع نرمال خطا را مطابق شکل **۷** بررسی می‌کنیم. همان طور که مشاهده می‌شود در نمودار توزیع نرمال خطا، داده‌ها به خط مربوطه منطبق نیستند و مقداری با آن فاصله دارند. بنابراین با اعمال یک تابع تبدیل مناسب بر روی داده‌های متغیر پاسخ (H) تحلیل روی مقادیر جدید انجام گردید. بدین منظور با استفاده از روش تبدیل Box-Cox توان مناسب (λ) تابع تبدیل را به دست می‌آوریم. همان طور که در شکل **۸** مشاهده می‌شود مقدار مناسب λ برابر ۰/۲۶ می‌باشد یعنی تابع تبدیل به صورت $y^{0.26}$ می‌باشد. با اعمال این تابع تبدیل و تحلیل داده های جدید جدول آنالیز واریانس به صورت جدول **۶** خواهد شد. همان طور که مشاهده می‌شود با اعمال تابع تبدیل هم هیچ یک از عوامل و اثرهای تعامل آنها مؤثر نیستند. همچنین مطابق نمودار توزیع نرمال خطا در شکل **۹**، داده‌ها با خط مربوطه منطبق نیستند و مقداری با آن فاصله دارند. بنابراین فرض نرمال بودن داده ها معقول نمی باشد لذا تحلیل آنالیز واریانس برای متغیر پاسخ تغییر ضخامت درست نمی باشد. و نمی‌توانیم از روی آن در مورد تأثیر فاکتورها بر تغییر ضخامت قضاوت کنیم و بررسی توسط نمودارهای اثر اصلی فاکتورها و تعامل اثر آن‌ها انجام می‌شود که تا حدودی نشان دهندهٔ اثر فاکتورها می‌باشند. همچنین این بررسی توسط عکس‌های به دست آمده از SEM نیز انجام گردیده است.

جدول (۴): مقدار ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات و مقدار تغییر ضخامت.

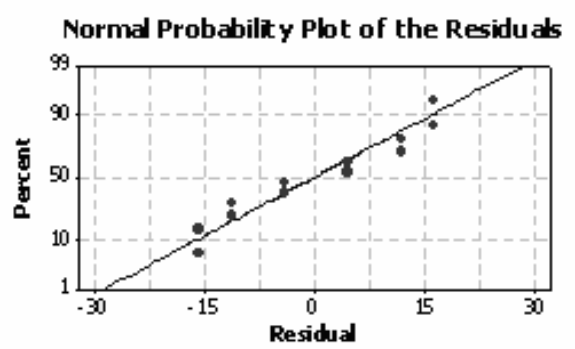
	قبل از دانه زنی					بعد از دانه زنی					تغییر ضخامت
part number	H1	H2	H3	H4	Hi(average)	H1	H2	H3	H4	Ho(average)	ΔH (μm)
1	8.7665	8.7915	8.8165	8.7925	8.79175	8.741	8.7945	8.724	8.7875	8.76175	-30
2	9.868	9.8635	9.86	9.8715	9.86575	9.825	9.513	9.803	9.6545	9.698875	-166.875
3	9.857	9.871	9.8635	9.8655	9.86425	9.846	9.868	9.864	9.848	9.8565	-7.75
4	9.857	9.871	9.8635	9.8655	9.86425	9.801	9.818	9.82	9.766	9.801125	-63.125
5	8.8805	8.8545	8.8055	8.8295	8.8425	8.815	8.78	8.805	8.7985	8.799625	-42.875
6	9.8425	9.856	9.8335	9.8555	9.846875	9.8675	9.868	9.87	9.8665	9.868	+21.125
7	9.832	9.84	9.8165	9.8455	9.8335	9.8385	9.805	9.841	9.807	9.822875	-10.625
8	9.8615	9.865	9.867	9.8645	9.8645	9.8275	9.821	9.825	9.8215	9.823625	-40.875
9	9.8425	9.856	9.8335	9.8555	9.846875	9.863	9.7255	9.83	9.7975	9.803875	-43
10	9.832	9.84	9.8165	9.8455	9.8335	9.8065	9.866	9.868	9.821	9.84025	+6.75
11	9.8615	9.865	9.867	9.8645	9.8645	9.5525	9.851	9.751	9.79	9.736	-128.5
12	9.868	9.8635	9.86	9.8715	9.86575	9.8535	9.741	9.828	9.7985	9.80525	-60.5

جدول (۵): آنالیز واریانس برای تغییر ضخامت.

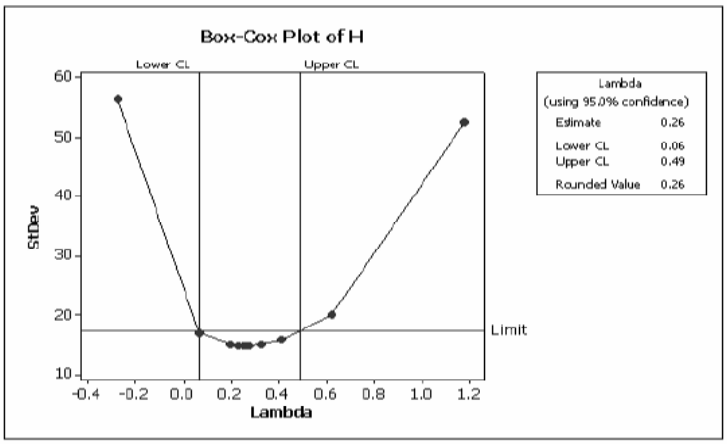
Source	DF	SS	MS	F	P
S	**2**	**1133.4**	**566.7**	**0.68**	**0.594**
P	**1**	**86.0**	**86.0**	**0.10**	**0.778**
T	**1**	**647.2**	**647.2**	**0.78**	**0.470**
S*P	**2**	**3009.0**	**1504.5**	**1.81**	**0.355**
S*T	**2**	**4345.5**	**2172.7**	**2.62**	**0.276**
P*T	**1**	**32.9**	**32.9**	**0.04**	**0.860**
Error	**2**	**1658.3**	**829.1**		
Total	**11**	**10912.2**			

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۷): نمودار توزیع نرمال خطا برای میزان تغییر ضخامت.



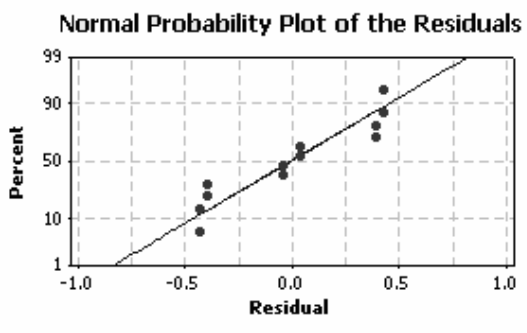
شکل (۸): نمودار **Box-Cox** برای **H**.

جدول (۶): آنالیز واریانس برای تغییر ضخامت تبدیل یافته.

Source	DF	SS	MS	F	P
S	2	0.9793	0.4897	0.71	0.584
P	1	1.0084	1.0084	1.47	0.349
T	1	0.0854	0.0854	0.12	0.758
S*P	2	2.4941	1.2470	1.82	0.355
S*T	2	3.2090	1.6045	2.34	0.300
P*T	1	2.0822	2.0822	3.03	0.224
Error	2	1.3730	0.6865		
Total	11	11.2315			

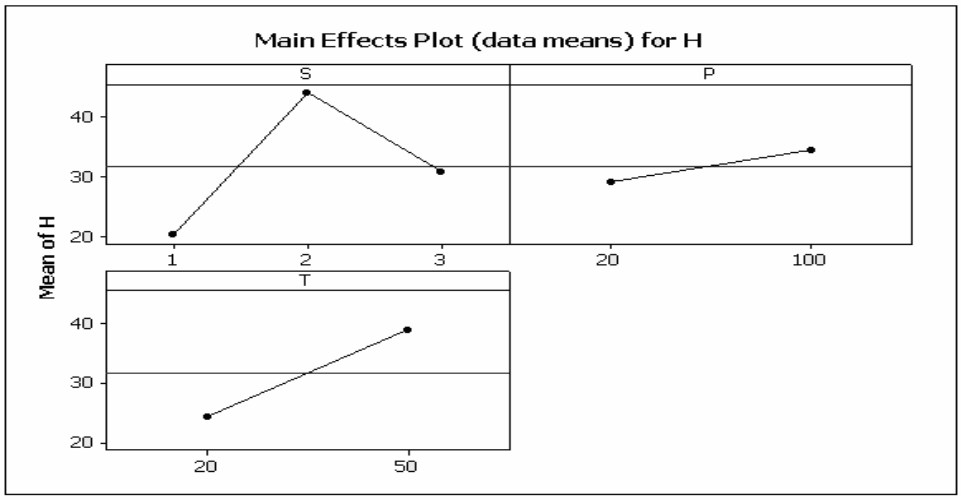
Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۹): نمودار توزیع نرمال خطا برای **H** تبدیل یافته.

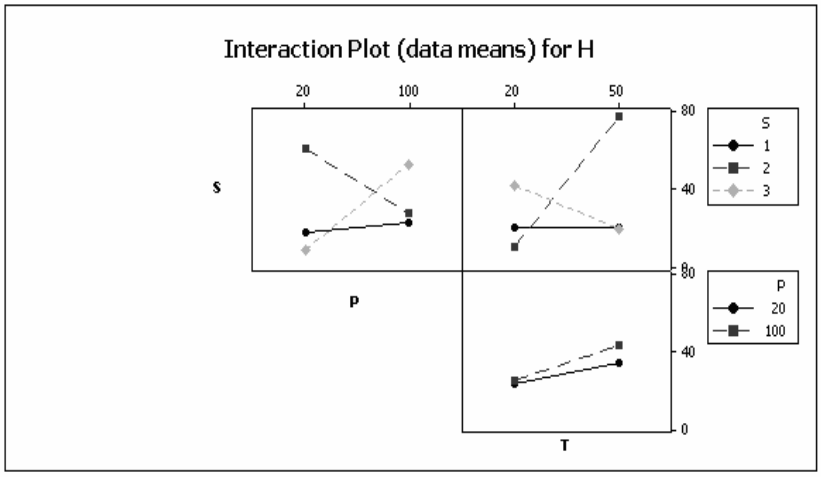
در شکل **۱۰** نمودارهای اثرهای اصلی نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که از نظر نوع ذره به ترتیب اکسید آلومینیم ۱۵۰مش و دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و اکسید آلومینیم ۱۸۰مش بیشترین مقدار ضخامت را برمی‌دارند و با افزایش عوامل زمان و فشار مقدار ضخامت برداشته شده افزایش می‌یابد. و تأثیر فشار کم و زمان زیاد است. در شکل **۱۱** اثر تعامل فاکتورها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عوامل زمان و فشار با فاکتور نوع ذره تعامل اثر دارند. در نوع ذره اکسیدآلومینیم ۱۵۰مش با افزایش فشار، مقدار ضخامت برداشته شده کاهش می‌یابد و در نوع ذره دانه شیشه‌ای با افزایش فشار، ضخامت برداشته شده افزایش می‌یابد. با توجه به تأثیر نسبتاً زیاد نوع ذره و مدت زمان بر ضخامت بر داشته شده، در شکل **۱۲** نمودار کانتوری مربوط به اثر دو فاکتور زمان و نوع ذره بر متغیر پاسخ تغییر ضخامت (H) نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که بیشترین ضخامت برداشته شده مربوط به ناحیه تیره رنگ است که حالت نوع ذره اکسید آلومینیم ۱۵۰مش و زمان ۵۰ ثانیه است و کمترین ضخامت برداشته شده مربوط به حالت نوع ذره اکسید آلومینیم ۱۸۰مش و زمان ۲۰ ثانیه است و نوع ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش در بین این دو حالت است.



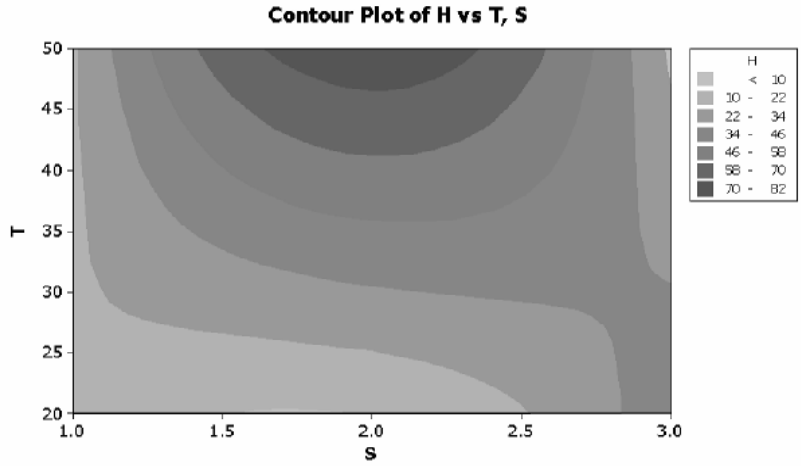
شکل (۱۰): نمودارهای اثرهای اصلی برای **H**.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۱۱): اثر تعامل فاکتورها برای **H**.



شکل (۱۲): نمودار کانتوری مربوط به تأثیر دو فاکتور نوع ذره و زمان بر **H**.

۳-۳- مقادیر مناسب عوامل

با استفاده از تحلیل انجام شده روی هر دو متغیر پاسخ زبری و تغییر ضخامت می‌توان نتیجه گرفت که از لحاظ زبری سطح تنها مجاز به انتخاب یکی از دو نوع ذره اکسید آلومینیم۱۸۰مش و دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش بدون محدودیت عوامل زمان و فشار هستیم و از لحاظ تغییر ضخامت هم بیشترین ضخامت برداشته شده مربوط حالت نوع ذره اکسید آلومینیم ۱۵۰مش و زمان ۵۰ ثانیه است و کمترین ضخامت برداشته شده مربوط به حالت نوع ذره اکسید آلومینیم ۱۸۰مش و زمان ۲۰ ثانیه است. و نوع ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش بین این دو حالت است.

همان طور که قبلاً ذکر شد با توجه به دقت نسبتاً پایین نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها همچنین نرمال نبودن توزیع داده‌ها در این متغیر پاسخ، بهتر است با تکیه بر نتایج مربوط به زبری سطح، ضخامت برداشته شده را با استفاده از دستگاه SEM بررسی کنیم. همچنین از آنجا که عامل زمان در زبری سطح تأثیر چندانی ندارد و باعث افزایش میزان تغییر ضخامت می‌شود لذا زمان هرچه بیشتر باشد بهتر است ولی باید توجه شود که طبق موارد مشاهده شده، زمان بیشتر ممکن است قطعه را از دقت ابعادی مطلوب خارج کند.

Archive of SID

www.SID.ir

۴- بررسی تجربی شرایط بهینه فرآیند

با استفاده از شرایط بهینه حاصل از تحلیل آزمایش‌ها، نمونه‌هایی طبق این شرایط تحت عملیات دانه‌زنی قرار گرفتند. به دلیل اینکه مقادیر مربوط به تغییر ضخامت نمونه‌ها از دقت بالایی برخوردار نبودند با توجه به نتایج حاصل از زبری سطح، نمونه‌های بیشتری را دانه زنی کرده و زبری سطح و لایه سفید توسط SEM به صورت زیر بررسی گردید.

۴-۱- زبری سطح

نتایج بررسی زبری سطح نمونه‌ها در جدول **۷** نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود اندازه زبری سطح نمونه‌ها به ترتیب اکسید آلومینیم۱۵۰مش، دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و اکسید آلومینیم ۱۸۰ مش می‌باشد. با توجه به اینکه طبق استاندارد پره، زبری سطح ریشه پره باید کمتر ازμin ۶۴ می‌باشد بنابراین از لحاظ زبری سطح نوع ذره اکسید آلومینیم ۱۵۰ مش غیر قابل قبول بوده ولی نوع ذرات دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و اکسیدآلومینیم ۱۸۰ مش قابل قبول هستند. به همین دلیل لایه سفید حاصل از اعمال این دو نوع ذره بررسی می‌شود.

جدول (۷): زبری سطح نمونه‌های دانه زنی شده.

شماره	شرایط	زبری سطح Ra (μin)
۱	دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش, فشار ۱۰۰psi	۵۳، ۴۵، ۵۱
۲	دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش, فشار ۵۰psi	۴۱، ۳۶
۳	اکسیدآلومینیم۱۵۰مش, فشار ۱۰۰psi	۸۶، ۸۰
۴	اکسیدآلومینیم۱۵۰مش, فشار ۵۰psi	۶۲، ۴۵، ۵۶
۵	اکسیدآلومینیم۱۸۰مش, فشار ۱۰۰psi	۳۶، ۴۳، ۳۶

۴-۲- لایه سفید

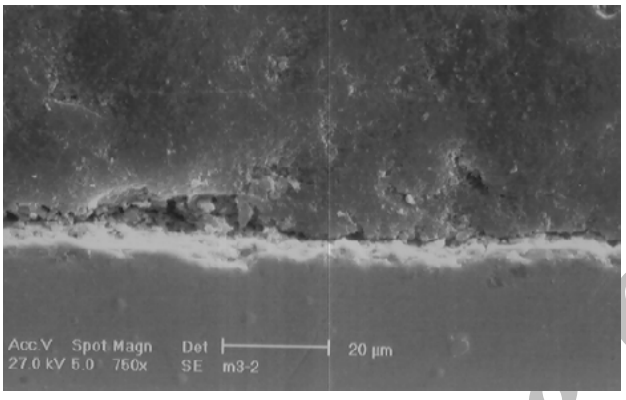
برای بررسی لایه سفید، نمونه‌های وایرکات شده و دانه زنی شده با ذره‌های نوع دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و اکسید آلومینیم ۱۸۰مش، مقطع زده شدند و بعد از مانت کردن پولیش کاری شدند و سپس با دستگاه SEM بررسی گردیدند. در شکل (۱۳) نمونه وایرکات شده با وایرکات معمولی در دو حالت دانه زنی نشده و دانه زنی شده با ذره اکسیدآلومینیم۱۸۰مش و فشار ۱۰۰psi و زمان ۳دقیقه نشان داده شده است. با مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود که در اثر دانه زنی با این شرایط با وجود مدت زمان نسبتاً زیاد اعمال فرآیند، لایه سفید خوب حذف نشده است. لذا این نوع ذره علی رغم زبری سطح مناسب، برای حذف لایه سفید مناسب نمی‌باشد.

در شکل **۱۴** نمونه‌های وایرکات شده با وایرکات معمولی و دانه‌زنی شده با نوع ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و فشار ۱۰۰psi و زمان۵۰ ثانیه در دو بزرگنمایی مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر دانه‌زنی با این نوع ذره علی رغم مدت زمان کم اعمال فرآیند، لایه سفید تقریباً حذف شده است. در شکل **۱۵-الف** هم نمونه وایرکات شده با وایرکات SI 2020 و دانه‌زنی شده با نوع ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و فشار ۱۰۰psi و زمان ۱۵ ثانیه نشان داده شده است. در این نمونه‌ها هم مشاهده می‌شود که در اثر دانه‌زنی با این شرایط لایه سفید تقریباً حذف شده است. برای بررسی بهتر، در شکل **۱۵-ب** سطح مقطع نمونه وایرکات نشده و دانه‌زنی شده تحت شرایط نوع ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و فشار ۱۰۰psi و زمان۵۰ ثانیه نشان داده شده است. با مقایسه دو شکل **۱۵-الف** و **۱۵-ب** مشاهده می شود که در اثر دانه زنی نمونه وایرکات نشده، لایه سفیدی که ایجاد شده است به اندازه لایه سفیدی است که بعد از دانه‌زنی نمونه‌های وایرکات شده با هر دو نوع وایرکات دیده می‌شود لذا بررسی ضخامت لایه سفید نشان می‌دهد ذرات دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش توانایی حذف لایه سفید را

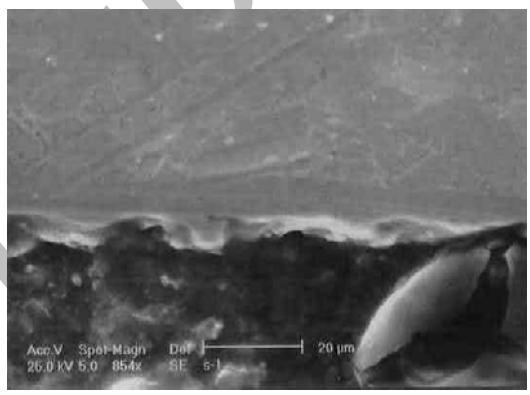
Archive of SID

www.SID.ir

تا حد قابل قبولی دارد ولی اکسید آلومینیم۱۸۰مش حتی در مدت زمان زیاد، مقدار کمی از لایه را می‌تواند حذف کند. بنابراین تنها ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰ مش می‌تواند برای حذف لایه سفید استفاده شود و در عین حال زبری سطح مناسبی هم بدهد. لازم به ذکر است که با توجه به مکانیزم عملیات دانه‌زنی، در صورت اعمال غیر یکنواخت فرآیند ممکن است میزان لایه برداشته شده از نقاط مختلف سطح یکسان نباشد، در نتیجه تا حد امکان عملیات دانه‌زنی باید به صورت یکنواخت به همه نقاط سطح اعمال شود و به ویژه در صورت اعمال به ریشه پره با توجه با انحناهای آن، بعد از عملیات، لازم است سطح از لحاظ دقت ابعادی مورد بررسی قرار گیرد. ثانیا با توجه به اینکه در نمونه‌ها لبه نمونه بررسی می‌شود در موقع پولیش کاری دستی، سطح مقطع در اثر اعمال فشار غیر یکنواخت لبه پخ خورده و این در نتایج حاصل، تأثیر زیادی خواهد گذاشت به همین جهت لازم است نمونه‌ها قبل از پولیش کاری حتماً مانت گردند و یا نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پولیش‌کاری که نیروی اعمالی به نمونه را به طور خودکار به صورت یکنواخت تنظیم می‌کند پولیش شوند.

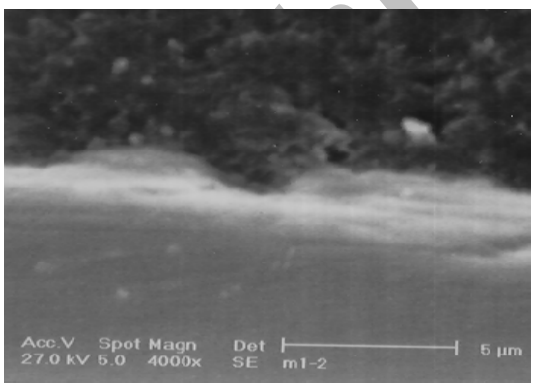


ب

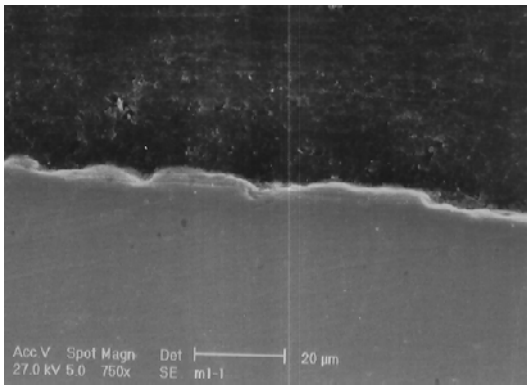


الف

شکل (۱۳): نمونه‌های وایرکات شده با وایرکات معمولی: الف- بدون دانه زنی (**x**۷۵۰) و ب- دانه زنی شده با ذره اکسیدآلومینیم۱۸۰مش و فشار ۱۰۰psi و زمان ۳دقیقه (**x**۷۵۰).



ب

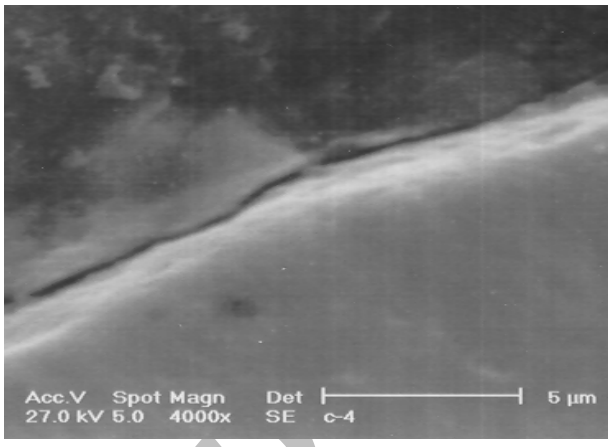


الف

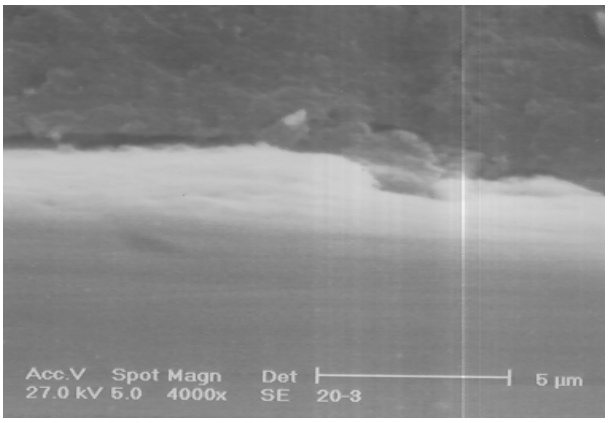
شکل (۱۴): نمونه‌های وایرکات شده با وایرکات معمولی و دانه زنی شده با دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و فشار ۱۰۰psi و زمان۵۰ ثانیه. الف- (**x**۷۵۰) و ب-(x۴۰۰۰).

Archive of SID

www.SID.ir



الف



ب

شکل (۱۵- الف): نمونه وایرکات شده با وایرکات SI 2020 و دانه زنی شده ۱۵ ثانیه (x۴۰۰۰) ب- نمونه وایرکات نشده و دانه زنی شده ۵۰ ثانیه (x۴۰۰۰) شرایط دانه زنی: نوع ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و فشار ۱۰۰psi.

۴-۳- سختی سطح

در جدول **۸** سختی سطح نمونه‌های وایرکات شده در دو حالت دانه زنی نشده و دانه زنی شده با هر سه نوع ذره در فشار ۱۰۰psi همچنین نمونه اصلی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در حالت کلی در اثر دانه زنی سختی سطح نمونه‌ها افزایش می‌یابد و همچنین با مقاسیه سختی حاصل از انواع ذرات دیده می‌شود که به ترتیب سختی سطح حاصل از دانه زنی با دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش, اکسید آلومینیم ۱۵۰مش و اکسید آلومینیم ۱۸۰مش دارای بیشترین مقدار می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه از بررسی‌های قبلی نوع ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش برای دانه زنی نمونه‌ها انتخاب شده است که سختی سطحی حدود ۴۱۵ویکرز می‌دهد در حالی که سختی سطح نمونه اصلی(مقدار لازم برای ریشه پره) ۳۶۴ ویکرز می‌باشد. بنابراین، از لحاظ سختی هم نمونه‌های دانه‌زنی شده با دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش سختی کافی را دارند.

جدول (۸): اندازه سختی سطح نمونه‌های ماشینکاری شده با وایرکات SI 2020.

سختی(HV)			نمونه
دانه زنی شده تحت فشار ۱۰۰psi		دانه زنی نشده	
دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش	اکسید آلومینیم ۱۸۰مش	اکسید آلومینیم ۱۵۰مش	-	نوع ذره
۴۱۵	۴۰۸	۴۱۰	۳۶۷	ماشینکاری شده با وایرکات
-			۳۶۴	نمونه اصلی

۵- نتیجه‌گیری

از بهینه سازی عواملی فرآیند دانه زنی با استفاده از روش طراحی آزمایشات نتایج زیر به دست می آید:

۱- از لحاظ زبری سطح تنها مجاز به انتخاب یکی از دو نوع ذره اکسید آلومینیم۱۸۰مش و دانه شیشه‌ای ۲۲۰ مش بدون محدودیت عوامل زمان و فشار هستیم.

۲- از لحاظ تغییر ضخامت هم بیشترین ضخامت برداشته شده مربوط حالت نوع ذره اکسید آلومینیم ۱۵۰مش و زمان ۵۰ ثانیه است و کمترین ضخامت برداشته شده مربوط به حالت نوع ذره اکسید آلومینیم ۱۸۰مش و زمان ۲۰ ثانیه است. و نوع ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش ما بین

Archive of SID

www.SID.ir

این دو حالت است. همچنین با توجه به دقت نسبتاً پایین نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها همچنین نرمال نبودن توزیع داده‌ها در این متغیر پاسخ، لازم است لایه سفید نمونه‌ها با استفاده از دستگاه SEM بررسی شود و

۳- از آنجا که عامل زمان در زبری سطح تأثیر چندانی ندارد ولی باعث افزایش میزان تغییر ضخامت می‌شود لذا زمان هرچه بیشتر باشد بهتر است ولی باید توجه کرد که طبق موارد مشاهده شده زمان زیاد ممکن است قطعه را از دقت ابعادی مطلوب خارج کند.

بررسی تجربی شرایط بهینه عملیات دانه‌زنی نشان می هد که نوع ذره دانه شیشه‌ای ۲۲۰مش و بیشترین فشار(۱۰۰psi) توانایی حذف لایه سفید همراه با زبری سطح مناسب و سختی سطح لازم را دارا می‌باشد.

تشکر و تقدیر

از شرکت صنایع هواپیمایی ایران، صنعت ساخت قطعات و موتورهای توربینی بدلیل حمایت مالی و فراهم نمودن تجهیزات موردنیاز انجام این تحقیق تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

1. Lee, H.T., Hsu, F.C., and Tai, T.Y. “Study of Surface Integrity, Using the Small area EDM Process with a Copper–tungsten Electrode”, Materials Science and Eng., A364 346–356, 2004.
2. Hascalyk, A. and Caydas, U. “Experimental Study of Wire Electrical Discharge Machining of AISI D5 Tool Steel”, J. Mater. Process. Tech. Vol. 148, No. 1, pp. 362-367, 2004.
3. Ghanem, F., Braham C., and Sidhom, H. "Influence of Steel Type on Electrical Discharge Machined Surface Integrity”, J. Mater. Process. Tech., Vol. 142, No. 1, pp. 163-173, 2003.
4. Velterop, L. “Influence of Wire Electrical Discharge Machining on the Fatigue Properties of High Strength Stainless Steel”, National Aerospace Laboratory of the Netherlands, Vol. 104, No. 2, 2003.
5. Song, X., Reynaerts, D., Meeusen, W., and H.V. Brussel “A Study on the Elimination of Micro-cracks in a Sparked Silicon Surface”, Sensors and Actuators, Vol. 92, No. 2, pp. 286-291, 2001.
6. Qu, J., Shih, A.J., Scattergood, R.O., and Luo, J. “Abrasive Micro-blasting to Improve Surface Integrity of Electrical Discharge Machined WC-Co Composite”, J. Mater. Process. Tech., Vol. 144, No. 1, pp. 286-291, 2004.
7. Kennedy D.M., Vahey, J., and Hanney D., "Micro Shot Blasting of Machine Tools for Improving Surface Finish and Reducing Cutting Forces in Manufacturing", Materials and Design, Vol. 26, No. 1, pp. 203–208, 2005
8. Naidu, N.K.R. and Raman, S.G. "Effect of Shot Blasting on Plain Fatigue and Fretting Fatigue Behaviour of Al–Mg–Si Alloy AA6061", Int. J. Fatigue, Vol. 27, No. 2, pp. 323–331, 2005.
۹. میرزالو، ع. "بررسی ماشینکاری ریشه پره کمپرسور موتورهای توربین گازی با فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۳.
10. Montgomery, D.C. "Design and Analysis of Experiments", John Wiley & Sons, New York, 2001.

Archive of SID

www.SID.ir