

Improvement of surface quality in micro milling of mild carbon steel

S.Amini¹, A.Shams²

1- Associated Prof., Manufacturing Department, Faculty Of Mechanic, University of Kashan

2- MS student, Mechanic Department, University of Allame Naeini

Abstract

Micro milling is one of the micro engineering process that has machinability of workpies surface and good acuuracy. In this research, surface quality parameters as surface roughness and chip height are investigated and improved by DOE method for mild carbone steel(CK45). Input parameters are depth of cut, spindle speed and feed. Effect of these parameters is analyzed by signal to noise ratio(S/N) and ANOVA analysis and improvement result is applied for surface roughness and chip height.

Keywords: Micro milling, Improvement, Carbone steel(CK45), Surface quality, Statistical analysis.

بهینه‌سازی کیفیت سطح در میکروفرزکاری فولاد کربنی

سعید امینی^۱، علی شمس^۲

گروه ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان

گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علامه نایینی

چکیده

میکرو فرز کاری از مهمترین پروسه های تولید در میکرو مهندسی است که دارای قابلیت تولید سطوح هندسی پیچیده با دقت و صافی سطح خوب می باشد، در این تحقیق با استفاده از روش طراحی آزمایش (DOE) و تحلیل آماری بر روی نتایج، به بررسی و بهینه سازی پارامترهای کیفیت سطح شامل زبری سطح و ارتفاع پلیسه در فولاد کربنی CK45 می پردازد. در این مطالعه پارامترهای کنترل شده در آزمایش ها شامل عمق برش، سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی می باشند در ادامه تاثیر مقادیر فوق بر زبری سطح و ارتفاع پلیسه ارزیابی شده و با استفاده از فاکتورهای نسبت سیگنال به نویز (S/N) و تحلیل واریانس (ANOVA) ترکیب بهینه ای جهت بهبود زبری سطح و ارتفاع پلیسه ارائه شده است.

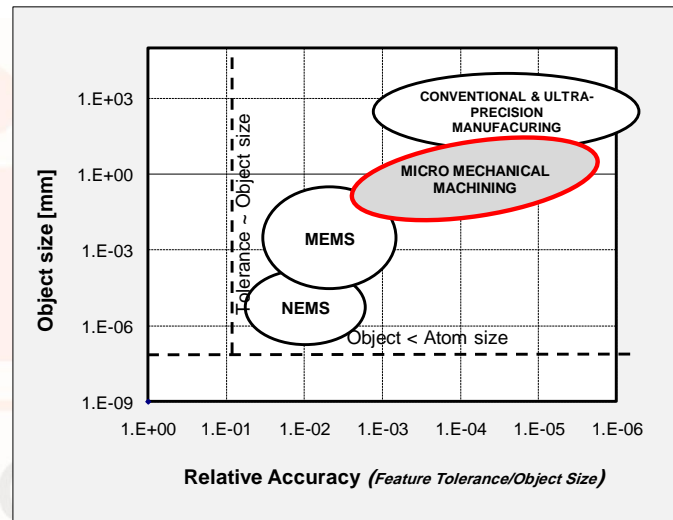
واژه‌های کلیدی: میکروفرزکاری، بهینه سازی، فولاد کربنی CK45، کیفیت سطح، تحلیل آماری.

^۱دانشیار(نویسنده پاسخگو): amini.s@kashanu.ac.ir

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد

مقدمه

کاربرد اجزای بسیار دقیق کوچک به طور گسترده برای صنایع مختلف مانند هوافضا، پزشکی، الکترونیک، محیط زیست، ارتباطات و خودرو رو به افزایش است. میکرو ماشین کاری فرآیند تولید قطعات کوچک با استفاده از فن آوری های کوچک است. سیستم های کوچک می توانند باعث بهبود قابلیت انتقال، بهبود دسترسی، کاهش مواد و انرژی مصرفی، کاهش نمونه مورد نیاز و بهتر شدن فرآیند یکپارچه سازی و اتوماسیون شوند. ساخت اجزای کوچک نیاز به فن آوری دقیق و ابزار مناسب دارد. در حال حاضر، میکرو فرزکاری برای تولید اشکال سه بعدی از محصولات کوچک و ظریف، در طیف گسترده ای از مواد، بسیار مناسب است (پریانان و همکارانش، ۲۰۱۱). تولید قطعات با ابعاد میکرو نیازمند بهره گیری از روش های ساخت مطمئن و تکرارپذیر است. بسیاری از روش های تولید قطعات میکرو بر پایه تکنیک های فرآوری مواد نیمه هادی توسعه یافته اند. اکثر این روش ها زمان گیر، محدود به چند ماده (مواد پایه سیلیکونی) و تنها قادر به تولید هندسه های صفحه ای هستند یکی از روش های ساخت قطعات و مجموعه های مینیاتوری، برای اجزائی که ابعاد آنها از چندین میکرومتر تا چند میلی متر است، روش های میکرو ماشینکاری مکانیکی می باشند (حقیقت دوست، ۱۳۸۹) (شکل ۱).



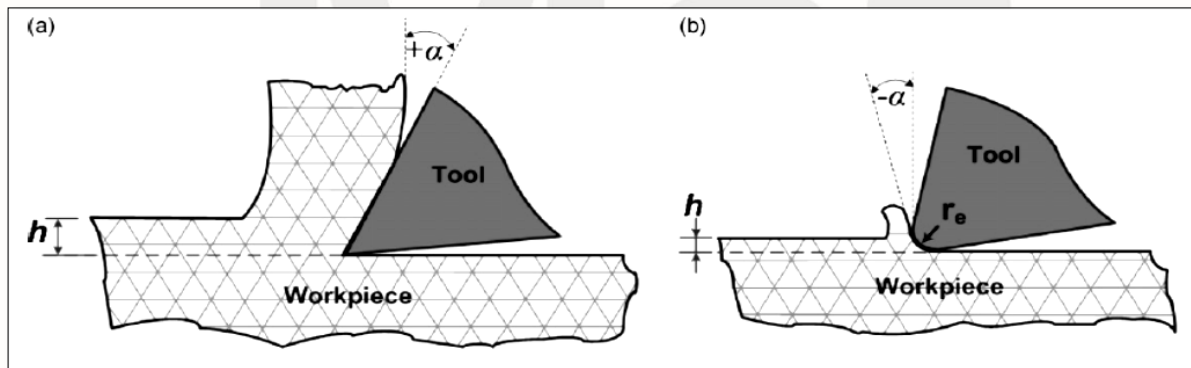
شکل ۱: جایگاه فرآیند های میکرو ماشینکاری (رسچارد و همکارانش)

در بین روش های میکرو ماشینکاری، میکرو فرزکاری از جایگاه ویژه ای برخوردار می باشد. شاید روش های میکرو فرزکاری مانند روش های لیتوگرافی نیازمند تجهیزات بسیار گران و پیچیده باشند اما نرخ بالای تولید، این روش ها را مقرون به صرفه می سازد. علاوه بر این در میکرو فرزکاری امکان تولید سطوح سه بعدی با شکلی آزاد مانند آنچه در میکرو- قالب های تزریق پلاستیک و پره های توربین نیاز است، وجود دارد. همچنین در روش میکرو فرزکاری امکان ماشینکاری گسترده ی وسیعی از مواد، از جمله آلیاژهای فلزی، کامپوزیت ها، پلیمرها و مواد سرامیکی وجود دارد (حقیقت دوست، ۱۳۸۹).

اصل میکرو ماشین کاری شبیه به عملیات برش معمولی است. سطح قطعه کار به طور مکانیکی با استفاده از میکرو ابزارها براده برداری خواهد شد. در عملیات میکرو ماشین کاری، سرعت چرخش اسپیندل برای حفظ بهره وری بایستی بالا باشد از این رو قطر کوچک ابزار باعث کاهش میزان براده برداری می شود. میکرو فرزکاری به عنوان یک فرآیند مهم میکرو ماشین کاری به طور گسترده ای در بسیاری از صنایع تولیدی به خاطر قابلیت ساخت سطوح پیچیده هندسی با دقت و صافی سطح قابل قبول استفاده می شود. میزان براده

برداری و کیفیت سطح در میکروفرزکاری از جنبه‌های مهم هستند، که نیاز به توجه دو جانبه از صنعتگران و گروه‌های تحقیق و توسعه دارد. یکی از گرایش‌های صنعت مدرن، ساخت محصول با کمترین هزینه و در کوتاه‌ترین زمان است. بررسی مقالات متعدد نشان می‌دهد که محققان بیشترین کار را در زمینه توسعه، نظارت و کنترل فرآیند میکرو ماشین‌کاری انجام داده‌اند اما کارهای محدودی در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند گزارش شده است. در این مطالعه، طول ابزار و شعاع به عنوان پارامترهای ثابت مطرح هستند و از خمش و فرسایش ابزار صرف‌نظر شده است. این مقاله بر روش تاگوچی برای بهینه‌سازی در میکرو فرزکاری با توجه به سرعت اسپیندل، میزان و عمق براده به عنوان پارامترهای برش تمرکز دارد. درصد سیگنال به نویز (S/N) و تجزیه و تحلیل پارتو واریانس (ANOVA) برای تجزیه و تحلیل اثر این پارامترها فرزکاری به کار می‌روند. با استفاده از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش (DOE)، دیگر آثار مهم مانند روابط میان پارامترهای فرز نیز بررسی شده است (پریانان و همکارانش، ۲۰۱۱).

در فرآیند میکروفرزکاری عمدتاً ضخامت براده از شعاع لبه برش ابزار کوچکتر است اما در فرزکاری به روش سنتی ضخامت براده بطور قابل توجهی از شعاع لبه برنده ابزار بزرگتر می‌باشد و این بیانگر یک مفهوم اساسی است که در میکرو فرزکاری لبه برش ابزار را نمی‌توان یک لبه تیز در نظر گرفت و عملیات برش و شکل‌گیری براده در تمام طول لبه‌ی برش (که لبه گرد می‌باشد)، انجام می‌شود (شاولو، ۱۹۹۵) (شکل ۲).



شکل ۲: تفاوت مکانیزم برش در ماکروفرزکاری (a) و میکروفرزکاری (b) (لای و همکارانش، ۲۰۰۸).

ساختمان برش در میکروفرزکاری با یک زاویه براده منفی که به شدت بر روی اندازه نیروهای برش و شخم تاثیر می‌گذارد همراه است (شکل ۲). طبق این اصل لبه برش سطح قطعه‌کار را به شدت می‌فشارد و نیروی شخم افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. در این مکانیزم حجم قابل توجهی از ماده کاملاً وارد فاز پلاستیک شده در حالی که حجم ناچیزی از ماده برداشته می‌شود. حاصل این رویداد افزایش قابل توجه انرژی مخصوص برش است (آراماچرن و ماتینونگا، ۲۰۰۸). در میکروفرزکاری این پدیده "اثراندازه" نامیده می‌شود (شکل ۳). نکته مهم دیگر این که در میکروفرزکاری همواره براده تشکیل نمی‌شود و شکل‌گیری براده تحت تاثیر عاملی به نام حداقل ضخامت براده قرار دارد. حداقل ضخامت براده بدان معناست که پیشروی بر دندانه یا ضخامت براده، باید از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد تا براده تشکیل شود.



شکل ۳: مکانیزم برش در میکروفرزکاری و پدیده اثر اندازه (شن، ۲۰۱۳).

فولاد کربنی CK45

در این مطالعه یکی از با فولادهای مهم عملیات حرارتی شونده و سختی پذیر، فولاد کربنی CK45 مورد بررسی قرار گرفته است. از نظر ترکیبات علاوه بر کربن عناصری مانند سیلیسوم، کروم، مولیبدن و نیکل در این فولاد وجود دارد (شکل ۴) که با توجه به کاربردهای فراوان این نوع فولاد و خواص مختلف متالورژی و مکانیکی، بررسی آن جهت استفاده بهینه خصوصاً در صنایع حساس و مینیاتوری، ضروری می نماید.

Steel CK45 (Mat.No. 1.1191, DIN Ck45, AISI 1045)						
Designation by Standards						
Brand Name	Ravne No.	Mat. No.	DIN	EN	AISI	
CK45	620	1.1191	Ck45	C45E	1045	
Chemical Composition (in weight %)						
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V W Others
0.46	max. 0.40	0.65	max. 0.40	max. 0.10	max. 0.40	- - (Cr+Mo+Ni)=max. 0.63

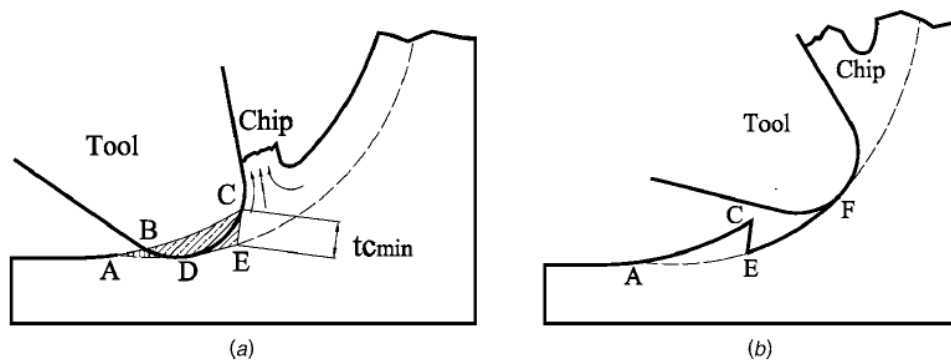
شکل ۴: عناصر تشکیل دهنده و علائم شناسایی استاندارد فولاد کربنی CK45 (سایت metalravne)

استحکام بالا، چقرمگی بالا، مقاومت به سایش خوب، ضریب انبساط حرارتی پایین، نقطه ذوب بالا، مقاومت به شوک بالا از خصوصیات فولاد کربنی CK45 می باشد. فولاد کربنی CK45 در اجزاء با چقرمگی بالا در خودرو و هواپیما مانند سگدست، اکسل شاتون، میل لنگ، تسمه، پیچ ها، پین ها، محورها و چرخدنده های کوچک کاربرد فراوانی دارند [۸].

زبری سطح در میکرو فرزکاری

ضخامت براده و پدیده اثراندازه بر مقدار زبری سطح در میکرو فرزکاری محیطی تاثیر قابل توجهی دارند. به همین دلیل تاثیر شرایط برشی بر زبری سطح در میکروفرزکاری با فرزکاری سنتی کاملاً متفاوت است. مین و همکارانش، ۲۰۰۸، تاثیر پارامترهای برشی بر

زبری سطح در میکروفرزکاری محیطی فولاد و آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل در این تحقیق نشان می‌دهد که هنگامی که نسبت ضخامت براده به شعاع لبه برنده از یک بیشتر می‌شود، بهبود در زبری سطح حاصل می‌شود. همچنین با افزایش عمق برش زبری سطح نیز افزایش پیدا کرده است. هنگامی که پیشروی به ازای هر دندانه با حداقل ضخامت براده برابر می‌شود، با تغییر مکانیزم ماشینکاری از شخم به برش و تشکیل براده، تغییر ناگهانی در ارتفاع پروفیل سطح بوجود می‌آید (لیو و همکارانش، ۲۰۰۶). تاثیر حداقل ضخامت براده بر پروفیل سطح در میکروفرزکاری بصورت همراه در شکل 5a دیده می‌شود. با درگیری لبه ابزار با قطعه کار باربرداری آغاز می‌شود و تا رسیدن ضخامت براده به مقدار بحرانی حداقل ضخامت براده باربرداری ادامه پیدا می‌کند. بعد از رسیدن ضخامت براده به این مقدار بحرانی باربرداری متوقف شده و دندانه‌ای مانند آنچه در شکل 5b دیده می‌شود بر سطح قطعه کار باقی می‌ماند. قسمتی از قطعه کار که توسط لبه ابزار برداشته نمی‌شود، بعد از عبور ابزار، دچار بازگشت الاستیک شده و بشدت با سطح آزاد قطعه کار درگیر می‌شود (شکل ۳). این مساله باعث سایش شدید در سطح آزاد ابزار می‌شود. در شکل 5b، پروفیل سطح ایجاد شده بعد از عبور لبه ابزار دیده می‌شود.



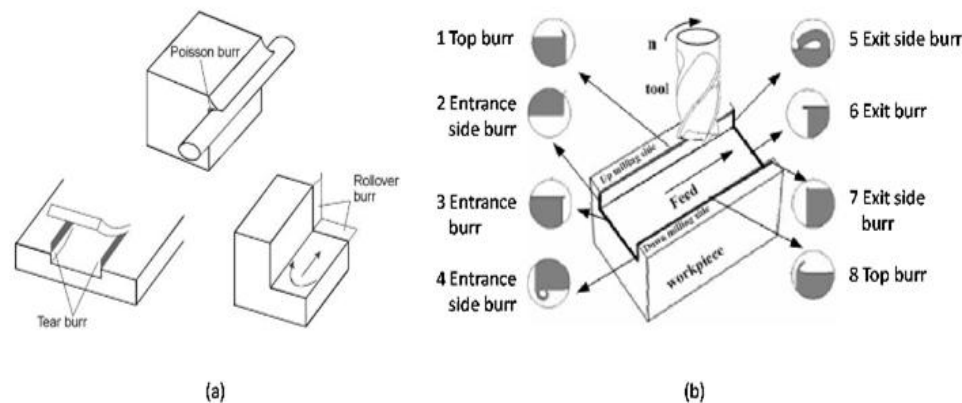
شکل ۵: نحوه شکل‌گیری براده در میکروفرزکاری (a) آغاز شکل‌گیری براده (b) سطح ایجاد شده پس از باربرداری (لیو و همکارانش، ۲۰۰۶).

پلیسه در میکروفرزکاری

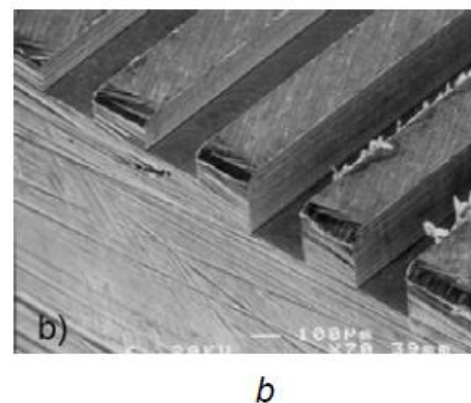
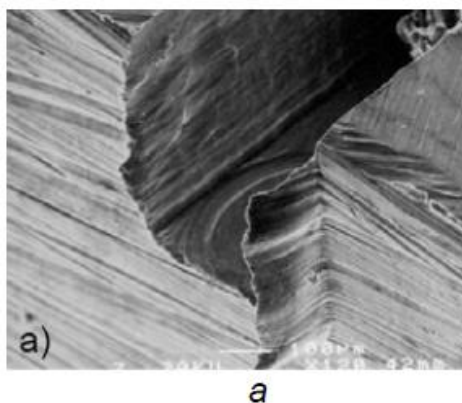
در فرزکاری سنتی فرآیندهای مختلفی برای حذف پلیسه وجود دارند که صرف نظر از هزینه به آسانی برای قطعات تولید شده قابل استفاده هستند. در میکروفرزکاری حذف پلیسه کار بسیار مشکلی است و ممکن است در اندازه‌های قطعه کار تغییر ایجاد کند. از طرفی روش‌های حذف براده که برای فرزکاری سنتی استفاده می‌شوند، برای میکروفرزکاری قابل استفاده نیستند. این نکته نیز اهمیت دارد که در میکروفرزکاری بدلیل بزرگتر بودن شعاع لبه برش از ضخامت براده و تغییر شکل‌های الاستیک-پلاستیک گسترده، معمولاً پلیسه‌ها بیشتر خود نمایی می‌کنند. در مطالعات انجام شده عوامل تاثیرگذار بر پلیسه را پیشروی و عمق برش می‌دانند. تاثیر سرعت برشی قابل چشم‌پوشی است (شولر و همکارانش، ۲۰۰۹).

دسته‌بندی‌های مختلفی برای پلیسه بر اساس فرآیند شکل‌گیری، ظاهر و موقعیت قرارگیری وجود دارد. عمومی‌ترین دسته‌بندی پلیسه بر مبنای عامل شکل‌گیری آنها انجام شده است. بر این اساس پلیسه به چهار دسته پلیسه سمی، پلیسه غلطیده رولی، پلیسه پارگی و پلیسه قطع کردن تقسیم می‌شود (شکل ۶). پلیسه سمی در نتیجه تمایل ماده به جمع شدن در گوشه قطعه کار در اثر فشار و تغییر شکل پلاستیک، بوجود می‌آید. پلیسه رولی در واقع براده‌ای است که بجای بریده شدن، به بیرون خم شده است. به این نوع پلیسه،

پلیسه خروجی هم می‌گویند. پلیسه پارگی هنگامی بوجود می‌آید که ماده به جای بریده شدن، پاره شود، مانند براده‌ای که در پانچ بوجود می‌آید. پلیسه قطع شدن هم پلیسه‌ای است که در هنگام بریدن یک ماده خام در انتهای آن ایجاد می‌شود.



شکل ۶: دسته بندی و نحوه شکل گیری پلیسه (a) دسته بندی پلیسه بر اساس نحوه شکل گیری و مسیر ابزار (b) دسته بندی پلیسه بر اساس موقعیت شکل گیری (لو و همکارانش، ۲۰۰۸).



شکل ۷: تصویر دو نوع پلیسه (a) پلیسه در خروجی ابزار (b) پلیسه در بالای کار (لی و همکارانش، ۲۰۰۰).

تکنیک تاگوچی

روش استفاده شده در طراحی آزمایش در این مقاله، روش تاگوچی است. در روش تاگوچی تغییرات ذاتی ماده‌ی قطعه‌کار و فرآیند تولید در طراحی آزمایشات و بهینه‌سازی فرآیند لحاظ می‌شود و از سال ۱۹۸۰ بصورت گسترده‌ای در انواع فرآیندها تولیدی مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این روش چندین فاکتور، بصورت همزمان زمان قابل بررسی است. همچنین روش تاگوچی زمان و هزینه آزمایش و تولید قطعات را بخوبی کاهش می‌دهد. تکنیک تاگوچی بی‌ثباتی در طول فرآیند طراحی آزمایشات را کاهش می‌دهد. هدف کلی این روش، تولید محصول با کیفیت، با کاهش هزینه ساخت می‌باشد. طراحی پارامترهای آزمایشات تاگوچی یک ابزار مهم برای

طراحی های پایدار می باشد. این روش یک تکنیک سیستماتیک و منحصر به فرد برای بهینه سازی عملکرد، کیفیت و هزینه طراحی، ارائه میکند. دو ابزار اصلی در طراحی پایدار در زیر ذکر شده اند:

a. نسبت سیگنال به نویز (S/N)، که کیفیت را با تکیه بر اختلافات می سنجد.

b. موارد مرتبطی که بسیاری از فاکتورهای طراحی را با هم اصلاح می کند.

وقتی یک کاراکتر با کیفیت خاص از شرایط ایده ال خود فاصله میگیرد، موجب خسارت می شود. روش تاگوچی سیگنال به نویز (S/N) برای ارائه یک پاسخ یا مشخصه کیفیتی و بیشترین میزان (S/N) که نیاز است، استفاده می شود.

طراحی و انجام آزمایش

معمولا انواع مختلفی از نحوه برش، با معیارهای متفاوت مورد بررسی قرار می گیرد. در مورد عملیات خشن تراشی، نرخ براده برداری در درجه اول اهمیت است در حالی که در عملیات پرداخت کاری کیفیت سطح در درجه اول اهمیت است. نرخ براده برداری نشان می دهد که زمان ماشینکاری قطعه کار عامل مهمی است که تا حد زیادی میزان تولید و هزینه را تحت تاثیر قرار می دهد. به این خاطر مطالعه نرخ براده برداری در میکرو فرزکاری ضروری است. روش تاگوچی، به منظور بررسی اثر تمام پارامترهای ماشینکاری در فرآیند میکرو فرزکاری، استفاده شده است. این روش نوعی روش آماری به نام طراحی آزمایش (DOE) است که تجزیه و تحلیل اثر بیش از یک عامل را همزمان با کاهش تعداد آزمایش، امکان پذیر می کند. بنابراین با استفاده از روش تاگوچی، طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل نتایج را می توان با تلاش و هزینه کمتر انجام داد.

پارامترهای پیشروی بر دندان (F_t)، سرعت اسپیندل (S_p) و عمق برش (DOC) برای ارزیابی زبری سطح و ارتفاع پلیسه انتخاب شدند. همچنین جهت تعیین سطوح آنها، بیش از ۳۰ آزمایش انجام شده است و پس از تجزیه و تحلیل میزان تاثیر در زبری سطح و ارتفاع پلیسه مطابق جدول ۱ سطوح هر سه پارامتر تعیین شده است. در ادامه تعداد بیست و هفت آزمایش با استفاده از روش تاگوچی همان طور که در جدول ۲ دیده می شود طراحی شده است. در کلیه آزمایش عرض برش معادل نیم قطر ابزار، فرزکاری بصورت همراه و خنک کار خاموش بوده است.

جدول ۱: پارامترهای موثر و سطوح مورد نظر

Factors	Levels		
	Low	Medium	High
Spindle speed(A) in (rpm)	10000	16000	22000
Feed per tooth(B) in (μm)	0.5	1	3
Depth of cut(C) in (mm)	0.6	0.8	1

جدول ۲: روند آزمایش ها به روش تاگوچی

Run	A	B	C	Designation
1	0	0	0	$A_0B_0C_0$
2	0	1	1	$A_0B_1C_1$
3	0	2	2	$A_0B_2C_2$
4	1	0	0	$A_1B_0C_0$

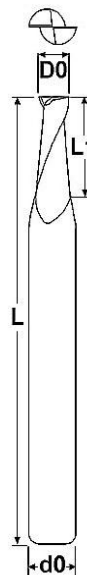
5	1	1	1	A ₁ B ₁ C ₁
6	1	2	2	A ₁ B ₂ C ₂
7	2	0	0	A ₂ B ₀ C ₀
8	2	1	1	A ₂ B ₁ C ₁
9	2	2	2	A ₂ B ₂ C ₂
10	0	0	1	A ₀ B ₀ C ₁
11	0	1	2	A ₀ B ₁ C ₂
12	0	2	0	A ₀ B ₂ C ₀
13	1	0	1	A ₁ B ₀ C ₁
14	1	1	2	A ₁ B ₁ C ₂
15	1	2	0	A ₁ B ₂ C ₀
16	2	0	1	A ₂ B ₀ C ₁
17	2	1	2	A ₂ B ₁ C ₂
18	2	2	0	A ₂ B ₂ C ₀
19	0	0	2	A ₀ B ₀ C ₂
20	0	1	0	A ₀ B ₁ C ₀
21	0	2	1	A ₀ B ₂ C ₁
22	1	0	2	A ₁ B ₀ C ₂
23	1	1	0	A ₁ B ₁ C ₀
24	1	2	1	A ₁ B ₂ C ₁
25	2	0	2	A ₂ B ₀ C ₂
26	2	1	0	A ₂ B ₁ C ₀
27	2	2	1	A ₂ B ₂ C ₁

انجام آزمایش ها

جهت انجام آزمایش ها از تجهیزات زیر استفاده شده است:

- میکروابزار فرزکاری: به قطر یک میلیمتر ساخت کمپانی PMT، با شعاع لبه برنده ۴/۰۶ میکرومتر (شکل ۸)

Micro Milling Tool Specification	
Material	WC
Coating	AlTiN
Work Material Hardness	HRC 62
Helix Angle(degree)	35
Diameter – D ₀ (mm)	1
Flute Length – L ₁ (mm)	3
Over All Length – L (mm)	50
Shank Diameter – d ₀ (mm)	4



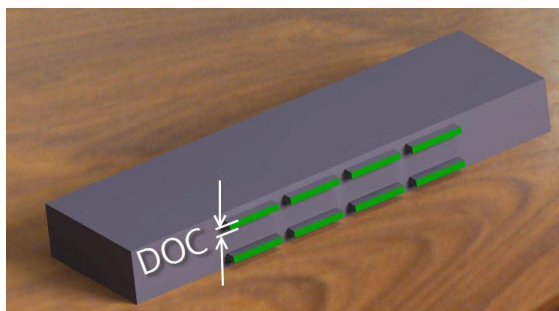
شکل ۸: مشخصات و ابعاد میکروابزار فرزکاری

- ماشین ابزار فرزکاری: FP4MKS ماشین سازی تبریز
- زبری سنج: Surtronic 25 ساخت کمپانی Talor Hobson
- اسپیندل افزایش دور: CAT40 SK10 ساخت کمپانی NIKKEN با نسبت افزایش ۱ به ۶ و حداکثر دور ۲۴۰۰۰rpm (شکل ۹)

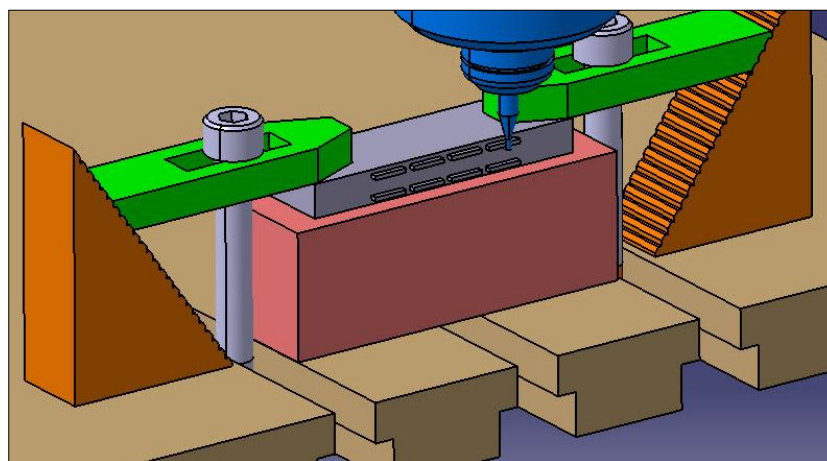


شکل ۹: اسپیندل افزایش دور با حداکثر دور ۲۴۰۰۰rpm.

- دوربین تصویربرداری: مدل Flea2-14s3m/3 ساخت کمپانی point Grey به همراه دو لنز Etender-2X و Telecentric



شکل ۱۰: نمونه آزمایش، اندازه گیری ارتفاع پلیسه و زبری سطح در نواحی سبزرنگ انجام می شود



شکل ۱۱: موقعیت ابزار نسبت به نمونه

جدول ۳: ماتریس کامل شده آزمایشات

Run	A	B	C	Designation	$R_a(\mu m)$	BH(mm)
1	0	0	0	$A_0B_0C_0$	2.05	0.295
2	0	1	1	$A_0B_1C_1$	2.35	0.39
3	0	2	2	$A_0B_2C_2$	0.67	0.171
4	1	0	0	$A_1B_0C_0$	1.11	0.195
5	1	1	1	$A_1B_1C_1$	0.885	0.302
6	1	2	2	$A_1B_2C_2$	0.76	0.212
7	2	0	0	$A_2B_0C_0$	1.455	0.254
8	2	1	1	$A_2B_1C_1$	1.34	0.314
9	2	2	2	$A_2B_2C_2$	0.98	0.286
10	0	0	1	$A_0B_0C_1$	4.025	0.545
11	0	1	2	$A_0B_1C_2$	5.45	0.51
12	0	2	0	$A_0B_2C_0$	1.32	0.364
13	1	0	1	$A_1B_0C_1$	3.124	0.305
14	1	1	2	$A_1B_1C_2$	2.095	0.363
15	1	2	0	$A_1B_2C_0$	1.233	0.184
16	2	0	1	$A_2B_0C_1$	1.06	0.338
17	2	1	2	$A_2B_1C_2$	1.44	0.324
18	2	2	0	$A_2B_2C_0$	1.885	0.308

19	0	0	2	$A_0B_0C_2$	1.92	0.255
20	0	1	0	$A_0B_1C_0$	0.85	0.128
21	0	2	1	$A_0B_2C_1$	3.245	0.115
22	1	0	2	$A_1B_0C_2$	2.055	0.426
23	1	1	0	$A_1B_1C_0$	4.365	0.348
24	1	2	1	$A_1B_2C_1$	1.45	0.326
25	2	0	2	$A_2B_0C_2$	0.95	0.318
26	2	1	0	$A_2B_1C_0$	2.155	0.146
27	2	2	1	$A_2B_2C_1$	1.725	0.266

روش انجام آزمایش ها

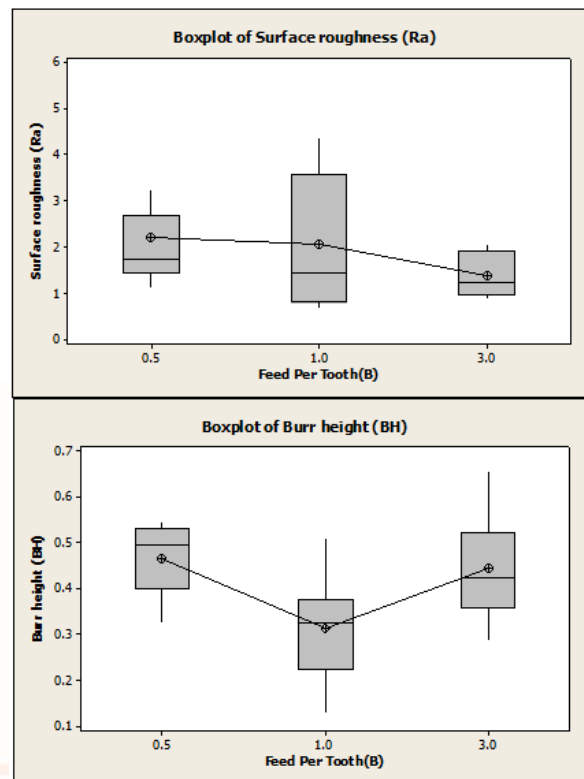
جهت اطمینان کامل از همگن بودن مواد در آزمایش های نهایی فقط از یک قطعه نمونه استفاده شده است، نمونه آزمایش در ابعاد 60x25x10 میلی متر طوری طراحی شده که ابزار میکرو فرزکاری در دو سمت و دو ردیف با فواصل مناسب و بدون برخورد براده برداری کند همچنین برجستگیهای روی آن جهت سهولت ماشینکاری و افزایش دقت در سنجش زبری ایجاد شده است. لازم به ذکر است که جهت حذف اثر سایش ابزار به طور متوسط بعد از هر پنج آزمایش ابزار تعویض شده است. کلیه آزمایش ها بر روی فولاد کربنی CK45 با ۰.۴۶٪ کربن، ۰.۴٪ کروم و ۰.۴٪ نیکل انجام شده است. ابزار فقط از طریق دیواره جانبی با قطعه کار درگیر شده و براده برداری می کند. در اندازه گیری زبری کلیه نمونه ها، نوک زبری سنج روی سطح ماشینکاری شده قرار گرفته و در طول آن حرکت می کند. جهت تنظیم درست پراب زبری سنج روی سطح ماشینکاری شده از دوربین تصویر برداری استفاده شده و در ۵ نقطه زبری اندازه گیری شده و میانگین بعنوان زبری سطح تعیین شده است. برای اندازه گیری ارتفاع پلیسه، از سطوح ماشینکاری شده عکسبرداری انجام شده است و سپس ارتفاع پلیسه اندازه گیری شده است. پس از انجام آزمایش ها و اندازه گیری های لازم، ماتریس آزمایشات کامل شده است (جدول ۳).

آنالیز داده ها

نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای زبری سطح که در شکل ۱۲ آورده شده است حاکی از آنست که تغییرات کیفیت زبری سطح نسبت به پیشروی، قابل توجه نیست. با این وجود با بررسی شکل ۱۰ می توان نتیجه گرفت که با افزایش پارامتر پیشروی بر دندان (F)، زبری سطح کاهش پیدا می کند. دلیل این مساله ارتباط کیفیت سطح با اصل حداقل ضخامت براده و اثر اندازه می باشد. در واقع می توان نتیجه گرفت در مقدار پیشروی ۳ μm/tooth، ضخامت براده از شعاع لبه برش بیشتر و در نتیجه زاویه براده مثبت شده و میزان اثر اندازه کاهش پیدا کرده است.

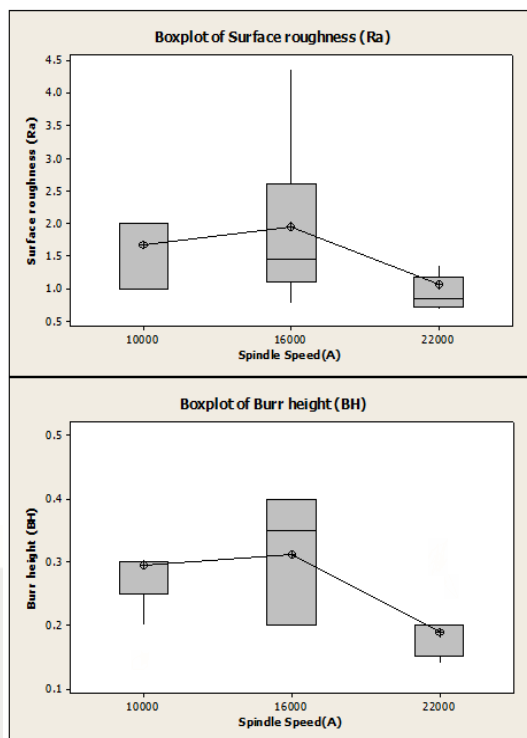
نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای مقادیر ارتفاع پلیسه (شکل ۱۲) نشان می دهند که تغییرات ارتفاع پلیسه نسبت به پیشروی، قابل توجه است. با افزایش پیشروی بر دندان از ۰/۵ به ۱ میکرومتر، ارتفاع پلیسه کاهش پیدا می کند. دلیل این مساله تاثیر پارامتر حداقل ضخامت بر ارتفاع پلیسه است. در واقع با آغاز مکانیزم برابرداری و کاهش پدیده شخم در پیشروی ۱ μm/tooth ارتفاع پلیسه کاهش

پیدا می کند. در ادامه مانند فرزکاری سنتی با افزایش پیشروی بر دندان از ۱ به ۳ میکرومتر، ارتفاع پلیسه افزایش پیدا کرده است. بنابراین تاثیر پیشروی بر ارتفاع پلیسه بیشتر از زبری سطح می باشد.



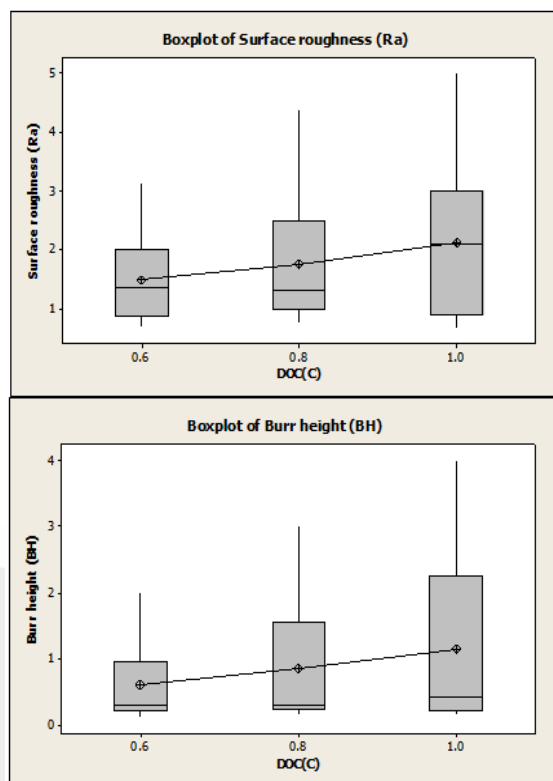
شکل ۱۲: نمودار تغییرات میانگین زبری سطح و ارتفاع پلیسه نسبت به پیشروی

نتایج حاصل از آنالیز واریانس در شکل ۱۳ نشان داده شده است. تغییرات زبری سطح و ارتفاع پلیسه نسبت به سرعت اسپیندل قابل توجه نیست. افزایش سرعت اسپیندل از ۱۰۰۰۰ به ۱۶۰۰۰ دور بر دقیقه زبری و ارتفاع پلیسه را افزایش داده، اما با رسیدن سرعت اسپیندل به ۲۲۰۰۰ دور بر دقیقه، میانگین زبری سطح و ارتفاع پلیسه کاهش یافته است. در واقع با افزایش سرعت اسپیندل به ۲۲۰۰۰ rpm، مکانیزم برش پایدارتر شده است. در این مورد هم تاثیر سرعت اسپیندل بر پلیسه بیشتر از زبری سطح است.



شکل ۱۳: نمودار تغییرات میانگین زبری سطح و ارتفاع پلیسه نسبت به سرعت اسپیندل

و نتایج آنالیز واریانس در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که تغییرات زبری سطح نسبت به عمق برش قابل توجه است. در مورد ارتفاع پلیسه نیز می‌توان گفت تاثیر فاکتور عمق برش بر پلیسه چشمگیر است. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که میانگین زبری سطح و ارتفاع پلیسه با افزایش عمق برش، افزایش پیدا کرده است. بنابراین تاثیر عمق برش بر زبری سطح و پلیسه در میکرو فرزکاری همانند فرزکاری سنتی است.



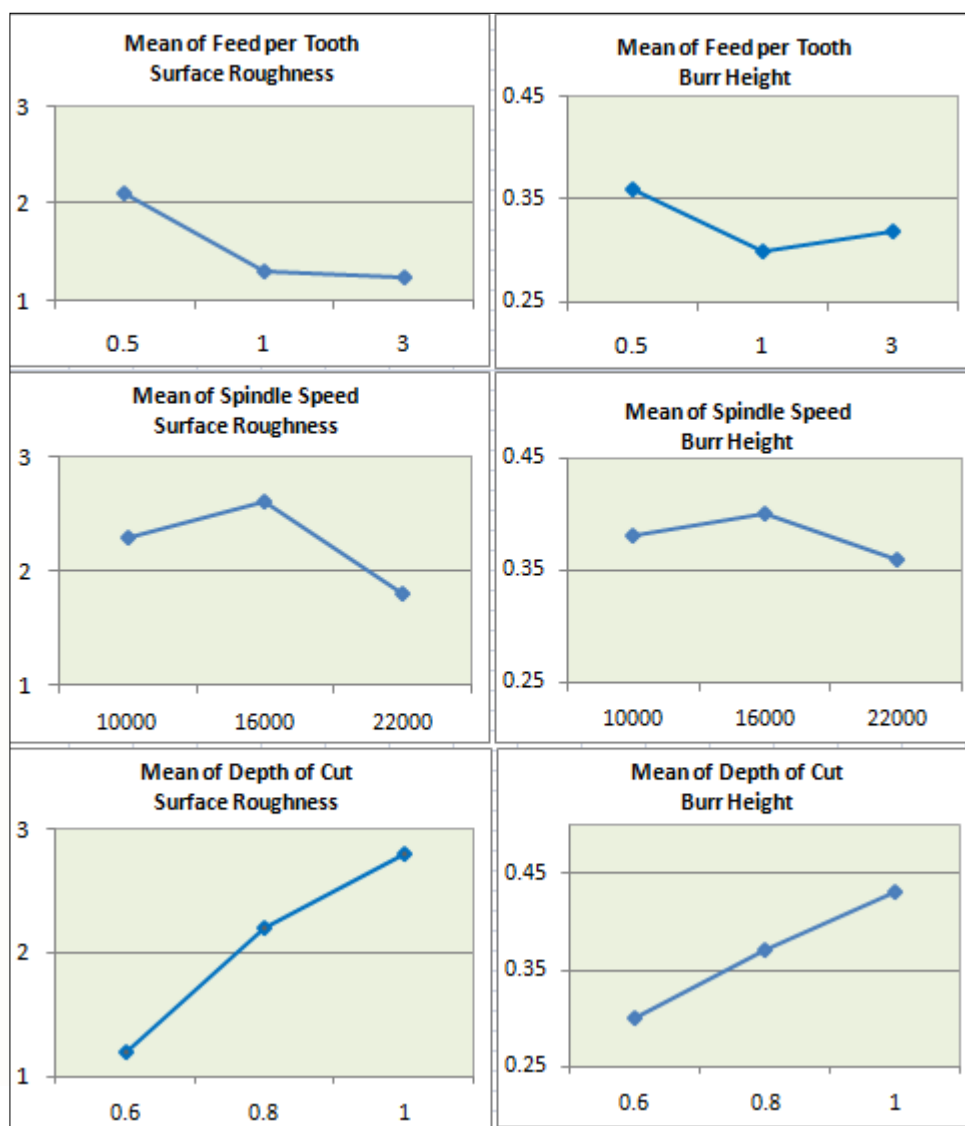
شکل ۱۴: نمودار تغییرات میانگین زبری سطح نسبت به عمق برش

تعیین شرایط برش بهینه

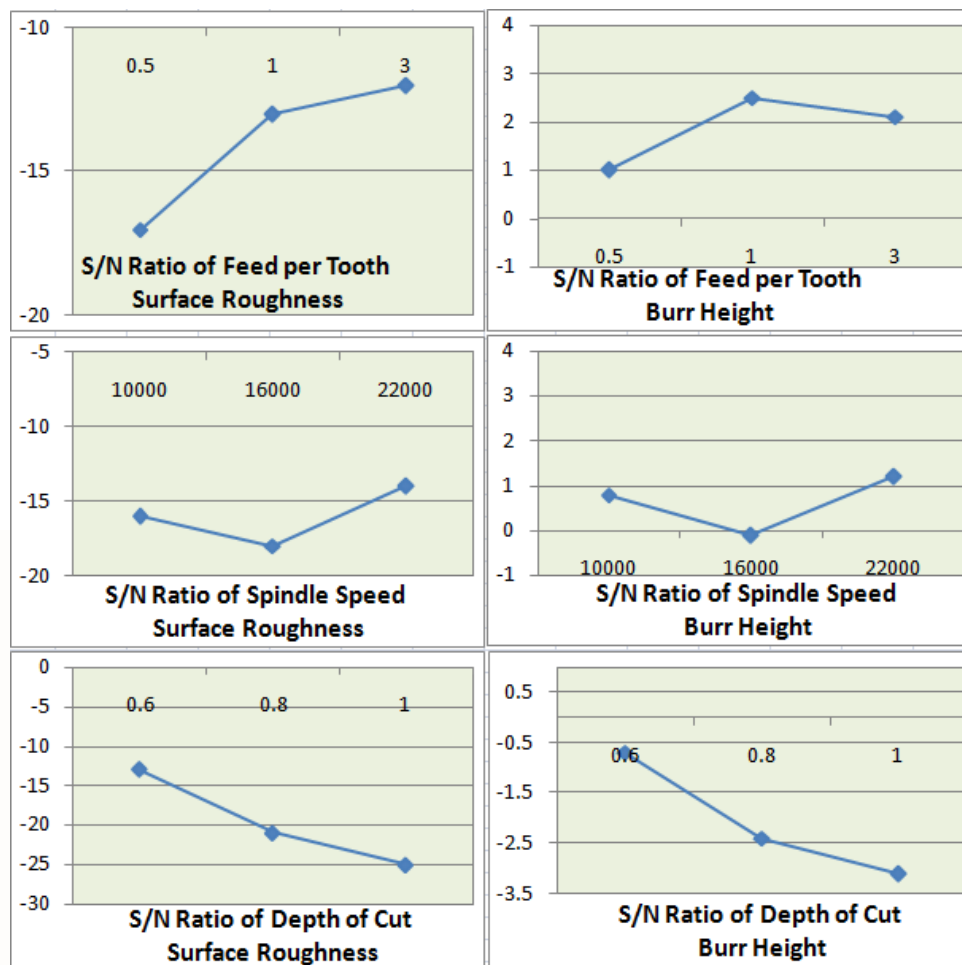
در این مطالعه جهت برآورد مناسبی از شرایط میکروفورکاری بهینه از روش تاگوچی استفاده شده است. در این روش تغییرات میانگین مقادیر زبری سطح و ارتفاع پلیسه و نسبت سیگنال به نویز^۳ (نسبت S/N) مبنایی برای تخمین شرایط بهینه می‌باشد. بدین منظور حالت کوچکتر- بهتر انتخاب شده است. یعنی کمترین مقادیر زبری سطح و ارتفاع پلیسه ایده‌آل است. از طرفی بزرگترین نسبت S/N نشان می‌دهد شرایط فاکتورهای غیرقابل کنترل در تنظیمات ماشین در بهترین حالت است. بنابراین کمترین مقدار میانگین و بیشترین مقدار نسبت S/N ، معیار انتخاب شرایط بهینه هستند.

مقادیر میانگین زبری سطح (\bar{R}_a)، ارتفاع پلیسه (\bar{BH})، و نسبت SN در سطوح مختلف پارامترها محاسبه و در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ آورده شده است.

³ Signal to Noise Ratio



شکل ۱۵: تغییرات میانگین برای فاکتورهای برشی



شکل ۱۶: تغییرات S/N برای فاکتورهای برشی

مطابق شکل های ۱۵ و ۱۶، زبری سطح و ارتفاع پلیسه در عمق برش ۰/۶ mm کمترین میانگین و بیشترین نسبت S/N را دارند. بنابراین حالت بهینه زبری سطح و ارتفاع پلیسه در عمق برش ۰/۶ mm رخ می دهد. از طرفی کمترین میانگین و بیشترین نسبت S/N برای زبری سطح و ارتفاع پلیسه در سرعت اسپیندل ۲۲۰۰۰ rpm بوجود می آید. پس سرعت ۲۲۰۰۰ rpm برای هر دو فاکتور زبری و پلیسه بهینه است. اما نقطه پیشروی بهینه برای زبری و پلیسه با هم متفاوت است. نقطه بهینه پیشروی برای زبری ۳ $\mu\text{m/tooth}$ و برای پلیسه ۱ $\mu\text{m/tooth}$ می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ترکیب بهینه فاکتورهای برش برای کمینه کردن زبری سطح، عمق برش ۰/۶ mm، سرعت اسپیندل ۲۲۰۰۰ rpm و پیشروی ۳ $\mu\text{m/tooth}$ برای کمینه کردن ارتفاع پلیسه عمق برش ۰/۶ mm، سرعت اسپیندل ۲۲۰۰۰ rpm و پیشروی ۱ $\mu\text{m/tooth}$ می باشد.

صحه گذاری روش تاگوچی

جهت صحه گذاری شرایط تخمین زده شده در تاگوچی، پنج آزمایش در نقطه بهینه انجام و میانگین آنها در جدول ۴ آورده شده است. نتایج این آزمایش ها درستی ترکیب بهینه پارامترهای مؤثر میکروفزکاری را تایید می کند.

جدول ۴: صحنه‌گذاری نقطه بهینه تعیین شده در روش تاگوچی

پارامتر	کمترین مقدار در آزمایشات اولیه	میانگین مقادیر حاصل از آزمایشات صحنه‌گذاری در شرایط بهینه	درصد خطا (%)
زبری سطح	0.67	0.73	9
ارتفاع پلیسه	0.115	0.127	11

نتیجه‌گیری

در این مطالعه شرایط بهینه پارامترهای برش در میکروفرزکاری برای بهبود زبری سطح و ارتفاع پلیسه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. روند مطالعه بدین گونه است که در ابتدا بیست و هفت آزمایش به روش تاگوچی برای ترکیب‌های مختلف مقادیر پیشروی عمق برش و سرعت اسپیندل طراحی شده‌است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای موثر بر زبری سطح به ترتیب عمق برش، سرعت اسپیندل و پیشروی و برای ارتفاع پلیسه عمق برش، پیشروی و سرعت اسپیندل هستند. سپس به کمک روش تاگوچی شرایط بهینه برش تعیین شده است. نتایج میانگین‌ها و نسبت S/N نشان می‌دهند که ترکیب بهینه برای کاهش مقدار زبری سطح عمق برش ۰/۶ mm، سرعت اسپیندل ۲۲۰۰ rpm و پیشروی ۳ μm/tooth و برای کاهش ارتفاع پلیسه ۰/۶ mm، سرعت اسپیندل ۲۲۰۰ rpm و پیشروی ۱ μm/tooth می‌باشد. در نهایت این ترکیب بهینه با انجام آزمایش‌ها صحنه‌گذاری تایید شده‌است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش تاگوچی روشی مؤثر، کارآمد و سریع جهت بهینه‌سازی فرآیند میکروفرزکاری می‌باشد.

مراجع

P.R.Periyanan, U.Natarajn, S.H.Yang , A study on the machining parameters optimization of micro-end milling process, International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 3, No. 6, 2011, pp. 237-246

رحیم حقیقت دوست، بررسی تاثیر حداقل ضخامت براده، اثراندازه و شرایط ماشینکاری بر زبری سطح، نیروی برش و ارتفاع پلیسه در میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، دی ماه ۱۳۸۹، دانشگاه فردوسی مشهد.

Richard E. DeVor , Kornel F. Ehmann, Micromachining Research With Industrial Applications, University of Illinois – Urbana/Champaign

M.C. Shaw, Precision finishing, Annals of CIRP 44 (1) (1995) 343–348.

X. Lai, H. Li, Ch. Li, Zh. Lin, J. Ni, Modeling and analysis of micro milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 1–14

A. Aramacharoen, P. T. Mativenga, size effect and tool geometry in micromilling of tool steel, Precision Engineering 2008

Ninggang Shen, M.S, Analysis of micro-milling of hardened H13 steel, Mechanical Engineering, Purdue University, 2013.

www.metalravne.com/selector/steels/ck45

S. Min, H. Sangermann, C. Mertens, D. Dornfeld, A study on initial contact detection for precision micro-mold and surface generation of vertical side walls in micromachining, CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 109–112

X. Liu, R. E. Devor, S. G. Kapoor, An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining, ASME J. Manuf. Sci. Eng., 128(2006) 474-481

G.M. Schueler, J. Engmann, T. Marx, R. Haberland, and J.C. Aurich, Burr Formation and Surface Characteristics in Micro-EndMilling of Titanium Alloys, Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, 2nd–3rd April, 2009, University of Kaiserslautern, Germany

Luo, M., Liu, G. and Chen, M., “Mechanism of burr formation in slot milling Al-alloy” International Journal of Materials and Product Technology, Vol. 31, Issue 1, pp. 63-71 (2008).

K. Lee, B. Strin, I. Essel, Burr formation in micro-machining, LMA Research Report – CODEF , 2000.