

آج زنی غلتک های فولاد تندبر با سختی بالا جهت نورد گرم میلگرد

محسن جعفری دینانی^۱، امین کلاه‌دوز^{۲*}، سید علی افتخاری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و عمران، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و عمران، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

* aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir، پست الکترونیکی ۴۸۴، صندوق پستی

چکیده

یکی از مشکلات عظیم صنعتگران در زمینه غلتک‌های میلگرد از جنس فولاد تندبر، آج‌زدن این غلتک‌ها است که به علت عدم توانایی لازم در این کار، غلتک‌های تندبر تبدیل به غلتک‌های یکبار مصرف شده‌اند. هنگامی که بر روی این غلتک‌ها نورد انجام می‌شود، به دلیل آستنیت باقیمانده، کار سختی بالایی پیدا می‌کند و آج‌زنی بسیار مشکل می‌شود. در این تحقیق غلتک‌های تندبر با سختی بالای ۷۰ شورسی مورد بررسی قرار گرفتند. برای آج‌زدن این غلتک‌ها، ابزارهای الماس، سرامیک و CBN مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف ما به دست آوردن پارامترهای بهینه ماشینکاری است که به منظور دستیابی به این هدف با انجام کمترین آزمایش، روش RSM در نرم افزار مینی تب مورد استفاده قرار گرفت. پس از بررسی های انجام شده می‌توان گفت که ابزار الماس توانایی نفوذ به سطح غلتک تندبر را ندارد. ابزار سرامیکی قابلیت نفوذ و براده برداری دارد ولی از نظر زمان و هزینه، مقرون به صرفه نیست. ابزار CBN در همه تست‌ها عملکرد خوبی داشته و در بهترین حالت با سرعت برشی ۲۵ m/min، پیشروی ۰/۰۵ mm/rev و عمق بار ۰/۰۵ mm در زمان ۱۰۸۰ ثانیه یک کالیبر آج‌زده شد.

کلیدواژگان

نورد گرم، غلتک تندبر، میلگرد، آج‌زنی، RSM

Investigation of notching HSS rolls with high hardness for hot mill rolling

Mohsen Jafari Dinani¹, Amin Kolahdooz^{2,*}, Seyed Ali Eftekhari²

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran

2- Assistant Prof., Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran
Isfahan, Iran, aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir

Abstract

One of the biggest problems of artisans, is notching the high speed steel roller is due to the inability to do this work, become high speed steel roller bearings are disposable. When the roller is placed on the production line, because of the retained austenite make it very hard. High speed roller used in this study is barely above 70 Shc. To notch this rollers, diamond tools, ceramic and CBN were tested. Our goal is to obtain the optimum machining parameters that it requires a high number of tests that are practically impossible. So in order to achieve optimal machining parameters with the lowest test, RSM method in Minitab software was used. After investigation we can say that diamond tools have not the ability to influence the level of high speed roller. Ceramic tools are able to machining HSS rollers, but in terms of time and cost, it is not good. CBN tools performed well in all tests and succeeded with the best cutting speed 25 m/min, 0.05 mm feed and 0.05 mm depth of cut at the time of 1080 seconds, in notching one caliber.

Keywords

Hot rolling, HSS roler, Bar, Notching, RSM.

کرده‌اند که به ترتیب با دو مشخصه M و T نشان می‌دهند که در استاندارد آمریکایی AISI تعریف و طبقه بندی شده‌اند. استانداردهای رایج دیگر از جمله استاندارد BSI انگلیس نیز تقریباً آلیاژهای مشابهی دارند. از دیگر استانداردهای تعریف شده برای فولاد تندبر، استاندارد UNI2955 ایتالیا و TGL75H آلمان است.

خواص فولادهای تندبر گروه M شبیه فولادهای تندبر گروه T است با این تفاوت که چقرمگی این فولادها در سختی یکسان، کمی بیشتر است [۴].

۲- ساختار متولوگرافی و خواص مکانیکی آلیاژ

وجود عناصر آلیاژی V و Co، W، Mo، Cr و ساختار زمینه ای شامل کاربیدهای کمپلکس و مارتنزیت تمپر شده را به وجود آورده که باعث بالا رفتن مقاومت به سایش، خستگی حرارتی و همچنین مقاومت به تشکیل فیلم اکسیدی در این آلیاژها شده است. از طرفی این فولادها باعث افزایش نیروی نوردی از ۳ تا ۳۰ درصد می‌شوند. و از آنجا که ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به غلتک-

۱- مقدمه

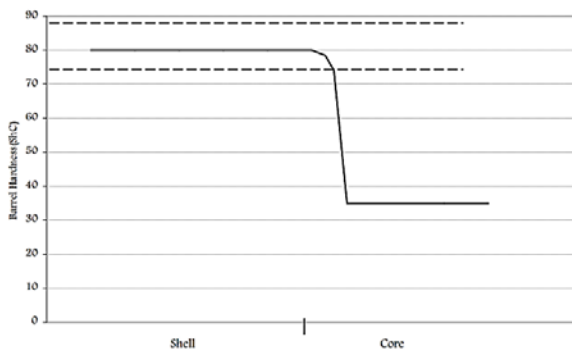
فولادهای تندبر به طور خاصی برای استفاده در غلتک‌های کاری و در قفسه‌های اولیه نورد گرم ورق (F1-F4) و جایگزین غلتک‌های کرم بالا در این خطوط نورد توسعه یافتند. این فولادها برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ در ژاپن و در سال ۱۹۹۰ در اروپا برای تولید غلتک استفاده شد. اما در قفسه‌های نهایی نورد مقاطع کوچک و رینگ‌های یونیورسال نیز کاربرد دارند. این غلتک‌ها عمدتاً به صورت دولایه گریز از مرکز تولید می‌شوند. از نظر آلیاژی درصد کربن آلیاژهای تندبری که برای تولید غلتک‌ها به کار می‌روند بالاتر از فولادهای تندبر متداول است و این موضوع به جهت بالا بردن درصد کاربید و سختی آنها می‌باشد. ساختار ریز و با سختی پذیری بالا باعث شده که افت سختی کمی در عمق این غلتک‌ها به وجود آید. در لایه دوم این غلتک‌ها به دلیل بالا بردن تافنس از چدن گرافیت کروی استفاده می‌شود [۱-۳]. به طور کلی فولادهای تندبر را در دو خانواده مولیبدن دار و تنگستن دار تقسیم بندی

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، شکل و مورفولوژی این نوع کاربیدها با هم متفاوت است. کاربیدهای MC با توزیع یکنواخت در زمینه اغلب V یا Nb است و بر خلاف M_6C ، به صورت تکه ای و گلوله ای می‌باشند. کاربیدهای M_7C_3 عمدتاً در مرز دانه‌ها تشکیل شده و حالتی شبیه برش مغز انسان دارد. کاربیدهای M_6C به صورت استخوان ماهی در مرز دانه‌ها تشکیل می‌شود و عمدتاً کاربرد دو تایی است که ترکیب آن، Fe_3W_3C یا Fe_3Mo_3C می‌باشد [۸]. کاربیدهای M_2C بر عکس M_6C دو تایی نبوده و M عمدتاً می‌تواند Mo یا W باشد. شکل این کاربیدها شبیه پره‌های بادبزنی است. کاربیدهای M_2C فیبری شکل بوده و در حالت سه بعدی لایه ای است [۹].

از آنجا که گریدهای آلیاژی مورد استفاده در تولید غلتک‌های نورد به دلیل پروسه‌های مختلف تولید و شرایط کاری ویژه، با فولادهای تندبر استاندارد تفاوت‌هایی دارند. جدول ۲ خواص مکانیکی یک آلیاژ فولاد تندبر با سختی مشخص شده را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲ گرادیان سختی را در آلیاژهای دولایه این غلتک‌ها نشان داده است.

جدول ۲ خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژ فولاد تندبر

سختی (ShC)	استحکام کششی (MPa)	استحکام خمشی (MPa)	ضریب انبساط حرارتی ($10^{-6}*/^{\circ}C$)	ضریب انتقال حرارت در $500^{\circ}C$ ($W/m^{\circ}C$)
78-86	900	2500	2.27	13

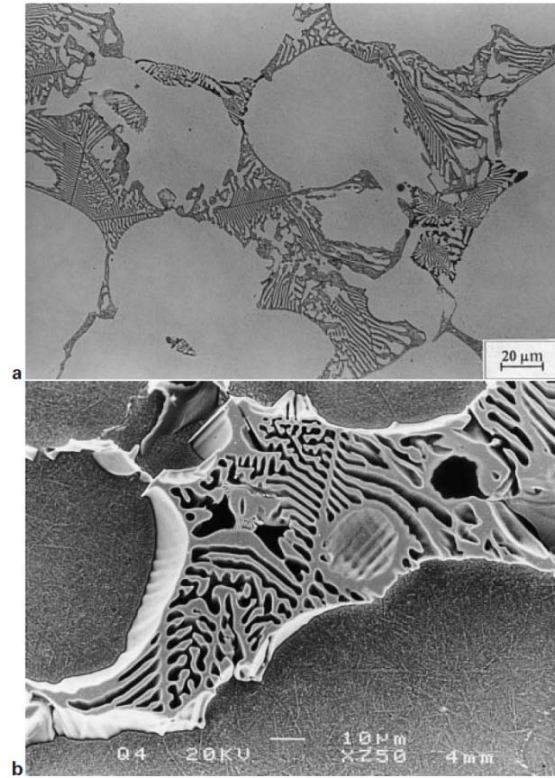


شکل ۲ شماتیک نحوه کاهش سختی در عمق غلتک در یک آلیاژ فولاد تندبر [۱]

استفاده از فولاد تندبر در خطوط نورد برای اولین بار در سال های ۱۹۹۹-۱۹۹۷ توسط شرکت اینسه^۱ انجام شده است. تعدادی از آن‌ها برای اولین بار و تعدادی در مکان هایی که قبلاً استفاده شده بکار برده شدند. بهر حال استفاده از فولادهای تندبر در هر خط نوردی پس از تست اول نیاز به اصلاحات بعدی دارد [۱].

بررسی‌های عملی در خصوص کارکرد این محصولات به صورت غلتک یا رینگ، هم مقاومت بالای به سایش را در این آلیاژها در مقایسه با آلیاژهای سنتی نشان می‌دهد هم از طرفی این آلیاژ، سایش یکنواخت، سطح نهایی مناسب، مقاومت بالاتر به ترک‌های حرارتی و مقاومت بالاتر نسبت به حوادث را از خود نشان داده است.

های کرم بالا دارند ریسک تشکیل اکسیدها در دمای بالا در آنها بیشتر می‌شود بنابراین نیاز به خنک کاری کنترل شده و مناسب تری نسبت به غلتک‌های کروم بالا و به خصوص غلتک‌های معمول چدنی و فولادی دارند. ساختار ریختگی فولاد تندبر شامل دندریتهایی است که توسط شبکه کاربیدهای بین سلولی نسبتاً پیوسته احاطه شده است شکل ۱ [۵].

a optical: etching KOH + $K_3Fe(CN)_6$; b SEMشکل ۱ تصویر میکروسکوپ نوری. B تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی از کاربرد یوتکتیک M_6C در ریزساختار ریختگی فولادپزار تندبر M2 [۱]

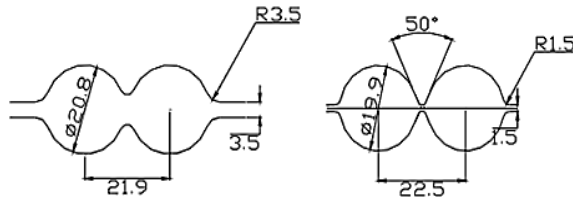
از آن جایی که سختی کاربیدهای مختلف تفاوت زیادی می‌کند، همچنین سختی زمینه بر اساس بالانس کربن اولیه و کربن باقیمانده در زمینه ممکن است متغیر باشد لذا برای این که بتوان غلتک با خواص مناسب به دست آورد متناسب با شرایط نورد و نوع آن، نسبت‌های متفاوتی از این عناصر و عملیات حرارتی متفاوتی به کار می‌رود. به جهت مشخص شدن تفاوت‌های موجود بین سختی کاربیدهای مختلف موجود در فولادهای تندبر، همچنین به جهت شناساندن نوع آن‌ها در جدول ۱ عمده این نوع کاربیدها و سختی آن‌ها آورده شده است [۶-۷].

جدول ۱ محدوده سختی کاربیدهای مختلف موجود در آلیاژهای فولادهای تندبر

Carbide	Hardness range (HV)	Composition
M_6C	1650 (1200-1800)	W (Mo, Fe, Cr)
M_2C	2200 (1600-2200)	Mo (W, V, Cr, Fe)
M_7C_3	1600 (1400-1800)	Cr (Fe, Mo)
M_3C	1100 (1100-1350)	Fe, Cr, Mo
TiC	3000-3400	Ti
VC	2800-3000	V
NbC	2200-2500	Nb
TaC	1800-2000	Ta
Mo_{2c}	1500	Mo

^۱-INSSE

۳- غلتک‌های برشی



شکل ۳ نقشه کالیبر غلتک استفاده شده در قفسه برشی [۱]

۳-۱- خط نیمه پیوسته

خط نورد نیمه پیوسته از ۱۵ قفسه برای نورد میلگرد و آرماتور با ظرفیت ۷۵ تن در ساعت، غلتک‌های فولاد تندبر برای غلتک‌های با قطر ۳۲۰ و طول ۷۰۰ میلیمتر در قفسه ۷ به عنوان غلتک برشی آرماتور با اندازه‌های ۱۰-۸ و ۱۲ میلیمتر به کار برده شد. در این قفسه خستگی حرارتی و سایش در محل تقسیم شدن محصول باعث از بین رفتن غلتک‌ها می‌شود. سرعت محصول بین ۵۸/۹ تا ۹۲/۱۰ متر بر ثانیه است و خنک‌کاری توسط آب با فشار ۲ بار با دبی ۲۳ متر مکعب بر ساعت صورت می‌گیرد و تغییر مقطع^۱ نورد ۳ تا ۵ درصد است. در چنین شرایطی کارکرد غلتک فولاد تندبر با سختی ۸۳-۷۸ شورسی در مقایسه با غلتک سنتی با سختی ۷۵-۷۰ شورسی برای محصولات مختلف در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ مقایسه کارکرد غلتک‌های فولاد تندبر با غلتک‌های متداول نورد در قفسه

برشی نورد میلگرد [۱]

Station	Product	Traditional roll performance		HSS roll performance	
		Ton/gr oove	t/mm groove	Ton/groove e	t/mm groove
Stand 7	Rod 8	856	214	2856	1428
Stand 8	Rod 10-12	2250	562	5426	2713

۲- خط پیوسته

خط نورد پیوسته ۱۸ قفسه نورد میلگرد و آرماتور با ظرفیت ۶۰ تن در ساعت غلتک‌های فولاد تندبر در قفسه‌های ۱۳ و ۱۴ برای غلتک‌های برشی با قطر ۳۸۰ و طول ۷۰۰ و برای محصول‌های ۱۴، ۱۲ و ۱۶ میلیمتر استفاده شدند. سرعت در استند ۱۳، ۵۴/۸، تا ۹۱/۷ متر بر ثانیه و در استند ۱۴، ۲۲/۹ تا ۵۵/۸ متر بر ثانیه می‌باشد. خنک‌کاری غلتک‌ها توسط فشار ۵ بار و ۳۶ متر مکعب آب در ساعت انجام شده است. تغییر مقطع ۱۳ درصد در قفسه ۱۳ و ۸ درصد در قفسه ۱۴ اعمال می‌شود و نقشه کالیبر این غلتک‌ها در شکل ۳ آورده شده است. غلتک‌های متداولی که در تغییر مقطع این قفسه به کار رفته‌اند چدن‌های آسیکولار دو لایه با سختی ۶۸-۶۵ شورسی بوده است که نتایج کارکرد آن‌ها در مقایسه با فولاد تندبر با سختی ۸۳-۷۸ شورسی در قفسه برشی نورد میلگرد در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴ مقایسه کارکرد غلتک‌های تندبر با غلتک‌های متداول نورد [۱]

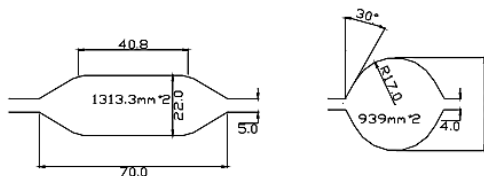
Station	Product	Traditional roll performance		HSS roll performance	
		Ton/groove	t/mm groove	Ton/groove	t/mm groove
Stand 13	Rod12-14	۱۵۳۸	۳۰۷	۴۶۱۵	۱۵۳۸
Stand 14	Rod 16	۲۲۳۳	۳۷۵	۴۷۵۰	۱۵۸۳
	Rod12-14	۱۵۳۸	۲۶۹	۴۶۱۵	۲۳۰۷
	Rod 16	۲۲۳۳	۳۳۳	۴۷۵۰	۲۳۷۵

۳- قفسه‌های قبل نهایی نورد میلگرد

خط نورد ۱۶ قفسه پیوسته تولید میلگرد ۸ تا ۳۰ میلیمتر با ظرفیت ۴۰ تن در ساعت در قفسه‌های قبل نهایی در جایگاه‌های ۷ و ۸ برای غلتک‌هایی با قطر ۴۰۰ و طول ۷۰۰ میلیمتر به ترتیب با سرعت خطی ۱۱/۱ و ۴۱/۱ متر بر ثانیه و تغییر مقطع ۳۰ و ۲۸/۵ درصد به کار گرفته شدند. خنک‌کاری با دوش‌هایی با فشار ۲ بار صورت گرفته و غلتک‌های پرلیتی یک لایه در این قفسه به کار گرفته شدند. نقشه‌های کالیبر این قفسه‌ها به صورت شکل ۴ است. در مجموع نتایج کارکرد این غلتک‌ها به صورت جدول ۵ آمده است.

جدول ۵ مقایسه نتایج کارکرد غلتک‌های تندبر با غلتک‌های معمول [۱]

Station	Traditional roll performance		HSS roll performance	
	Ton/groove	t/mm groove	Ton/groove	t/mm groove
Stand 7	۱۰۷۳	۱۰۷۳	۱۷۵۶	۲۳۴۲
Stand 8	۳۵۴	۵۳۲	۷۸۰	۱۵۶۱



شکل ۴ نقشه کالیبر غلتک‌های استفاده شده در قفسه ۷ و ۸ [۱]

۴- قفسه آخر نورد میلگرد

خط نورد ۲۵ قفسه پیوسته با توان ۷۰ تن در ساعت که غلتک فولاد تندبر با سختی ۸۳-۷۸ شورسی با قطر ۳۷۰ و طول بشکه ۵۰۰ در قفسه ۱۸ مربوط به جایگاه نهایی محصول گرد ۳۲ تا ۳۵ با سرعت خطی ۵ متر بر ثانیه و تغییر مقطع ۲۶-۲۷ درصد به جای غلتک تمام تبریدی دو لایه گریز از مرکز با سختی ۸۲ شورسی به کار برده شد که نتایج کارکرد آن‌ها در جدول ۶ آورده شده است. تفاوت‌های ظاهری بین غلتک‌ها نشان می‌دهد که در غلتک‌های تمام تبریدی سایش غیر همگن‌تر و عمیق شدن کالیبر قابل توجه‌تر است.

جدول ۶ نتایج کارکرد غلتک‌های معمول و تندبر در قفسه آخر میلگرد [۱]

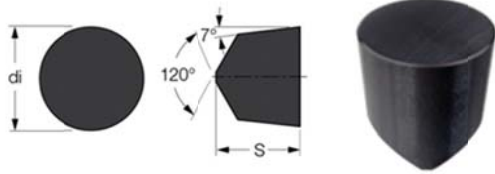
Station	Traditional roll performance		HSS roll performance	
	Ton/groove	t/mm groove	Ton/groove	t/mm groove
Stand 18	۲۲۵	۱۱۲	۳۷۱	۴۱۲

۵- بررسی عملی روتراشی غلتک تندبر

غلتک‌های تندبر به دلیل سختی و مقاومت به سایش بالا، از لحاظ براده برداری، کالیبر تراشی و آج‌زنی با غلتک‌های معمول تفاوت زیادی دارند. ماشینکاری دقیق یکی از عوامل موثر در مرغوبیت غلتک بوده و این فرایند جزو یکی از

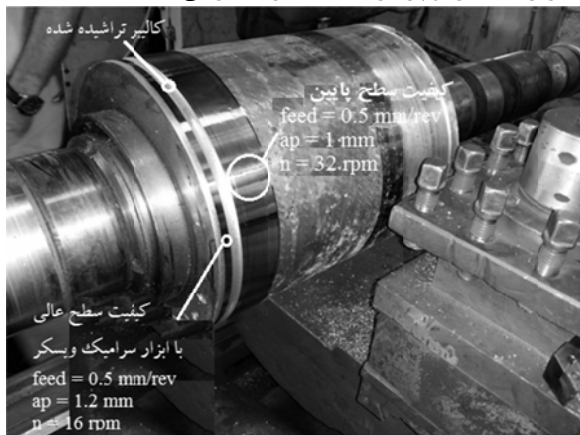
^۱ - Reduction

از این ابزار را نشان می‌دهد. که پارامترهای d_i و S در این ابزار به ترتیب $12/70$ و $7/94$ میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۷ ابزار سرامیک ویسکر [۱۱]

پارامترهای ماشینکاری که در این آزمایش به کار برده شدند عبارتند از عمق بار $1/2$ میلی‌متر، پیشروی $0/5$ میلی‌متر بر دور و دور 16 RPM. صافی سطح و عملکرد ابزار مناسب بود. در جهت بهینه کردن شرایط ماشینکاری و بهبود عملکرد ابزار، پارامترهای قبلی را تغییر دادیم. پارامترهای جدید عبارتند از عمق بار 1 میلی‌متر، پیشروی $0/5$ میلی‌متر بر دور، دور 32 RPM. کیفیت سطح به‌طور قابل ملاحظه‌ای پایین آمد. در مجموع ابزار سرامیک ویسکر برای روتراشی و کالیبر تراشی غلتک تندبر با شرایط ماشینکاری مرحله قبل مورد تایید است. شکل ۸ عملکرد ابزار سرامیک ویسکر برای ماشینکاری غلتک تندبر، را تحت هر دو پارامترهای ماشینکاری نشان می‌دهد.



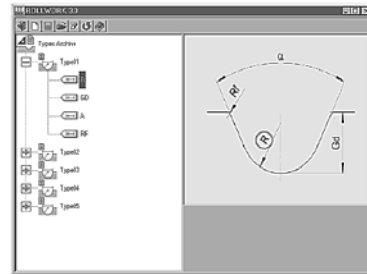
شکل ۸ غلتک تندبر ماشینکاری شده با ابزار سرامیک ویسکر

۶- آج‌زنی غلتک تندبر

یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش استقبال از غلتک‌های فولاد تندبر بالا بودن سختی و مقاومت به سایش آن‌هاست که باعث شده ماشینکاری و آج‌زنی دشوارتری نسبت به غلتک‌های معمول داشته باشند. به‌علت همین دشواری در ماشینکاری، مصرف‌کننده‌ها تمایل کمتری به استفاده از این جنس غلتک دارند. این گونه غلتک‌ها نیاز به کالیبراسیون و در میلگردهای آج‌دار علاوه بر کالیبر اصلی بایستی شیارهای مناسبی در آن ایجاد گردد. به دلیل سختی بالای فولادهای تندبر باید ابزارهای مناسب ماشینکاری جهت این جنس شناسایی و مناسب‌ترین ابزار انتخاب گردد. ابزارهای که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند عبارتند از الماس، سرامیک و نیتريد بور مکعبی^۲.

این تحقیق به منظور دست یافتن به روشی جهت آج زنی غلتک‌های فولاد تندبر تیپ M و انتخاب ابزار مناسب جهت این کار و بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری انجام خواهد شد. در صورتی که این نیاز صنعت رفع شود و غلتک

فرایندهای بسیار پیچیده می‌باشد. زیرا ابزار برش باید ماده‌ای به سختی $84-H$ 70 شورسی^۱ را ماشینکاری نماید. در این فرایند اگر ماشینکاری به‌صورت دقیق انجام نشود و شکل مورد نظر بر روی کالیبر ایجاد نشود، مجدداً باید عملیات کالیبر تراشی و آج‌زنی انجام شود و یا حتی در بعضی موارد ممکن است به اسقاط غلتک منجر شود که همه این عوامل برای شرکت تولیدی، ضررهای زیادی ایجاد می‌کند. شکل ۵ کالیبر یک غلتک مورد استفاده در نورد میلگرد را نشان می‌دهد.

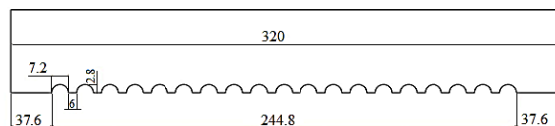


شکل ۵ کالیبر غلتک نورد میلگرد [۱۰]

برای ماشینکاری کالیبر غلتک در استفاده برای میلگرد آج‌دار ابزار برشی سرامیک ویسکر پیشنهاد می‌شود. زیرا ابزار باید در موقعیت بحرانی و لرزش‌های مکانیکی مقاوم باشد و همچنین قابلیت ضربه‌خوری بالایی داشته باشد. همچنین نیتريد های بور مکعبی شکل نیز در موقعیت‌های بحرانی و لرزش‌های مکانیکی ماشینکاری، مقاومت مطلوبی از خود نشان می‌دهند. واضح است که به‌دلیل سختی بالا، زمان ماشینکاری مکانیکی در فولادهای تندبر به طرز قابل توجهی در مقایسه با آلیاژهای متداول بالاتر است. لازم به‌ذکر است که ماشینکاری غلتک تندبر خام اولیه به‌مراتب آسان‌تر از غلتک تندبری است که در خط تولید قرار گرفته و به‌علت خوردگی، سایش و یا هر دلیل دیگری نیاز به ماشینکاری مجدد دارد. در این بخش ابتدا به عملیات روتراشی و کالیبر تراشی غلتک تندبر پرداخته می‌شود و ابزار مناسب برای این کار با پارامترهای ماشینکاری آن پیشنهاد می‌شود و پس از آن آج‌زنی غلتک تندبر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱ روتراشی و کالیبر تراشی غلتک تندبر با ابزار سرامیک ویسکر

غلتک تندبر مورد بررسی به قطر 243 و طول بشکه 320 میلی‌متر که قبلاً در خط تولید قرار داشته و به‌علت تناژ بالای نورد می‌بایست روتراشی و کالیبر تراشی مجدد شود. شکل ۶ شماتیکی از نقشه غلتک مورد نظر را نشان می‌دهد.



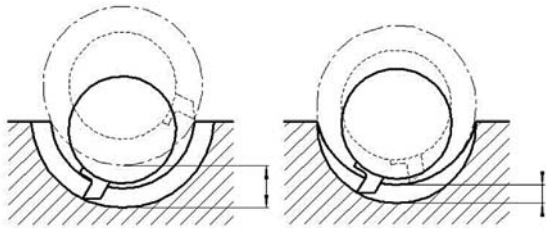
شکل ۶ نقشه غلتک تندبر مورد بررسی

ابزار مخصوص براده شکن با زاویه آزاد 7 درجه و از نوع تولید مخصوص با گرید G22 است. نام ابزار مورد استفاده برای این آزمایش، - RCGX 120700 - T2A - G22 می‌باشد که شرکت سازنده آن ISCAR است. شکل ۷ شماتیکی

^۲- CBN

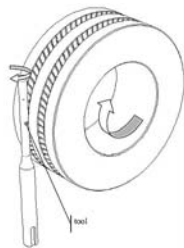
^۱- shc

قرار می‌گیرد به دلیل کار سختی که روی غلتک ایجاد می‌شود و آستینیت باقیمانده در آن، غلتک تبدیل به یک جنس بسیار سخت می‌شود و مقاومت به سایش بسیار بالایی پیدا می‌کند. شکل ۹ شماتیک آج‌زنی تحت دو استاندارد Gost و Din را نشان می‌دهد.



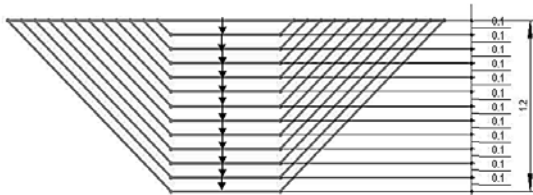
شکل ۹ شماتیک براده برداری ابزار در فرایند آج‌زنی [۱۲]

شکل ۱۰ نحوه درگیری ابزار با سطح قطعه کار را نشان می‌دهد. رینگ یا غلتک، به صورت افقی بر روی دستگاه بسته می‌شود. ابزار با زاویه مناسب بر روی نگهدارنده آن محکم بسته می‌شود. نگهدارنده ابزار به حالت عمودی بر روی ماشین تراش بسته می‌شود و حرکتی چرخشی حول محور خود دارد و براده برداری انجام می‌دهد. نازک بودک قسمت میانی نگهدارنده ابزار به این علت است که هنگام ورود ابزارگیر به داخل کالیبر، درگیری بین سطح کالیبر و ابزارگیر به وجود نیاید. بدیهی است که برای قطرهای مختلف میلگرد، ابعاد قسمت‌های مختلف ابزارگیر عدد متفاوتی است.



شکل ۱۰ شماتیک درگیری ابزار با قطعه کار در فرایند آج‌زنی [۱۳]

نحوه براده برداری در ماشین‌های آج‌زنی معمولی بدین صورت است که در هر پاس، یک مقدار ثابت، که در ابتدا برای آن تعریف شده است را باربرداری می‌نماید. عمق مقدار بار، بستگی به قابلیت براده‌برداری ابزار دارد. بدیهی است که هر چه عمق براده برداری بیشتر باشد، تعداد پاس لازم برای تراش آج یک کالیبر کاهش یافته و در نتیجه زمان آج‌زنی کاهش می‌یابد. مثلاً اگر خواهیم عمق ۱/۲ میلی‌متر را براده‌برداری نماییم، و ابزار ما قابلیت باربرداری حداکثر ۰/۱ میلی‌متر در هر پاس را داشته باشد، بنابراین ۱۲ پاس براده‌برداری انجام شود تا به عمق مورد نظر برسیم. شکل ۱۱.



شکل ۱۱ شماتیک آج‌زنی با عمق ثابت در هر پاس [۱۲]

جهت آج‌زدن غلتک خام اولیه از هر سه ابزار سرامیک، الماس و CBN می‌توان استفاده نمود ولی با در نظر گرفتن قیمت تمام شده ابزار، پیشنهاد می‌شود که از ابزار الماس جوشی جهت آج‌زدن غلتک تندبر خام اولیه استفاده

های تندبر وارد خطوط تولید شوند توقفات نورد کاهش یافته، زمان‌های تعویض غلتک کاهش می‌یابد و در مجموع نرخ سایش کم شده و راندمان افزایش می‌یابد و تحولی عظیم در صنعت نورد گرم میلگرد در داخل کشور رخ خواهد داد.

در حال حاضر پس از تولید یک غلتک از جنس فولاد تندبر، بسته به قفسه مربوطه کالیبرتراشی و آج‌زنی اولیه به راحتی بر روی غلتک انجام می‌گیرد. وقتی این غلتک در خط تولید قرار می‌گیرد و بر روی آن نورد انجام می‌شود به دلیل آستینیت باقی مانده در آن کارسختی بالایی پیدا می‌کند. همچنین به واسطه نورد انجام شده بر روی غلتک عیوبی در سطح غلتک به وجود می‌آید که لازم است غلتک از خط تولید خارج شده و بر روی آن کالیبرتراشی و آج‌زنی جدید انجام شود. اما به دلیل سختی بالایی که این غلتک پیدا کرده است آج‌زنی آن غیر ممکن می‌شود.

طبق تحقیقات انجام شده تکنولوژی تولید غلتک‌های تندبر در ایران در شرکت‌هایی مانند چند سازان، فولاد آلیاژی وجود دارد اما تا کنون هیچ شرکتی در داخل کشور موفق به آج‌زنی این جنس غلتک نشده است و علی‌رغم مزایای بسیار بالای غلتک‌های تندبر نسبت به سایر غلتک‌ها، به علت این مشکل هنوز غلتک‌های تندبر وارد خطوط نورد میلگرد آجدار نشده‌اند. به علت عدم دستیابی به تکنولوژی آج‌زنی غلتک‌های تندبر، این غلتک‌ها تبدیل به غلتک‌های یکبار مصرف شده‌اند زیرا پس از اینکه غلتک در مرحله اول در خط تولید قرار گرفت و نورد بر روی آن انجام شد و به حداکثر تناژ نورد خود رسید، در مرحله دوم قادر به کالیبرتراشی و آج‌زنی آن نیستیم. به همین دلیل غلتک‌های تندبر تبدیل به غلتک‌های یکبار مصرف شده‌اند و شرکت‌های تولیدکننده میلگرد تمایلی به استفاده از غلتک‌های تندبر ندارند.

در این تحقیق پس از جمع آوری و مطالعه پژوهش‌های مرتبط با ماشینکاری و جنس‌های مختلف ابزار، انجام پژوهش آغاز گردید. ابزارهای سرامیکی، نیتريد بورمکعبی و الماس بر روی غلتک‌های مورد نظر تست خواهد شد و پارامترهای عمق براده برداری، سرعت برشی و پیشروی و زمان آج‌زنی در این آزمایشات بررسی و مقایسه خواهد شد. با توجه به توقف خط تولید جهت آج‌زدن غلتک، استفاده از ابزار با طول عمر بالا و عملکرد مناسب با به کاربردن پارامترهای بهینه ماشینکاری جهت دست یافتن به کوتاه‌ترین زمان آج‌زنی، جهت کاهش توقفات خط تولید امری هدف ما می‌باشد.

با توجه به انجام آزمایش با سه ابزار مختلف و بررسی سه عامل مختلف، تعداد آزمایشات برای رسیدن به پارامترهای بهینه رقم بسیار بالایی خواهد بود که به کمک روش RSM در نرم افزار مینی‌تب^۱ تعداد آزمایش‌های لازم برای دست یافتن به پارامترهای بهینه کاهش چشمگیری خواهد یافت. به کمک این نرم افزار طراحی آزمایش انجام می‌شود و برای هر آزمایش زمان آن ثبت می‌شود. پس از انجام تست‌ها و درج زمان‌ها در نرم افزار مینی‌تب، بهینه‌سازی به کمک روش RSM انجام خواهد شد و سپس نتیجه بهینه‌سازی به صورت عملی نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هدف از بهینه‌سازی انتخاب بهترین حالت ممکن برای پارامترهای سرعت برشی، پیشروی و عمق برش در کمترین زمان ممکن است. در پایان این تحقیق مناسب‌ترین ابزار جهت آج‌زدن غلتک‌های تندبر با پارامترهای بهینه ماشینکاری با کوتاه‌ترین زمان آج‌زدن معرفی خواهد شد.

آج‌زدن غلتک تندبر خام اولیه به مراتب راحت‌تر از آج‌زدن غلتک تندبری است که در خط تولید قرار گرفته است، زیرا وقتی غلتک تندبر در خط تولید

^۱- Minitab

جدول ۷ بازه کمی پارامترها

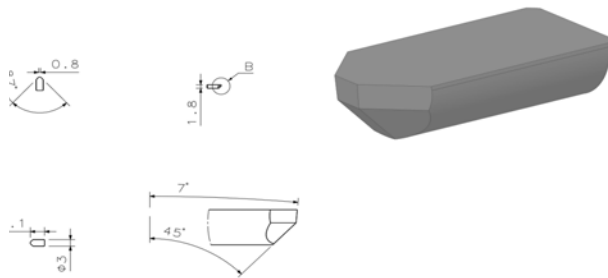
پارامتر	حداقل	حداکثر
سرعت برشی	۳۰ m/min	۶۰ m/min
پیشروی	۰/۰۵ mm/rev	۰/۱ mm/rev
عمق برش	۰/۰۵ mm	۰/۱ mm

۷- طراحی آزمایش به روش RSM در نرم افزار مینی تب

در این تحقیق جهت طراحی و تحلیل آزمون‌ها که تمام حالت‌های لازم در این فرایند را در بر داشته باشد از روش CCD استفاده شد. با توجه به سه پارامتر موثر در فرایند، اقدام به طراحی آزمایش از روش رویه پاسخ به وسیله نرم افزار مینی‌تب گردید. هدف طراحی آزمایش^۱ کاهش زمان و تعداد آزمایشات و در نتیجه کاهش هزینه می‌باشد. با توجه به داده‌ها، نرم افزار تعداد ۱۷ آزمایش طراحی نمود. مشخصات طراحی مرکب مرکزی در جدول ۸ آورده شده است. با توجه به نقاط به‌دست آمده از نرم افزار، عملیات آج‌زنی با اینسرت CBN انجام شد و پارامتر خروجی، یعنی زمان ثبت گردید. شکل ۱۲ ابزار مورد استفاده جهت این عملیات را نشان می‌دهد.

جدول ۸ مشخصات طراحی مرکب مرکزی

Central Composite Design	
Factors:	۳
Replicates:	۱
Total runs:	۱۷
Two-level factorial:	Full factorial
Cube point:	۸
Center point in cube:	۳
Axial point:	۶
Center points in axial:	۰
Alpha:	۲



شکل ۱۲ اینسرت CBN آج

۷-۱ بررسی و تحلیل دوتایی پارامترها و تاثیر آن بر زمان

پس از اینکه آزمایش‌های طراحی شده انجام شد و مقادیر کمی برای پارامتر زمان به‌دست آمد، این مقادیر در نرم افزار مینی‌تب ثبت شد. در ابتدا با توجه به مدل‌های ریاضی پیشنهادی نرم افزار، جهت انتخاب بهترین مدل، نتایج در تمام مدل‌ها جایگزین شده و با توجه به میزان دو پارامتر R-Sq و P Value بهترین مدل انتخاب می‌شود. جدول ANOVA عوامل موثر را از غیرموثرها تفکیک می‌نماید. در صورتی که $P < 0.05$ باشد آن فاکتور موثر می‌باشد ولی اگر P-Value برای Lack of Fit بزرگ‌تر از ۰/۰۵ باشد آن فاکتور غیر موثر است، یعنی میزان عدم انطباق مدل آزمایش با مدل واقعی معنی‌دار نمی‌باشد

1- DOE

شود. اما هدف ما آج‌زدن غلتک تندبر کارکرده است. بدین منظور چهار ابزار سرامیک، الماس، CBN مورد آزمایش قرار گرفت.

مراحل انجام آزمایش در این تحقیق بدین صورت است که ابتدا امکان سنجی آج‌زنی با هر یک از ابزارها، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که این ابزار جهت انجام آزمایش، مورد تایید قرار گرفت، بیشترین و کمترین مقدار ممکن برای سه پارامتر سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش بررسی می‌شود. با توجه به اینکه تاثیر سه فاکتور بر روی زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد، تعداد آزمایش‌ها بسیار بالا خواهد بود. به‌منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و بهینه‌سازی پارامترها، روش RSM در نرم افزار مینی‌تب مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از انجام امکان سنجی و بررسی بیشترین و کمترین مقدار ممکن برای این سه فاکتور، به کمک روش RSM در نرم افزار مینی‌تب طراحی آزمایش انجام خواهد شد. زمان انجام آزمایش برای همه آزمایشات طراحی شده در نرم افزار ثبت خواهد شد و به کمک روش RSM، بهینه‌سازی انجام می‌شود. پارامتر خروجی مورد بررسی در این تحقیق، زمان است و هدف ما کاهش زمان آج‌زنی یک کالیبر می‌باشد.

۶-۱ آج‌زدن غلتک تندبر با ابزار سرامیکی

به منظور انجام آزمایش، غلتک تندبر کارکرده که قبلاً روتراشی و کالیبر تراشی شده و آماده آج‌زنی بود مورد آزمایش قرار گرفت. غلتک مورد آزمایش با سختی بالای Shc ۸۰ به قطر ۵۳۰ میلیمتر، جهت میلگرد سایز ۱۰ که تعداد ۳۰۰ آج در هر کالیبر آن باید زده شود. یکی از ابزارهایی که جهت آج‌زنی مورد استفاده قرار گرفت ابزار سرامیکی بود.

در هنگام آج‌زنی با این ابزار مشاهده شد که فشار زیادی به ابزار وارد می‌شود و عملکرد ابزار مناسب نبود. پس از یک دور آج‌زدن و بررسی ابزار، مشاهده شد که لبه ابزار سوخته است و دیگر قادر به براده برداری نیست. با بررسی کالیبر مورد آزمایش، مشاهده شد که کیفیت سطح آج زده شده مناسب نیست.

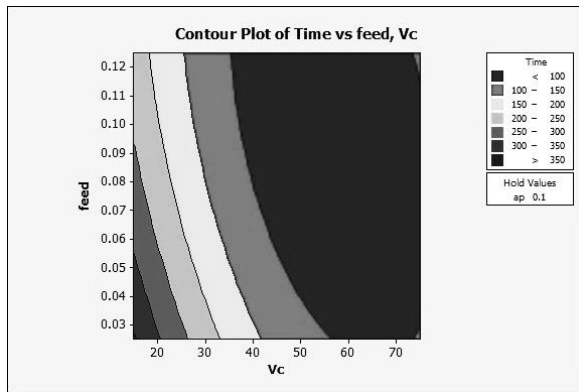
لذا در صورتی که بخواهیم از ابزار سرامیکی جهت آج‌زنی غلتک تندبر کارکرده استفاده نماییم، می‌بایست حداکثر پس از دو دور آج‌زنی، ابزار باز شود و سنگ زده شده یا تعویض شود که با توجه به اهمیت زمان ماشینکاری و با در نظر گرفتن قیمت ابزار، تعداد بالایی ابزار جهت آج‌زنی نیاز است که نه از نظر زمان و نه از نظر قیمت، مقرون به صرفه نیست. لذا استفاده از ابزار سرامیکی جهت آج‌زنی غلتک تندبر توصیه نمی‌شود.

۶-۲ آج‌زنی غلتک تندبر با الماس

این ابزار اصلاً قابلیت نفوذ به سطح غلتک را نداشته و بر روی سطح قطعه کار سر می‌خورد و نمی‌تواند براده برداری انجام دهد. با کمی افزایش عمق بار، فشار بسیار زیادی به ابزارگیر وارد می‌شد. این عملیات بر روی کالیبرهای دیگر غلتک انجام شد و نتیجه یکسانی به دست آمد. لذا ابزار الماس قابلیت نفوذ در غلتک تندبر کارکرده را ندارد.

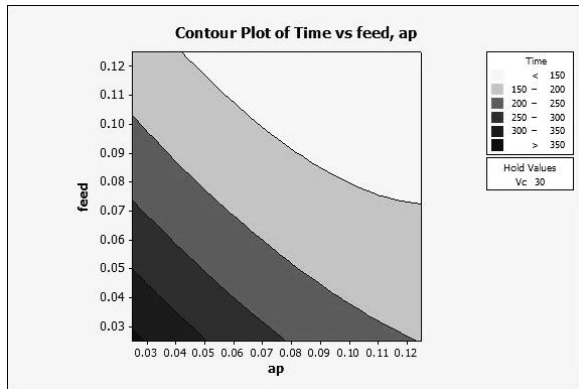
۶-۳ آج‌زنی غلتک تندبر با ابزار CBN

پس از انجام بررسی‌های اولیه، مشخص شد که امکان آج‌زنی غلتک تندبر با ابزار CBN وجود دارد. به‌منظور به دست آوردن بازه کمی پارامترهای مورد نظر، آزمایش را تا جایی ادامه دادیم که کیفیت سطح از حد مورد نظر تجاوز ننماید. جدول ۷ مقدار کمی حداکثری و حداقلی پارامترهای ذکر شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ تصویر تغییرات سرعت برشی و پیشروی و تاثیر آن بر روی زمان

در شکل ۱۵ تصویر رویه به دست آمده از تغییرات پیشروی و عمق بار و تاثیر آن بر روی زمان نشان داده شده است. زمان مطلوب در این تصویر ناحیه ای است که زمان آن در محدوده ۱۲۰ ثانیه است. متغیرهای موجود در این بازه زمانی، مطلوب هستند.



شکل ۱۵ تصویر تغییرات پیشروی و عمق بار و تاثیر آن بر روی زمان

۳-۷ بررسی بهینه سازی فرایند

از آنجا که هر سه پارامتر مورد بررسی بر روی زمان خروجی تاثیر گذار هستند لذا لازم همه این پارامترها بهینه شوند. برای بهینه سازی می توان از روش های مختلفی استفاده نمود، که در این تحقیق از امکانات بهینه سازی نرم افزار مینی تب استفاده شده است. در این قسمت جهت بهینه سازی فرایند از نمودارهایی که تاثیر همزمان کلیه پارامترهای تاثیرگذار بر روی زمان را نشان می دهد، استفاده شده است. بدین صورت که در ابتدا بازه زمانی مشخص می گردد و سپس هدف نهایی در تنظیمات نرم افزار مینی تب اعمال میگردد. شکل ۱۹، نقاط بهینه پارامترهای تاثیرگذار بر فرایند را نشان می دهد. با توجه به درجه تحقق که عدد یک می باشد، قابلیت رسیدن به هدف مورد نظر ۹۹ درصد می باشد. جواب بهینه استخراج شده از نمودار، در جدول ۱۳ آورده شده است.

جدول ۱۳ داده های مربوط به مقادیر بهینه شده سرعت برشی، پیشروی و عمق بار

متغیرها	سرعت برشی	پیشروی	عمق بار
مقدار بهینه	30 m/min	0.12 mm/rev	0.09 mm

و مدل آزمایش به خوبی بیانگر مدل واقعی نیست. در اصلاح مدل، فاکتورهای موثر از غیرموثر جدا می شود و گرافها و نمودارها بررسی می شوند. فاکتورهایی مانند 0.057 که خیلی به 0.05 نزدیک باشند را حذف نمی کنیم. همچنین اگر $A \times B$ موثر بوده و B غیر موثر باشد، فاکتور B را که فاکتور نصب نامیده می شود را نگه می داریم و حذف نمی کنیم.

R-Sq میزان صحیح بودن آزمایش را نشان می دهد.

Lack of Fit دقت آزمایش و بهینه بودن مقدار پیش بینی شده را نشان

می دهد. هرچه این عدد بیشتر باشد مدل انتخاب شده مناسب تر است. [۱۶]-۱۴.

جدول ۹ نتیجه تحلیل آزمایش با مدل Full quadratic را نشان می دهد.

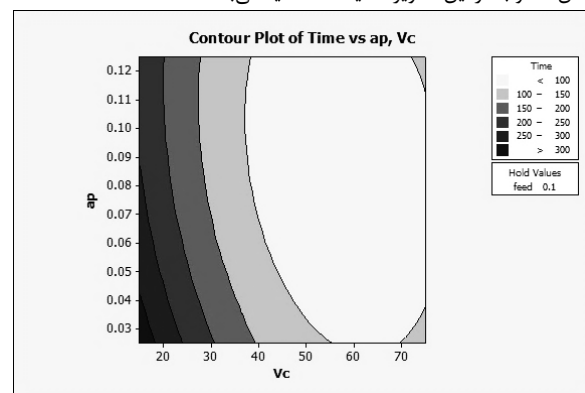
جدول ۱۲ نتیجه تحلیل آزمایش با مدل Full quadratic

	Vc	ap	feed	Lack-of-Fit	R - Sq
P Value	0.000	0.023	0.021	0.011	93.99%

بعد از اینکه آزمایش توسط نرم افزار مدل شده و انجام شد، وارد مرحله تحلیل آزمایش می شویم. بالاترین عدد برای R-Sq در روش Full quadratic به دست آمده است. همچنین مقدار P Value برای Lack-of-Fit در این روش نسبت به سایر روشها عدد بالاتری را نشان می دهد. و نیز در این روش، P Value برای متغیرهای سرعت برشی و عمق برش نسبت به سایر روشها کمتر است. بنابراین برای این آزمایش، مدل Full quadratic نسبت به سایر مدلها مناسب تر می باشد.

۲-۷ بررسی گرافها

در این قسمت کلیه نتایج مربوط به تغییر پارامترها به صورت دوتایی بر روی پارامتر خروجی که زمان می باشد ارائه گردیده است. با توجه به تصاویر رویه های به دست آمده در این قسمت، پارامتر زمان با توجه به متغیرها به صورت دوتایی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۳ تصویر رویه به دست آمده از تغییرات سرعت برشی و عمق بار و تاثیر آن بر روی زمان را نشان می دهد. زمان مطلوب در این تصویر ناحیه ۱۲۰ ثانیه می باشد.



شکل ۱۳ تصویر تغییرات سرعت برشی و عمق بار و تاثیر آن بر روی زمان

در شکل ۱۴ تصویر رویه به دست آمده از تغییرات سرعت برشی و پیشروی و تاثیر آن بر روی زمان مشاهده می شود. زمان ایده آل در این تصویر، ناحیه ای است که زمان در آن تغییرات بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ ثانیه دارد. سرعت های برشی و پیشروی های موجود در این ناحیه، مطلوب است.

زمان مناسبی بود. ضمن اینکه صافی سطح آج زده شده با این ابزار مناسب بود. همچنین نتایج به دست آمده از بهینه سازی می بایست صحت سنجی می شد که در انجام آزمایش نهایی، مشخص شد که پارامترهای معرفی شده از طرف نرم افزار، تطابق خوبی در عمل دارند. لذا جهت آج زدن غلتک های تندبر می توان از اینسرت CBN با پارامترهای سرعت برشی 30 m/min ، پیشروی 0.125 mm/rev و عمق بار 0.09 میلی متر استفاده نمود که زمان این فرایند، در حدود ۱۲۵ ثانیه خواهد بود.

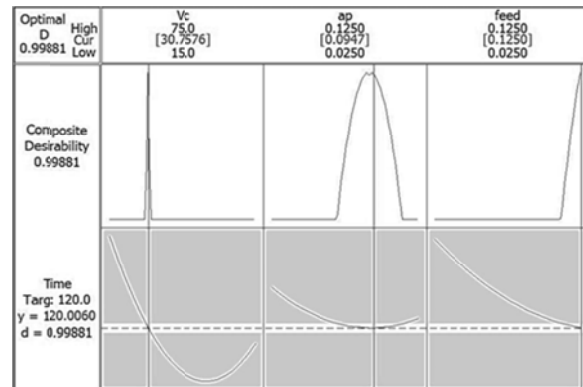
۹- تقدیر و تشکر

تشکر و قدردانی از استاد راهنما دکتر کلاهدوز، استاد مشاور دکتر افتخاری و مهندس مشایخی. همچنین از همراهی و مساعدت خوب شرکت چدن سازان، ذوب آهن اصفهان، فولاد الگودرز و فولاد کویر کاشان صمیمانه تشکر می کنم.

۱۰- مراجع

- [1] F HG., Zhao AM., Z., Xing JP., Development of Centrifugal Casting High Speed Steel Rolls, *Journal of science and technology Beijing*, Volume 10, Issue 6, p61-66, 2003.
- [2] Mauk P., Overhagen Ch., Current state of the art and developments for hot and cold rolling of flat and long products, *proceeding of the 10th international conference on steel rolling*, pp.30-39, china, 2010.
- [3] Hwang K.C., Lee S., Effect of alloying elements on microstructure and fracture propertices of cast high speed steel rolls, Part II: Fracture behavior, *Materials Science and Engineering A.*, Volume 254A, 2009, P296-304.
- [4] S. W. Kim, U.J. Lee, K.D.Woo, and D.K.Kim, Solidification microstructures and mechanical propertice of vertical centrifugal Cast High Speed Steel, *materials science and technology* December 2003, Vol.19, P1727-1732.
- [5] J. B. Mees, E. M. Lowe and D. Wrapp, Development of complex carbide reinforced metal work rolls, *MWSP Conf.Proc.*, Iss, Vol.XXXIII, 1996, PP 253-257.
- [6] F HG, Zhao Am, Xing Jp, Development of centrifugal casting high speed steel rolls, *journal of science and technology Beijing*, Vol.10, Issue 6, December 2003, pp61-66.
- [7] Chang Kyu Kim, Jong Il Park, Sunghak Lee, Yong Chang Chan Kim, Nack J Kim and Jung Seung Yang, Effect of alloying elements on microstructure, hardness and fracture toughness of centrifugally cast high speed steel rolls, *Metallurgical and materials Transactions A*, Vol. 36A, Janury 2005 PP87-97.
- [8] Hwang K.C., Lee S., Lee H.C., Effect of alloying elements on microstructure and fracture propertices of cast high speed steel rolls, Part I: Microstructure analysis, *Materials Science and Engineering A*, 2009, P282-295.
- [9] Westerholt W, Dichtl H.J., Practical Experience with Work Roll of High Chromium Alloyed Cast Iron and their Core Materials in Hot Strip Mills, *Jamshdpur*, 27th and 28th November 1992.
- [10] Comand P., Martecchini F., Zorzi L., Roll Stock database and CNC Machine Programming:A INTEGRATED APPROACH, *MPT International*, 2013.
- [11] *ISCAR Cutting Tools* catalog.
- [12] *ATOMAT GROUP, Tools and Tool Supports* catalog.
- [13] Comand P., Martecchini F., Fernando Marucco L., Roll indentation for RE-BAR production: a strategy for the new global market demands, *Atomat Co*, 2009.
- [14] Oehlert G.W., A First Course in Design and Analysis of Experiments, *University of Minnesota*, 2010.
- [15] Taavitsainen V.M., Experimental Optimization and Response Surfaces, *Helsinki Metropolia University of Applied Sciences Finland*, 2003.
- [16] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson C.M., Response Surface Methodology, *Third Edition*, Wiley, 2009.

شیب خطوط به دست آمده، میزان تاثیرگذاری آن پارامتر را نسبت به پارامترهای دیگر مشخص می نماید. هرچقدر شیب بیشتر باشد میزان تاثیرگذاری بیشتر است. به عنوان مثال، عمق بار نسبت به پارامترهای دیگر تاثیر بیشتری دارد. محدوده سفید رنگ، محدوده تoleransi تعیین شده را نشان می دهد و محدوده ای است که قابلیت انجام فرایند با خواسته های مورد نظر وجود دارد. نقاط بهینه فرایند با تنظیمات انجام شده در Minitab در Cur با رنگ قرمز نشان داده شده است.



شکل ۱۹ نمودار نتایج بهینه سازی شده با استفاده از روش RSM در مینی تب

در آزمایشی دیگر بر روی همین غلتک، جهت صحت سنجی نتیجه به دست آمده توسط روش RSM، آج زنی بر روی همان غلتک با پارامترهای سرعت برشی 30 m/min ، پیشروی 0.125 mm/rev و عمق بار 0.09 میلی متر انجام شد. زمان این فرایند، ۱۲۵ ثانیه بود که مطابقت خوبی با مدل بهینه سازی شده داشت.

۸- نتیجه گیری

یکی از مشکلات بزرگ تولید کنندگان میلگرد، آج زدن غلتک های تندبر است. همان گونه که در این تحقیق اشاره شد، آج زدن این غلتک ها با ابزارهای معمول امکان پذیر نیست. در این تحقیق از اینسرت های گرید الماس و سرامیک و CBN جهت آج زدن استفاده شد. مشاهده شد که اینسرت الماس قابلیت نفوذ به سطح غلتک را نداشته و بر روی سطح آن سر می خورد، لذا ابزار مناسبی جهت آج زدن غلتک تندبر نیست.

اینسرت سرامیک قابلیت نفوذ در داخل غلتک و آج زدن در سرعت های پایین را دارد اما با افزایش سرعت و افزایش عمق بار، ابزار مقاومت خوبی از خود نشان نمی دهد. با توجه به ضرر و زیان سنگین شرکت های صنعتی بر اثر توقفات، هدف ما کاهش زمان آج زدن غلتک است و از طرفی می خواهیم از ابزاری استفاده نماییم که طول عمر بالایی داشته باشد. لذا اینسرت سرامیک هیچ کدام از این دو نیاز را نمی تواند تامین نماید و ابزار مناسبی جهت آج زدن غلتک تندبر نمی باشد.

یکی دیگر از ابزارهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، اینسرت CBN بود. CBN قابلیت نفوذ خوبی در داخل غلتک تندبر داشته و طول عمر مناسبی دارد. به منظور ارائه پارامترهای بهینه برای این فرایند، نیاز به روشی داشتیم که تعداد آزمایشات را کاهش دهد. لذا روش RSM در نرم افزار مینی تب مورد استفاده قرار گرفت. به کمک این روش، تعداد آزمایشات به ۱۷ عدد کاهش یافت. پس از مشخص شدن نتایج آزمایش ها، بهینه سازی فرایند انجام شد. زمان آج زدن یک کالیبر با اینسرت CBN بین ۱۰۰ تا ۲۱۰ ثانیه بود که