

# بررسی ماشینکاری ریشه پره کمپرسور موتور توربین گازی با فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی

مجید قریشی<sup>۱</sup>؛ ولی علی میرزالو<sup>۲</sup>

## چکیده

ساخت پره های منحرک موتورهای توربین گازی با توجه به شکل پیچیده و شرایط کاری حاد از تکنولوژی بالایی برخوردار است. در این میان ریشه پره با توجه به نیروهایی که به آن وارد می شود نسبت به بقیه قسمت های پره دارای کیفیت سطح و دقت ابعادی بالایی می باشد. تاکنون کیفیت سطح نامناسب مانع از بکارگیری روش تخلیه الکتریکی سیمی (وایرکات) برای ماشینکاری ریشه پره می شد. چندی پیش با توجه به پیشرفتهای موجود آمده در مولد ماشینهای وایرکات، استفاده از این روش برای ماشینکاری ریشه پره مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله کیفیت سطح حاصل از بکارگیری انواع ماشینهای وایرکات مطرح در این صنعت برای ماشینکاری ریشه پره کمپرسور بررسی شده است. بدین منظور با ماشینکاری نمونه هایی با ماشینهای وایرکات، مولفه های مختلف کیفیت سطح مانند زبری سطح، توپوگرافی سطح، سختی، ضخامت لایه های تغییر یافته سطحی، عیوبی مانند حفره ها و ترکهای ریز و تنشهای پسماند بررسی شده و در نهایت در مورد ماشینکاری ریشه پره کمپرسور با این روش نتیجه گیری شده است.

## کلمات کلیدی

ماشینکاری تخلیه الکتریکی، کیفیت سطح، پره، تنشهای پسماند

## *Investigation of Machining of Compressor Blade Root using Wire Electrical Discharge Process*

Majid Ghoreishi; Vali Alimirzaloo

### ABSTRACT

Manufacturing of blades in air turbine motors according to complicated shape and critical working conditions needs a high technology. The root of blade under applied forces should have high surface quality and dimensional accuracy in comparison with the other blade components. In this study, the surface quality due to different types of available wire-cut machines for machining of compressor blade root has been investigated. To this end some samples has been machined by different wire-cut machines. Afterwards the different components of surface integrity (such as surface roughness, surface topography, hardness, thickness of affected surface layers, microcrackes and pits, residual stresses) has been studied. Finally, the machining of the root of compressor blade with this process has been discussed and concluded.

### KEYWORDS

Electrical Discharge Machining, Surface Integrity, Blade, Residual Stress.

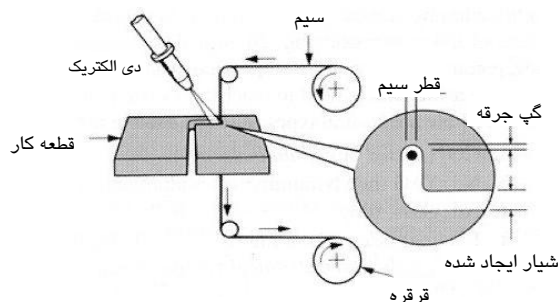
<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی: ghoreishi @ kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر: valimirzaloo@aut.ac.ir



در مولد ماشینهای EDM می‌باشد علاوه بر کاهش اثرات حرارتی، مشکلات ناشی از الکترولیز و خوردگی در حین فرایند را حل می‌کند. مولفه‌های مختلف کیفیت سطح که تحت عنوان یکپارچگی سطحی<sup>۱</sup> مورد ارزیابی قرار می‌گیرد شامل همه گوشه‌های نواحی سطحی و زیر سطحی مانند توپوگرافی سطح، زبری سطح، سختی، ضخامت لایه سفید، ترکهای ریز و تنشهای پسماند می‌باشد. بررسی میکروسکوپی کیفیت سطح، بخاطر نیاز به تجهیزات بیشتر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. Limet و همکارانش [۱] گزارش داده‌اند که در ماشینکاری با فرایند EDM تنها ۱۵٪ مواد ذوب شده، توسط دی الکتریک شسته و دفع می‌شود و بقیه مواد باقی مانده در اثر خنک کاری آنی، بر روی سطح منجمد می‌شوند که از آن به عنوان لایه recast یاد می‌شود. در مطالعه‌ای که A. Hascalyk و همکارانش [۲] بر روی اثر پارامترهای وایرکات بر یکپارچگی سطح انجام داده‌اند نشان می‌دهد که ضخامت لایه سفید 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 HAZ<sup>۲</sup> وابسته به انرژی پالسها می‌باشد. برپایه مطالعات Rebelo و همکارانش [۳] تنش پسماند در سطح ماشینکاری شده با فرایندهای EDM در اثر تبدیلات فازی ماده و گرادیان دمایی بالا می‌باشد و بیشتر ترکها و تنشهای پسماند بالا در لایه recast که ترد است ظاهر می‌شوند. در مطالعه‌ای که F. Ghanem و همکارانش [۴] انجام داده‌اند نشان داده شده است که نوع فولاد تاثیر زیادی در تغییرات سختی سطح ماشینکاری شده و تنشهای پسماند سطحی و ضخامت لایه‌های سطحی دارد بگونه‌ایکه در فولادهای سختی ناپذیر تنها یک لایه تغییر یافته سطحی با ساختار دندیریتی بوجود می‌آید ولی در فولادهای سختی پذیر علاوه بر لایه دندیریتی، دو لایه دیگر شامل لایه‌های مارتنزیتی کونچ شده و انتقال بوجود می‌آید. همچنین افزایش چگالی سطحی ترکهای ناشی از فرایند باعث کاهش تنشهای پسماند سطحی می‌شود. L. Velterop [۵] نشان داده است که این فرایند به طور موثری مقاومت به خستگی فولاد مارتنزیتی سخت شده را کاهش می‌دهد و میزان تاثیر لایه‌های تغییر یافته سطحی بر خواص خستگی با ضخامت آن ارتباط مستقیم دارد و همچنین گزارش داده است که چون این اثر زیان‌آور، با کاهش شدت پارامترهای ماشینکاری به احتمال قوی کاهش نمی‌یابد یک عملیات پرداخت پایانی مانند سنگزنی، براق کاری، ماشینکاری شیمیایی برای حذف لایه سطحی تغییر یافته لازم است. Jun Qu و همکارانش [۶] از روش دانه زنی

در تولید پره متحرک موتورهای توربین گازی معمولاً برای ساخت ریشه پره کمپرسور از روش خانکشی استفاده می‌شود. اما اخیراً ساخت ریشه پره با روش تخلیه الکتریکی سیمی (Wire EDM) مورد توجه قرار گرفته است. این روش یکنوع فرایند ماشینکاری با تخلیه الکتریکی است که در آن مواد رسانای الکتریکی با استفاده از جرقه‌های کنترل شده بین الکترود ابزار (سیم) و قطعه کار در داخل یک سیال دی الکتریک ماشینکاری می‌شود. انواع مختلف تئوریه‌ها برای این فرایند ارائه شده است که تئوری ترموالکتریکی یک پذیرش جهانی کسب کرده است. براساس این تئوری دمای بالای حاصل از تمرکز جریان تخلیه، عامل اصلی براده برداری می‌باشد. در این نوع ماشینکاری با توجه به نبود هیچ نوع نیرویی بین ابزار و قطعه کار از آن برای ماشینکاری فولادهای با استحکام بالا، کاربردهای تنگستن و فولادهای آلیاژی سخت شده استفاده می‌شود. به ماشینهایی که با فرایند Wire EDM کار میکنند وایرکات گفته می‌شود. در وایرکات، مطابق شکل ۱ الکترود سیمی بطور پیوسته از درون قطعه کار عبور می‌کند و عملیات جرقه زنی بین سطح الکترود و سطح قطعه کار انجام می‌شود.



شکل ۱- فرایند تخلیه الکتریکی سیمی

یکی از عوامل اصلی که تاکنون مانع از بکارگیری این روش برای ماشینکاری ریشه پره می‌شد کیفیت سطح نامناسب با توجه به مکانیزم حرارتی این روش بوده است اما چندی قبل با توجه به پیشرفتهایی که در مولد این ماشینها بوجود آمده است استفاده از آن را برای ماشینکاری ریشه پره امکانپذیر ساخته است. نوع مولد نقش اساسی در شکل و میزان پارامترهای ماشینکاری مانند شکل پالسها و اندازه آنها و نوع و مقدار جریان و ولتاژ در پایان در سرعت ماشینکاری و کیفیت سطح حاصل دارد بگونه‌ای که کیفیت سطح حاصل از وایرکاتهای جدیدی که مجهز به مولدی بنام SI<sup>۱</sup> هستند درمقایسه با وایرکاتهای معمولی (استاندارد) طبق ادعای سازندگان این دستگاهها تفاوت قابل توجهی دارد. مولد SI که آخرین فناوری

ترکیب شیمیایی جنس فولاد یادشده در جدول ۴ آمده است. برای ماشینکاری نمونه ها با ایرکات استاندارد از سیم برنجی به قطر ۰/۲۵ میلیمتر (SW2۵X) برابر تنظیمات داده شده در جدول ۱ استفاده شد. برای ماشینکاری نمونه ها با ایرکاتهای SI هم از سیم برنجی به قطر ۰/۲۵ میلیمتر (L۱۲۵) و تنظیمات داده شده در جدول ۲ استفاده شد. در شکل ۲ تعدادی از نمونه های ماشینکاری شده با هر سه دستگاه دیده می شوند.

### ۳- بررسی کیفی نمونه ها

در بررسی کیفیت سطح لازم است لایه های سطحی و زیر سطحی بصورت ماکروسکوپی و میکروسکوپی بررسی شوند. برای بررسی کیفیت سطح حاصل از ماشینکاری از اصطلاح یکپارچگی سطحی (surface integrity) استفاده می شود که شامل مواردی مانند توپوگرافی سطح، صافی سطح، سختی، لایه recast و منطقه HAZ، ساختار متالورژیکی لایه های سطحی و زیرسطحی، میکروتکرکها و وضعیت تنشهای پسماند می باشد.

#### ۳-۱- صافی سطح

صافی سطح حاصل که به طور زیادی به اندازه چاله ها و نرات حاصل روی سطح بستگی دارد با استفاده از اندازه گیری زبری سطح ارزیابی می شود بدین منظور زبری سطح نمونه ها با سه معیار Ra و Rt و Rz (ضمیمه ۱) توسط دستگاه زبری سنج ۵۰ SURFTEST اندازه گیری شد و نتایج مانند جدول (۳) بدست آمد. دیده می شود که صافی سطح حاصل از دستگاههای SI نسبت به دستگاه استاندارد در هر سه معیار خیلی بهتر می باشد. با توجه به اینکه طبق نقشه پره، حداکثر زبری سطح برای سطوح ریشه پره براساس معیار Ra،  $63 \mu\text{in}$  می تواند باشد بنابراین از لحاظ صافی سطح هر سه دستگاه مناسب می باشند.

جدول ۳- نتایج حاصل از اندازه گیری زبری سطح نمونه ها

	Ra ( $\mu\text{in}$ )	Rz ( $\mu\text{in}$ )	Rt ( $\mu\text{in}$ )
دستگاه استفاده شده			
استاندارد	۳۶,۹	۲۵۱,۲	۲۹۸,۸
Robofil ۲۰۲۰ SI	۸,۴	۴۳,۹	۷۱,۶
Robofil ۴۰۲۰ SI	۷,۰	۵۱,۰	۶۸,۰

#### ۳-۲- توپوگرافی سطح

منظور از توپوگرافی سطح، شکل ظاهری سطح ماشینکاری شده است که ارتباط زیادی با صافی سطح دارد. برای بررسی سطح از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

سایشی میکرونی (Abrasive-micro-blasting) برای بهبود کیفیت سطح یکنوع کامپوزیت ماشینکاری شده با ایرکات استفاده کرده اند و نشان داده اند که با این روش می توان لایه های آسیب دیده سطحی را از بین برد و زبری سطح را هم کاهش داد.

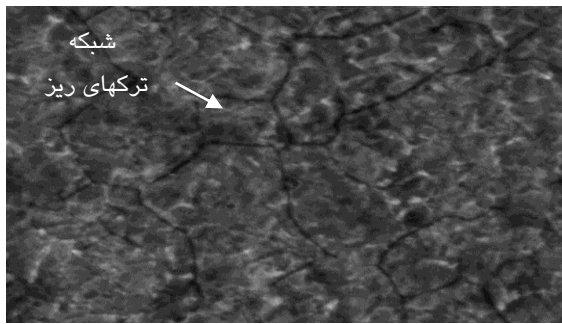
در این مقاله کیفیت سطح حاصل از انواع ماشینهای ایرکات در دسترس و مطرح (دارای مولدهای مختلف) برای ماشینکاری ریشه پره کمپرسور بررسی شده است. بدین منظور نمونه هایی با ماشینهای ایرکات، ماشینکاری گردید و مولفه های مختلف کیفیت سطح مانند زبری سطح، توپوگرافی سطح، سختی، ضخامت لایه های تغییر یافته سطحی، ایرادهایی مانند حفره ها، ترکهای ریز و تنشهای پسماند در نمونه ها با استفاده از دستگاههایی مانند زبری سنج، میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، پراش اشعه ایکس بررسی می شود.

### ۲- شرایط ماشینکاری نمونه ها

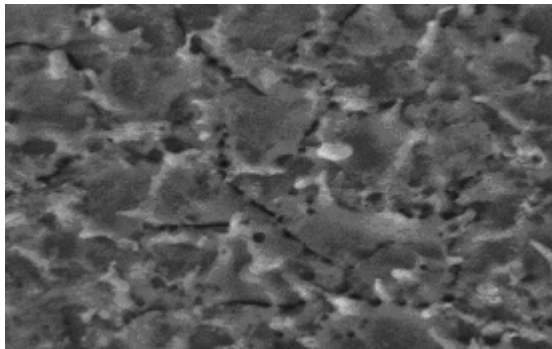
برای ماشینکاری نمونه ها از یک دستگاه ایرکات استاندارد Robofil ۴۰۰۰ و دو نوع ایرکات SI بنامهای Robofil ۲۰۲۰ SI و Robofil ۴۰۲۰ SI ساخت شرکت شارمیلز سوئیس استفاده گردید. ماشینهای Robofil ۲۰۲۰ SI و Robofil ۴۰۲۰ SI دارای شکل و ساختار مشابه هم هستند و تفاوتشان در محدوده کاری آنها می باشد. محدوده کاری در ایرکات Robofil ۴۰۲۰ SI برابر  $4020 \times 320 \text{ mm}$  می باشد. تفاوت اساسی این دو دستگاه با نوع استاندارد در بخش مولد می باشد. مولد ماشین استاندارد (Robofil ۴۰۰۰) شامل دو نوع مولد ایزوفرکانس و ایزوپالس است بخش مولد این دستگاهها علاوه بر دو مولد ایزوفرکانس و ایزوپالس، دارای مولد SI هم می باشد. با هرکدام از این دستگاهها تعدادی نمونه قطعه خام از جنس پره کمپرسور (فولاد ضد زنگ AMS ۵۶۴۳) ماشینکاری شدند سپس کیفیت سطح حاصل از ماشینکاری با هر سه دستگاه مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۲- نمونه های ماشینکاری شده



شکل ۶- سطح ماشینکاره شده با وایرکات SI ۲۰۲۰ (x1500)



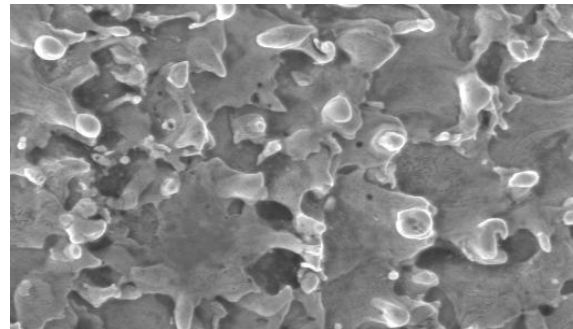
شکل ۷- سطح ماشینکاره شده با وایرکات SI ۴۰۲۰ (x1500)

در هر دو شکل (۶) و (۷) شبکه ترکهای میکرونی به خوبی دیده می‌شود. در مقایسه با نوع استاندارد (شکل ۵) اگرچه در این حالت ترکها بصورت شبکه‌ای است. شاید در حالت استاندارد بخاطر بزرگ بودن اندازه چاله‌ها این ترکها براحتی دیده نمی‌شوند و همچنین ترکهای ریز ۲۰ میکرونی و حفره‌ها در سطح آن در بعضی نقاط بصورت گسسته دیده می‌شود.

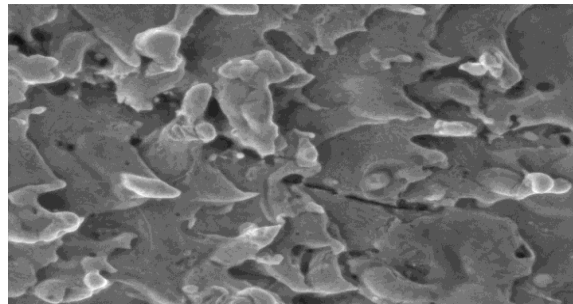
### ۳-۳- آنالیز عناصر سطح

برای آنالیز درصد عناصر در سطوح ماشینکاری شده از آشکار کننده EDS در SEM استفاده شد. در جدول ۴ نتایج مربوط به این آنالیز برای ماده پایه و سطح نمونه ماشینکاری شده با وایرکاتهای استاندارد و SI ۴۰۲۰ با هم مقایسه شده است. همانطور که دیده می‌شود در سطح ماشینکاری شده با وایرکات استاندارد درصد عناصر مولیبدن و نیوبیم و سیلیسیم نسبت به حالت قبل از ماشینکاری زیاد شده است و درصد آهن، کروم و نیکل کاهش یافته است. همچنین مقدار کمی عنصر روی، در سطح ماشینکاری شده دیده شد که نشان می‌دهد با توجه به اینکه جنس سیم مورد استفاده به عنوان الکترود از جنس برنج می‌باشد که آلیاژی از مس و روی است در هنگام ماشینکاری مقداری از سیم هم ذوب شده و در سطح ماشینکاری شده به همراه مواد مذاب منجمد می‌شود. در سطح ماشینکاری شده با وایرکات SI ۴۰۲۰ هم علاوه بر عناصر مولیبدن و نیوبیم و سیلیسیم درصد مس هم نسبت به حالت قبل از ماشینکاری افزایش یافته است که افزایش درصد مس و

بخاطر قابلیت بزرگنمایی بیشتر و داشتن قدرت تفکیک بالاتر و عمق میدان دید زیاد استفاده شد. دستگاه SEM مورد استفاده مدل XL۳۰ ساخت شرکت EDAX آمریکا می‌باشد که به کمک نرم افزار ZAF توانایی بررسی توپوگرافی سطح و تعیین درصد عناصر را دارد. در شکل‌های (۴) و (۵) سطح ماشینکاری شده با وایرکات استاندارد به ترتیب با بزرگنمایی‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ برابر نشان داده شده است و همانطور که دیده می‌شود سطح دارای چاله‌ها و برآمدگی‌های کاملاً نامنظم می‌باشد. علت این نامنظمی یکنواخت نبودن انرژی جرقه‌های مختلف می‌باشد. همچنین طبق شکل (۵) در سطح، حفره‌ها و ترکهای ریز به طول بیش از ۲۰ میکرون دیده می‌شود.



شکل ۴- سطح ماشینکاره شده با وایرکات استاندارد x500



شکل ۵- سطح حاصل از وایرکات استاندارد X 1000

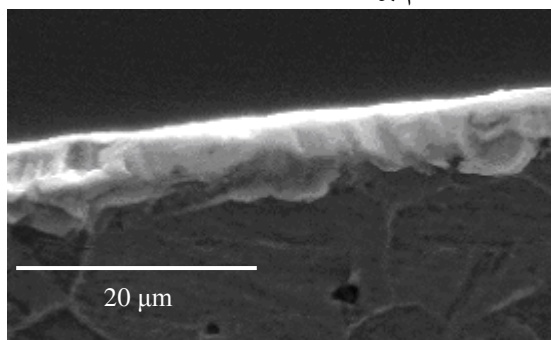
در شکل‌های (۶) و (۷) سطوح ماشینکاری شده با هر دو نوع وایرکات SI با بزرگنمایی ۱۵۰۰ برابر نشان داده شده است. در این حالت هم، سطح دارای چاله‌ها و برآمدگی‌های نامنظم می‌باشد اما اندازه چاله‌ها در سطح حاصل از وایرکات های SI کوچکتر از وایرکات استاندارد می‌باشد. به همین خاطر زبری سطح در حالت نوع استاندارد نسبت به SI خیلی بیشتر می‌باشد.

همچنین وجود عنصر روی ناشی از ذوب و انجماد مواد الکترو سیمی می‌باشد.

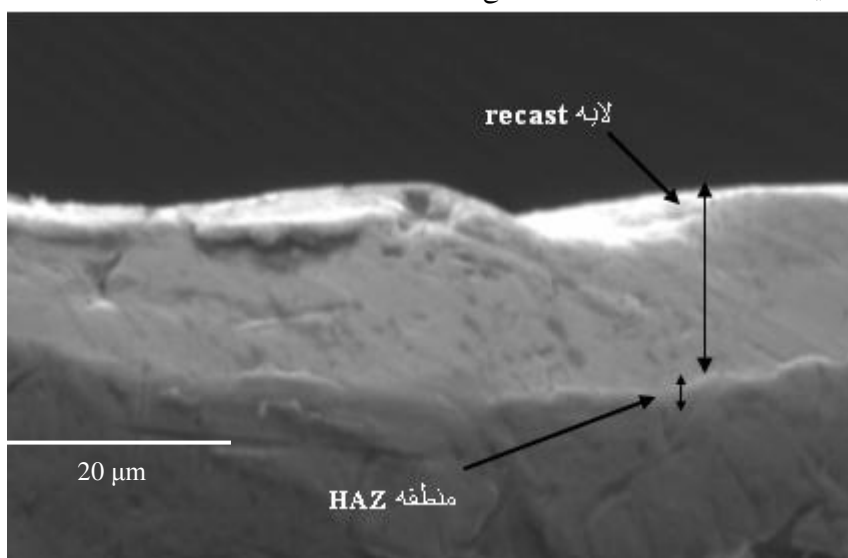
### ۳-۴- لایه recast و منطقه HAZ

در حین فرایند، مقداری از سطح قطعه کار که ذوب و دوباره بر روی سطح منجمد می‌شود که یک لایه نازک بنام لایه recast را تشکیل می‌دهد. منطقه HAZ که یک لایه سخت و ترد می‌باشد شامل هیچگونه حفره ای نبوده و بین لایه recast و قسمت پایه قرار دارد. در شکل (۸) لایه های سطحی در مقطع نمونه ماشینکاری شده با وایرکات استاندارد با بزرگنمایی ۷۵۰ با دستگاه SEM دیده می‌شود. همانطور که دیده می‌شود لایه های سطحی تغییر یافته در این شکل قابل تشخیص می‌باشند. ضخامت لایه recast حدود ۱۵ میکرون و لایه HAZ نزدیک ۵ میکرون می‌باشد. گفتنی است که ضخامت این لایه ها متغیر بوده و در همه قسمت‌های مقطع یکسان نمی‌باشد. در تصاویر مربوط به این لایه ها، بیشترین ضخامت حاصل، مورد توجه می‌باشد. در شکل‌های (۹) و (۱۰) بیشترین ضخامت لایه های سطحی تغییر یافته در نمونه های ماشینکاری شده با دستگاه‌های SI در حالت پرداختکاری با هم مقایسه شده اند. دیده می‌شود که ضخامت لایه های recast و HAZ در مجموع

در نمونه مربوط به دستگاه SI ۲۰۲۰ زیر ۷ میکرون و در نمونه مربوط به دستگاه SI ۴۰۲۰ زیر ۱۰ میکرون می‌باشد. شایان گفتن است که در قسمت‌های مختلف نمونه های ماشینکاری شده با وایرکات SI ۴۰۲۰ ضخامت لایه های تغییر یافته خیلی تغییر می‌کرد. طوریکه در بعضی قسمت‌ها برپایه شکل (۱۱)، ضخامت این لایه زیر ۲ میکرون هم می‌رسید. اما ضخامت این لایه ها در نمونه های مربوط به وایرکات SI ۲۰۲۰ یکنواخت بود و در نمونه های مربوط به وایرکات استاندارد، تغییرات در مقایسه با وایرکات SI ۴۰۲۰ کم بود

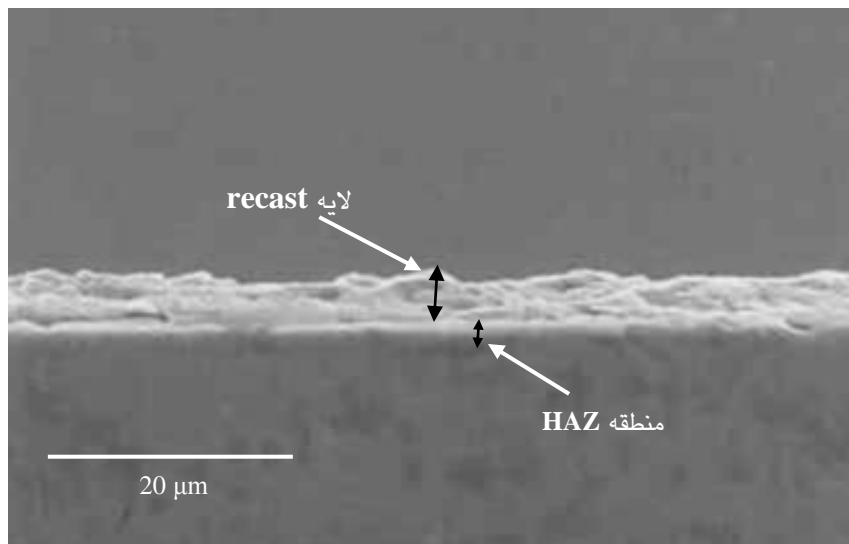


شکل ۱۰- لایه های سطحی تغییر یافته در نمونه ماشینکاری شده با وایرکات SI ۴۰۲۰ (x۷۵۰)

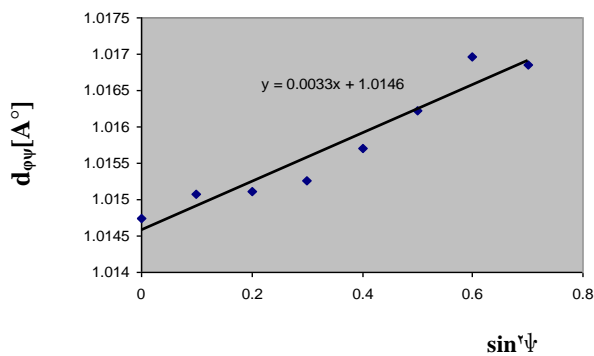


شکل ۸- لایه های سطحی تغییر یافته در مقطع نمونه ماشینکاری شده با وایرکات استاندارد (x۷۵۰)

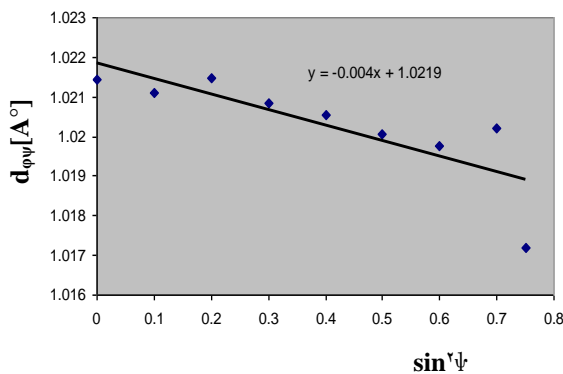




شکل ۹- لایه های سطحی تغییر یافته در نمونه های ماشینکاری شده با وایرکات SI ۲۰۲۰ (x۷۵۰)



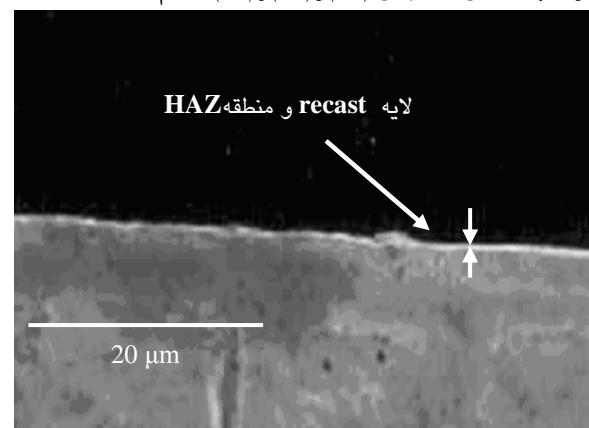
شکل ۱۲- نمودار  $d_{\phi\psi\_sin^2\psi}$  نمونه وایرکات استاندارد



شکل ۱۳- نمودار  $d_{\phi\psi\_sin^2\psi}$  نمونه پره اصلی

### ۳-۵- وضعیت تنشهای پسماند

یکی از اثرات ماشینکاری با فرایند Wire EDM بوجود آمدن تنشهای پسماند کششی در سطح ماشینکاری شده می باشد که این تنشها در بوجود آمدن ترکهای ریز و در نتیجه کارایی پره نقش اساسی دارند. با توجه به کوچک بودن نمونه ها و مزایای روش XRD از این روش و شیوه  $\sin^2\psi$  برای اندازه گیری تنشهای پسماند نمونه ها استفاده شد (ضمائم). بدین منظور از دستگاه X-Pert ساخت شرکت فیلیپس هلند و نرم افزار PC-APD استفاده شد. نمودار  $d_{\phi\psi\_sin^2\psi}$  برای هر سه نمونه براساس شکل های (۱۲) و (۱۳) و (۱۴) رسم شد.



شکل ۱۱- کاهش ضخامت لایه های سطحی تغییر یافته در نمونه های ماشینکاری شده با وایرکات SI ۲۰۲۰ (x ۷۵۰)

دسترس فاصله بیش از ۲۰ میکرون از لبه را می‌توانست اندازه گیری کند بنابراین به ناچار باید از سطح ماشینکاری شده سختی اندازه گرفته می‌شد که این اندازه گیری در نمونه های مربوط به وایرکاتهای SI بخاطر صافی سطح بهتر، به میزان قابل قبول بود ولی نمونه مربوط به وایرکات استاندارد سنباده زده شد و سپس سختی سطحش اندازه گیری شد. ولی در هر صورت مقادیر بدست آمده، دقت بالایی ندارند. سختی سطح ماشینکاری شده نمونه ها با دستگاه میکروسختی سنج polyvar با اعمال نیروی ۵۰۰ گرم اندازه گیری شد. نتایج حاصل مطابق جدول (۶) می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود سختی سطوح مربوط به وایرکاتهای SI که سطح ماشینکاری شده بدون سنباده زنی می‌باشد بزرگتر از سختی قسمت پایه می‌باشد که نشان می‌دهد در اثر ماشینکاری با وایرکات سختی سطح افزایش می‌یابد. و در نمونه مربوط به وایرکات استاندارد در اثر سنباده زنی لایه های تغییر یافته سطحی حذف شده اند در نتیجه مقدار سختی برابر سختی قسمت پایه می‌باشد. همچنین سختی سطح نمونه های ماشینکاری شده با وایرکاتهای SI بیش از سختی سطح نمونه اصلی می‌باشد. بنابراین سطح ماشینکاری شده با وایرکاتهای SI سختی سطح کافی را دارد.

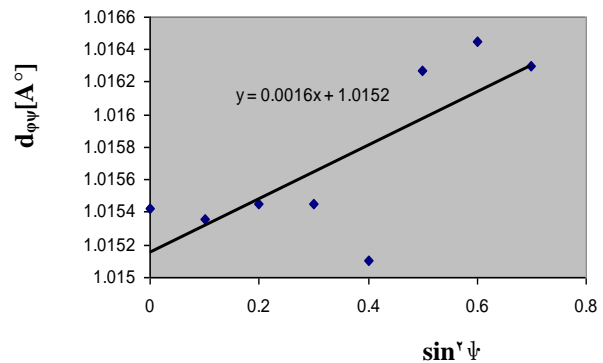
جدول ۶- اندازه سختی سطح نمونه ها

نمونه	سختی (HV)
ماشینکاری شده با وایرکات استاندارد	۳۴۰
ماشینکاری شده با وایرکات SI ۲۰۲۰	۳۶۷
ماشینکاری شده با وایرکات SI ۴۰۲۰	۳۷۳
نمونه اصلی	۳۶۴
قسمت پایه	۳۳۹

#### ۴- نتایج

در این مقاله، موارد مختلف مربوط به کیفیت سطح در نمونه‌های ماشینکاری شده با سه نوع وایرکات (استاندارد، SI ۲۰۲۰، SI ۴۰۲۰) بررسی گردید و نتایج عبارتند از:

- ۱- زبری سطح حاصل از وایرکاتهای SI به مراتب کمتر از وایرکات استاندارد می‌باشد. اگرچه زبری سطح حاصل از هر دو نوع وایرکات، طبق استاندارد مربوط به پره کمپرسور مناسب می‌باشد. و سطح حاصل از هر دو وایرکات حاوی چاله ها و حفره ها می‌باشد که اندازه آنها در وایرکاتهای SI کوچکتر از وایرکات استاندارد می‌باشد.
- ۲- ضخامت لایه های تغییر یافته سطحی در سطح حاصل



شکل ۱۴- نمودار  $d\phi\psi_{\sin^2\psi}$  نمونه وایرکات SI

همانطور که در این شکلها دیده می‌شود علامت شیب نمودار  $d\phi\psi_{\sin^2\psi}$  برای نمونه‌های ماشینکاری شده مثبت بوده و برای نمونه پره اصلی منفی می‌باشد. بنابراین تنشهای پسماند در نمونه های ماشینکاری شده با وایرکات کششی و در نمونه اصلی، فشاری می‌باشد. با توجه به مقادیر مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) مربوط به جنس نمونه‌ها (AMS ۵۶۴۳) به ترتیب برابر ۲۰۰ GPa و ۰٫۳، مقدار تنشهای پسماند مطابق جدول (۵) بدست آمد. همانطور که دیده می‌شود علاوه بر کششی بودن تنشهای پسماند در نمونه های ماشینکاری شده، میزان تنشها در نمونه ماشینکاری شده با وایرکات SI کمتر از وایرکات استاندارد می‌باشد. بنابراین از لحاظ تنشهای پسماند وایرکاتهای SI بهتر از وایرکات استاندارد می‌باشد. علت این کاهش همانطور که پیشتر اشاره شد، کاهش اثرات حرارتی در نوع SI می‌باشد.

جدول (۵): نتایج حاصل از اندازه گیری تنشهای پسماند

نمونه	مقدار تنش پسماند (MPa)
نمونه اصلی	-۳۵۴
نمونه وایرکات استاندارد	۵۰۷
نمونه وایرکات SI ۲۰۲۰	۲۴۷

#### ۳-۶- سختی سطح

سختی سطح قطعه کار نقش مهمی در مقاومت به سایش آن و در نتیجه کارایی قطعه دارد، به همین خاطر اندازه گیری سختی در سطوح ماشینکاری شده، ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه سطح ماشینکاری شده با وایرکات دارای چاله های نامنظم می‌باشد و نمی‌توان سختی آن را با دقت کافی از سطح ماشینکاری شده اندازه گرفت بهترین روش اندازه گیری سختی از سطح مقطع به فاصله کمتر از ضخامت لایه recast از لبه نمونه می‌باشد اما با توجه به اینکه میکروسختی سنج در

موتورهای توربینی بدلیل حمایت مالی و فراهم نمودن تجهیزات موردنیاز انجام این طرح، قدردانی می‌گردد.

## ۶- ضوابط

پراش اشعه ایکس طبق قانون براگ این توانایی را دارد که فضای بین اتمی ناشی از کرنش‌ها را که بوسیله نمونه تحمل می‌شود اندازه‌گیری کند. مقادیر تنشها با استفاده از این کرنش‌های الاستیک در کریستالها و ثابتهای الاستیک مواد بدست می‌آید. در روش XRD و شیوه  $\sin^2\psi$  از رابطه (۱) که براساس تئوری الاستیسیته، رابطه ای بین تنشهای پسماند سطحی و فاصله صفحات کریستالی است استفاده می‌شود [۹].

$$\sigma_{\phi} = \left( \frac{E}{1+\nu} \right) \frac{1}{d_{\phi 0}} \left( \frac{\partial d_{\phi}}{\partial \sin^2 \psi} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\sigma_{\phi}$  تنش مورد اندازه‌گیری است که با جهت اصلی زاویه  $\phi$  می‌سازد. زاویه  $\psi$  که راستای سطح نمونه را تعریف می‌کند زاویه بین نرمال سطح و خط دونیم‌کننده پرتو پراش شده است.  $d\phi\psi$  فاصله اندازه‌گیری شده بین صفحات کریستالی در راستای تعریف شده با زوایای  $\phi$  و  $\psi$  بوده و  $E$  مدول الاستیسیته و  $\nu$  نسبت پواسون است. در شیوه  $\sin^2\psi$  با توجه به معلوم بودن مقادیر  $E$  و  $\nu$  با بدست آوردن مقادیر  $d\phi\psi$  برای  $\psi$  های مختلف بوسیله پراش اشعه  $x$  نمودار خطی  $d\phi\psi_{\sin^2\psi}$  تقریب زده می‌شود (شکلای ۱۴-۱۲) و با محاسبه شیب آن و جایگذاری در رابطه (۱)، مقدار تنشهای پسماند محاسبه می‌شود. [۹، ۸]

از وایرکات SI ۴۰۲۰ حدود ۱۰ میکرون و در SI ۲۰۲۰ نزدیک ۷ میکرون است. که نسبت به وایرکات استاندارد (نزدیک ۲۰ میکرون) کمتر می‌باشد.

۳- لایه recast حاصل از ماشینکاری با وایرکاتهای SI همانند وایرکات استاندارد حاوی شبکه‌هایی از ترکهای ریزمی باشد که برای استحکام خستگی ریشه پره به شدت آسیب‌رسان می‌باشند.

۴- آنالیز درصد عناصر سطح ماشینکاری شده نمونه‌ها نشان می‌دهد که در حین انجام فرایند، مقداری از مواد الکترو سیمی (مس و روی)، ذوب و در سطح ماشینکاری شده منجمد می‌شود.

۵- تنشهای پسماند در سطح ماشینکاری شده با وایرکاتها از نوع کششی بوده و اندازه آنها در نمونه‌های مربوط به وایرکاتهای SI کمتر از وایرکات استاندارد می‌باشد و در سطح نمونه اصلی تنشهای پسماند، فشاری می‌باشد.

۶- در اثر ماشینکاری با وایرکاتها سختی سطح افزایش می‌یابد و در مقایسه با سختی سطح نمونه اصلی، سختی کافی را دارند.

بنابراین با توجه به نتایج گفته شده و نیاز به استحکام خستگی بالا در ریشه پره، برای استفاده از وایرکات برای ماشینکاری ریشه پره، در صورت استفاده از این فرایند، علاوه بر این فرایند نیاز به یک عملیات پایانی مانند سنگزنی می‌باشد.

## ۵- تقدیر و تشکر

از شرکت صنایع هواپیمایی ایران، صنایع ساخت قطعات و

جدول ۱- مقادیر پارامترهای ماشینکاری نمونه‌ها با وایرکات استاندارد

پارامتر	M	V (v)	P (A)	A ( $\mu$ s)	F (KHz)	Pal (A)	Tac ( $\mu$ s)	Ws (m/min)	Wb (kg)	ST	PA	El	S (mm/min)	Aj (v)	INj (bar)	offset
E۳	۹	-۸۰	۱۵	۱,۶	۲۵۰	۷	۰,۴	۱۰	۱۰	۲	۶	۱۵	۱۰	۵۰	۰	۰,۱۵۰
E۶	۹	-۲۰۰	۱۱	۰,۲	۲۵۰	۷	۰,۲	۸	۱,۴	۲	۶	۱۵	۵,۵۰	۱۵۴	۰	۰,۱۲۸
E۸	۷	-۱۶۰	۷	۱	۲۰۰	۷	۰,۲	۸	۱,۴	۲	۶	۱۵	۴,۳۰	۵۶	۰	۰,۱۳۵
E۹	۷	-۱۶۰	۷	۱	۲۰۰	۷	۰,۲	۸	۱,۴	۰	۶	۱۵	۲,۹۰	۴۳	۰	۰,۱۳۳
E۱۱	۷	+۱۲۰	۵	۰,۲	۲۵۰	۵	۰,۲	۸	۱,۴	۰	۶	۱۵	۲,۸۷	۰	۰	۰,۱۳۴
E۱۷	۷	-۱۶۰	۵	۱	۲۰۰	۷	۰,۲	۸	۱,۴	۰	۶	۱۵	۶,۵۰	۷۰	۰	۰,۱۳۵
E۱۸	۷	-۱۶۰	۷	۱	۲۰۰	۷	۰,۲	۸	۱,۴	۲	۶	۱۵	۲,۲۵	۷۰	۰	۰,۱۳۵



جدول ۲- مقادیر پارامترهای ماشینکاری نمونه ها با وایرکاتهای SI

پارامتر / پاس	M	V (v)	A (μs)	B (μs)	Tac (μs)	Ws (m/min)	Wb (kg)	ST	S (mm/min)	Aj (v)	INj (bar)	offset
E۲	۱	۵	۳	۴۴	۱۰	۱۳	۰,۱۵۱	۱	۰,۴	۸	۱	۱
E۸	۷	۱	۰	۱۴	۷	۷,۴	۰,۱۶۷	۴	۰,۸	۱۰	۱	۱,۶
E۹	۷	۱	۰	۱۴	۷	۷,۴	۰,۱۷۷	۴	۰,۸	۱۰	۱	۱,۶
E۱۰	۱۹	۷	۰	۰	۱,۱۹۹	۱۴,۶	۰,۱۷۹	۵	۰,۷	۶,۶	۳	۱,۴
E۱۳	۱۹	۱	۰	۰	۱,۱۹۹	۱۴,۶	۰,۱۷۹	۵	۰,۷	۶,۶	۳	۱,۴
E۲۱	۱۰	۱	۰	۰	۱,۱۹۹	۱۴,۶	۰,۱۷۹	۵	۰,۷	۴	۱	۱,۴
E۲۲	۱۰	۱	۰	۰	۱,۱۹۹	۱۴,۶	۰,۱۷۹	۵	۰,۷	۴	۱	۱,۴

جدول ۴- درصد عناصر در سطح نمونه ها

عناصر	Mn	Si	Mo	Nb	Cr	Ni	Cu	Zn	Fe
پایه	۱,۱۳۰	۰,۴۶۹	۰,۳۱۴	۰,۲۸۲	۱۶,۴۶۹	۴,۷۶۶	۳,۴۴۶	۰,۰۰	۷۲,۸۳
استاندارد	۱,۰۷	۱,۲۲	۵,۳۲	۳,۳۵	۱۴,۸۵	۳,۵۵	۳,۳۳	۰,۲۲	۶۷,۰۸
۴۰۲۰SI	۱,۱۲۴	۰,۶۴	۷,۴۲	۴,۵۳	۱۳,۰۳	۳,۲۹	۸,۵۰	۲,۲۲	۵۸,۵۵

## ۸- زیر نویس

## ۷- مراجع

۱ :surface integrity  
۲ : heat affected zone

- L.C. Lim, L.C. Lee, Y.S. Wong, H.H. Lu, Mater. Sci. Technol. 7(1991) 239. [۱]
- Ahmet Hascalyk, Ulas Caydas, "experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel", J.Mater.Process. technol 148 (2004) 362-367 [۲]
- J.C. Rebelo, A. Morao Dias, D. Kremer, J.L. Lebrun, J. Mater.Process. Technol. 84 (1-3) (1998) 90. [۳]
- F.Ghanem,C.Braham, H.Sidhom," influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity", J.Mater.Process. technol 142 (2003) 163-173 [۴]
- L.Velterop, "influence of wire electrical discharge machining on the fatigue properties of high strength stainless steel", NLR-TP-2003-104 [۵]
- Jun Qu, Albert J.Shih, Ronald O.Scattergood, Jie Luo, "abrasive micro-blasting to improve surface integrity of electrical discharge machined WC-Co composite", J.Mater.Process. technol,2004 [۶]
- R.K.Jain, "engineering metrology", 3<sup>rd</sup> Edition, Romesh chander khanna, 2002 [۷]
- paul S.Prevey, "problems with non-destructive surface x-ray diffraction residual stress measurement", practical applications of residual stress technology, ed.C. Ruud, Materials Park, OH:American society for metals,1991, pp 47-54 [۸]
- Paul S. Prevey," X-Ray diffraction residual stress techniques", Metals Handbook, 10, Metals Park, 1986, pp. 380-392. [۹]