بررسي ماشينكاري ريشه پره كمپرسور موتور توربين گازي با فرآيند تخليه الكتريكي سيمي

مجيد قريشي[i]; ولي علي ميرزالو[ii]

چكيده

ساخت پره هاي متحرک موتورهاي توربين گازي با توجه به شكل پيچيده و شرايط كاري حاد از تكنولوژي بالايي برخوردار است. در اين ميان ريشه پره با توجه به نيروهايي كه به آن وارد مي‌شود نسبت به بقيه قسمتهاي پره داراي كيفيت سطح و دقت ابعادي بالايي مي‌باشد. تاكنون كيفيت سطح نامناسب مانع از بكارگيري روش تخليه الكتريكي سيمي(وايركات) براي ماشينكاري ريشه پره مي شد. چندي پيش با توجه به پيشرفتهاي بوجود آمده در مولد ماشينهاي وايركات، استفاده از اين روش براي ماشينكاري ريشه پره مورد توجه قرار گرفته است. در اين مقاله كيفيت سطح حاصل از بكارگيري انواع ماشينهاي وايركات مطرح در اين صنعت براي ماشينكاري ريشه پره كمپرسور بررسي شده است. بدين منظور با ماشينكاري نمونه هايي با ماشينهاي وايركات، مولفه هاي مختلف كيفيت سطح مانند زبري سطح، توپوگرافي سطح، سختي، ضخامت لايه هاي تغيير يافته سطحي، عيوبي مانند حفره ها و تركهاي ريز و تنشهاي پسماند بررسي شده و در نهايت در مورد ماشينكاري ريشه پره كمپرسور با اين روش نتيجه گيري شده است.

كلمات كليدي

ماشينكاري تخليه الكتريكي، كيفيت سطح، پره، تنشهاي 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.

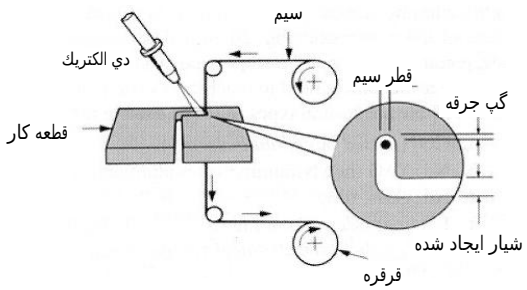
KEYWORDS

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

[i] دانشيار دانشكده مهندسي مكانيک دانشگاه صنعتي خواجه نصير الدين طوسي: ghoreishi@kntu.ac.ir
[ii] دانشجوي دكتراي دانشكده مهندسي مكانيک دانشگاه صنعتي اميركبير: valimirzaloo@aut.ac.ir

۱- مقدمه

در توليد پره متحرک موتورهاي توربين گازي معمولاً براي ساخت ريشه پره کمپرسور از روش خانکشي استفاده مي شود. اما اخيراً ساخت ريشه پره با روش تخليه الکتريکي سيمي(Wire EDM) مورد توجه قرار گرفته است. اين روش يکنوع فرايند ماشينکاري با تخليه الکتريکي است که در آن مواد رساناي الکتريکي با استفاده ازجرقه هاي کنترل شده بين الکترود ابزار(سيم) وقطعه کار درداخل يك سيال دي الکتريك ماشينکاري مي‌شود. انواع مختلف تئوريها براي اين فرايند ارائه شده است که تئوري ترموالکتريکي يك پذيرش جهاني کسب کرده است. براساس اين تئوري دماي بالاي حاصل از تمرکز جريان تخليه، عامل اصلي براده برداري مي‌باشد. در اين نوع ماشينکاري با توجه به نبود هيچ نوع نيرويي بين ابزار و قطعه کار از آن براي ماشينکاري فولادهاي با استحکام بالا، کاربيدهاي تنگستن و فولادهاي آلياژي سخت شده استفاده مي‌شود. به ماشينهايي که با فرايند Wire EDM کار ميکنند وايرکات گفته مي‌شود. در وايرکات، مطابق شکل۱ الکترود سيمي بطور پيوسته از درون قطعه کار عبور مي‌کند و عمليات جرقه زني بين سطح الکترود و سطح قطعه کار انجام مي‌شود.



شکل۱- فرايند تخليه الکتريکي سيمي

يکي از عوامل اصلي که تاکنون مانع از بکارگيري اين روش براي ماشينکاري ريشه پره مي شد کيفيت سطح نامناسب با توجه به مکانيزم حرارتي اين روش بوده است اما چندي قبل با توجه به پيشرفتهايي که در مولد اين ماشينها بوجود آمده است استفاده از آن را براي ماشينکاري ريشه پره امکانپذير ساخته است. نوع مولد نقش اساسي در شکل و ميزان پارمترهاي ماشينکاري مانند شکل پالسها و اندازه آنها و نوع و مقدار جريان و ولتاژ در پايان در سرعت ماشينکاري و کيفيت سطح حاصل دارد بگونه اي که کيفيت سطح حاصل از وايرکاتهاي جديدي که مجهز به مولدي بنام **SI**[1] هستند درمقايسه با وايرکاتهاي معمولي(استاندارد) طبق ادعاي سازندگان اين دستگاهها تفاوت قابل توجهي دارد. مولد **SI** که آخرين فناوري در مولد ماشينهاي **EDM** مي‌باشد علاوه بر کاهش اثرات حرارتي، مشکلات ناشي از الکتروليز و خوردگي در حين فرايند را حل مي‌کند. مولفه هاي مختلف کيفيت سطح که تحت عنوان يکپارچگي سطحي[1] مورد ارزيابي قرار مي‌گيرد شامل همه گوشه هاي نواحي سطحي و زير سطحي مانند توپوگرافي سطح، زبري سطح، سختي، ضخامت لايه سفيد، ترکهاي ريز و تنشهاي پسماند مي باشد. بررسي ميکروسکوپي کيفيت سطح، بخاطر نياز به تجهيزات بيشتر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. Limet و همکارانش[۱] گزارش داده اند که در ماشينکاري با فرايندEDM تنها ۱۵% مواد ذوب شده، توسط دي الکتريک شسته و دفع مي شود و بقيه مواد باقي مانده در اثر خنک کاري آني، بر روي سطح منجمد مي شوند که از آن به عنوان لايه recast ياد مي‌شود. در مطالعه‌اي که A.Hascalyk و همکارانش[۲] بر روي اثر پارامترهاي وايرکات بر يکپارچگي سطح انجام داده اند نشان مي‌دهد که ضخامت لايه سفيد متناسب با مقدار انرژي پالسها بوده و زبري سطح و دانسيته ترکها در لايه سفيد با افزايش زمان روشني پالسها و ميزان ولتاژ مدار باز افزايش مي‌يابد و همچنين ميزان نفوذ ترکها در منطقه HAZ[2] وابسته به انرژي پالسها مي‌باشد. برپايه مطالعات Rebelo و همکارانش[۳] تنش پسماند در سطح ماشينکاري شده با فرايندهاي EDM در اثر تبديلات فازي ماده و گراديان دمايي بالا مي‌باشد و بيشتر ترکها و تنشهاي پسماند بالا در لايه recast که ترد است ظاهر مي شوند. در مطالعه‌اي که F.Ghanem و همکارانش[۴] انجام داده اند نشان داده شده است که نوع فولاد تاثير زيادي در تغييرات سختي سطح ماشينکاري شده و تنشهاي پسماند سطحي و ضخامت لايه هاي سطحي دارد بگونه ايکه در فولادهاي سختي ناپذير تنها يک لايه تغيير يافته سطحي با ساختار دنديريتي بوجود مي‌آيد ولي در فولادهاي سختي پذير علاوه بر لايه دنديريتي، دو لايه ديگر شامل لايه هاي مارتنزيتي کوئنچ شده و انتقال بوجود مي آيد. همچنين افزايش چگالي سطحي ترکهاي ناشي از فرايند باعث کاهش تنشهاي پسماند سطحي مي‌شود. L.Velterop [۵] نشان داده است که اين فرايند به طور موثري مقاومت به خستگي فولاد مارتنزيتي سخت شده را کاهش مي‌دهد و ميزان تاثير لايه هاي تغيير يافته سطحي بر خواص خستگي با ضخامت آن ارتباط مستقيم دارد و همچنين گزارش داده است که چون اين اثر زيان‌آور، با کاهش شدت پارامترهاي ماشينکاري به احتمال قوي کاهش نمي‌يابد يک عمليات پرداخت پاياني مانند سنگزني، براق کاري، ماشينکاري شيميايي براي حذف لايه سطحي تغيير يافته لازم است. Jun Qu و همکارانش[۶] از روش دانه زني

سايشي ميكروني (Abrasive-micro-blasting) براي بهبود كيفيت سطح يكنوع كامپوزيت ماشينكاري شده با وايركات استفاده كرده اند و نشان داده اند كه با اين روش مي توان لايه‌هاي آسيب ديده سطحي را از بين برد و زبري سطح را هم كاهش داد.

در اين مقاله كيفيت سطح حاصل از انواع ماشينهاي وايركات در دسترس و مطرح (داراي مولدهاي مختلف) براي ماشينكاري ريشه پره كمپرسور بررسي شده است. بدين منظور نمونه هايي با ماشينهاي وايركات، ماشينكاري گرديد و مولفه‌هاي مختلف كيفيت سطح مانند زبري سطح، توپوگرافي سطح، سختي، ضخامت لايه هاي تغيير يافته سطحي، ايرادهايي مانند حفره ها, تركهاي ريز و تنشهاي پسماند در نمونه ها با استفاده از دستگاههايي مانند زبري سنج، ميكروسكوپ نوري و الكتروني روبشي، پراش اشعه ايكس بررسي مي‌شود.

۲- شرايط ماشينكاري نمونه ها

براي ماشينكاري نمونه ها از يک دستگاه وايركات استاندارد Robofil۴۰۰۰ و دو نوع وايركات SI بنامهاي Robofil۲۰۲۰ SI و Robofil۴۰۲۰ SI ساخت شركت شارميلز سوئيس استفاده گرديد. ماشينهاي Robofil۲۰۲۰ SI و Robofil۴۰۲۰ SI داراي شكل و ساختار مشابه هم هستند و تفاوتشان در محدوده كاري آنها مي‌باشد. محدوده كاري در وايركات ۴۰۲۰ SI برابر۳۲۰*۴۵۰mm و در وايركات ۲۰۲۰ SI برابر ۲۲۰*۳۲۰mm مي‌باشد. تفاوت اساسي اين دو دستگاه با نوع استاندارد در بخش مولد مي‌باشد. مولد ماشين استاندارد (Robofil۴۰۰۰)شامل دو نوع مولد ايزوفركانس و ايزوپالس است بخش مولد اين دستگاهها علاوه بر دو مولد ايزوفركانس و ايزوپالس، داراي مولد SI هم مي‌باشد. با هركدام از اين دستگاهها تعدادي نمونه قطعه خام از جنس پره كمپرسور(فولاد ضد زنگAMS۵۶۴۳) ماشينكاري شدند سپس كيفيت سطح حاصل از ماشينكاري با هر سه دستگاه مورد مطالعه قرار گرفت.

شكل۲- نمونه هاي ماشينكاري شده

تركيب شيميايي جنس فولاد يادشده در جدول ۴ آمده است. براي ماشينكاري نمونه ها با وايركات استاندارد از سيم برنجي به قطر ۰/۲۵ ميليمتر(SW۲۵X) برابر تنظيمات داده شده در جدول۱ استفاده شد. براي ماشينكاري نمونه ها با وايركاتهاي SI هم از سيم برنجي به قطر ۰/۲۵ ميليمتر(Lt۲۵) و تنظيمات داده شده در جدول۲ استفاده شد. در شكل ۲ تعدادي از نمونه هاي ماشينكاري شده با هر سه دستگاه ديده مي شوند.

۳- بررسي كيفي نمونه ها

در بررسي كيفيت سطح لازم است لايه هاي سطحي و زير سطحي بصورت ماكروسكوپي و ميكروسكوپي بررسي شوند. براي بررسي كيفيت سطح حاصل از ماشينكاري از اصطلاح يكپارچگي سطحي(surface integrity) استفاده مي‌شود كه شامل مواردي مانند توپوگرافي سطح، صافي سطح، سختي، لايه recast و منطقه HAZ، ساختار متالورژيكي لايه‌هاي سطحي و زيرسطحي، ميكروتركها و وضعيت تنشهاي پسماند مي‌باشد.

۳-۱- صافي سطح

صافي سطح حاصل كه به طور زيادي به اندازه چاله ها و ذرات حاصل روي سطح بستگي دارد با استفاده از اندازه گيري زبري سطح ارزيابي مي شود بدين منظور زبري سطح نمونه ها با سه معيار Ra و Rt و Rz (ضميمه ۱) توسط دستگاه زبري سنج SURFTEST. ۵۰ اندازه گيري شد و نتايج مانند جدول (۳) بدست آمد. ديده مي‌شود كه صافي سطح حاصل از دستگاههاي SI نسبت به دستگاه استاندارد در هر سه معيار خيلي بهتر مي‌باشد. با توجه به اينكه طبق نقشه پره، حداكثر زبري سطح براي سطوح ريشه پره براساس معيار Ra، ۶۳ µin مي‌تواند باشد بنابراين از لحاظ صافي سطح هر سه دستگاه مناسب مي‌باشند.

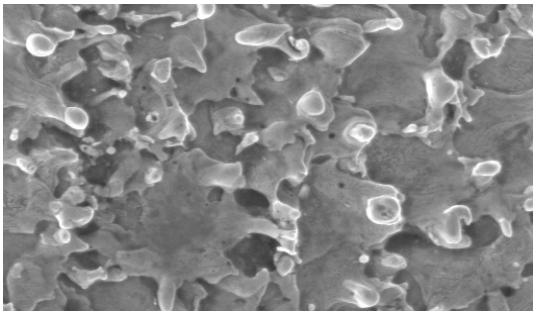
جدول ۳- نتايج حاصل از اندازه گيري زبري سطح نمونه ها

دستگاه استفاده شده	Ra (µin)	Rz (µin)	Rt (µin)
استاندارد	۳۶,۹	۲۵۱,۲	۲۹۸,۸
Robofil۲۰۲۰ SI	۸,۴	۴۳,۹	۷۱,۶
Robofil۴۰۲۰ SI	۷,۰	۵۱,۰	۶۸,۰

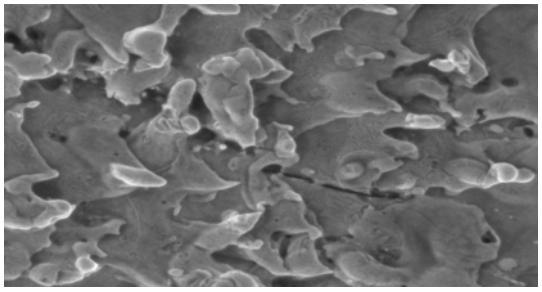
۳-۲- توپوگرافي سطح

منظور از توپوگرافي سطح، شكل ظاهري سطح ماشيتكاري شده است كه ارتباط زيادي با صافي سطح دارد. براي بررسي سطح از دستگاه ميكروسكوپ الكتروني روبشي (SEM)

بخاطر قابليت بزرگنمايي بيشتر و داشتن قدرت تفكيك بالاتر و عمق ميدان ديد زياد استفاده شد. دستگاه SEM مورد استفاده مدل XL۳۰ ساخت شركت EDAX آمريكا مي‌باشد كه به كمك نرم افزار ZAF توانايي بررسي توپوگرافي سطح و تعيين درصد عناصر را دارد. در شكلهاي (۴) و(۵) سطح ماشينكاري شده با وايركات استاندارد به ترتيب با بزرگنمايي هاي ۵۰۰ و ۱۰۰۰برابر نشان داده شده است و همانطور كه ديده مي‌شود سطح داراي چاله ها و برآمدگيهاي كاملاً نامنظم مي‌باشد. علت اين نامنظمي يكنواخت نبودن انرژي جرقه‌هاي مختلف مي باشد. همچنين طبق شكل(۵) در سطح، حفره ها و تركهاي ريز به طول بيش از ۲۰ ميكرون ديده مي‌شود.

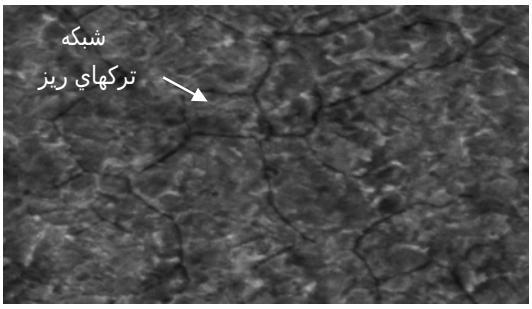


شكل٤- سطح ماشينكاره شده با وايركات استاندارد۵۰۰x

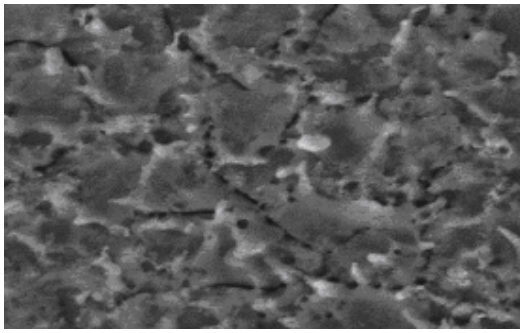


شكل ۵- سطح حاصل از وايركات استاندارد ۱۰۰۰ X

در شكل‌هاي (۶) و (۷) سطوح ماشينكاري شده با هر دو نوع وايركات SI با بزرگنمايي۱۵۰۰ برابر نشان داده شده است. در اين حالت هم، سطح داراي چاله ها و برآمدگيهاي نامنظم مي باشد اما اندازه چاله ها در سطح حاصل از وايركات هاي SI كوچكتر از وايركات استاندارد مي‌باشد. به همين خاطر زبري سطح در حالت نوع استاندارد نسبت به SI خيلي بيشتر مي باشد.



شكل ۶- سطح ماشينكاره شده با وايركاتSI ۲۰۲۰ (x۱۵۰۰)



شكل ۷- سطح ماشينكاره شده با وايركا اتSI ۴۰۲۰ (x۱۵۰۰)

در هر دو شكل (۶) و(۷) شبكه تركهاي ميكروني به خوبي ديده مي‌شود. در مقايسه با نوع استاندارد (شكل۵) اگرچه در اين حالت تركها بصورت شبكه‌اي است. شايد در حالت استاندارد بخاطر بزرگ بودن اندازه چاله ها اين تركها براحتي ديده نمي‌شوند و همچنين تركهاي ريز ۲۰ ميكروني و حفره ها در سطح آن در بعضي نقاط بصورت گسسته ديده مي شود.

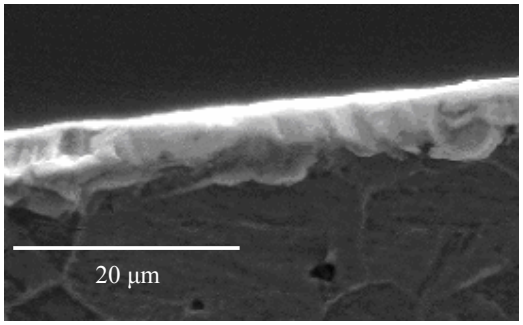
۳-۳- آناليز عناصر سطح

براي آناليز درصد عناصر در سطوح ماشينكاري شده از آشكار كننده EDS در SEM استفاده شد. در جدول۴ نتايج مربوط به اين آناليز براي ماده پايه و سطح نمونه ماشينكاري شده با وايركاتهاي استاندارد و ۴۰۲۰SI با هم مقايسه شده است. همانطور كه ديده مي‌شود در سطح ماشينكاري شده با وايركات استاندارد درصد عناصر موليبدن و نيوبيم و سيليسيم نسبت به حالت قبل از ماشينكاري زياد شده است و درصد آهن، كروم و نيكل كاهش يافته است. همچنين مقدار كمي عنصر روي, در سطح ماشينكاري شده ديده شد كه نشان مي‌دهد با توجه به اينكه جنس سيم مورد استفاده به عنوان الكترود از جنس برنج مي‌باشد كه آلياژي از مس و روي است در هنگام ماشينكاري مقداري از سيم هم ذوب شده ودر سطح ماشينكاري شده به همراه مواد مذاب منجمد مي‌شود. در سطح ماشينكاري شده با وايركات ۴۰۲۰SI هم علاوه بر عناصر موليبدن و نيوبيم و سيليسيم درصد مس هم نسبت به حالت قبل از ماشينكاري افزايش يافته است كه افزايش در صد مس و

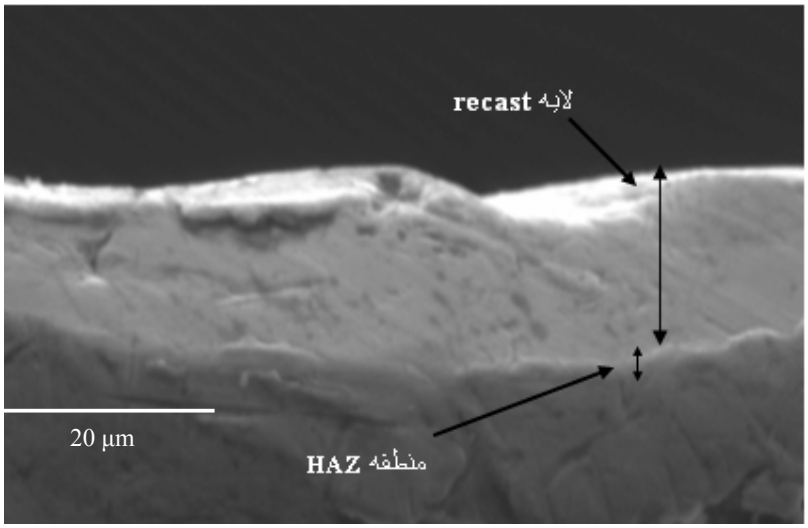
همچنين وجود عنصر روي ناشي از ذوب و انجماد مواد الكترود سيمي مي‌باشد.

۳-۴- لايه recast و منطقه HAZ

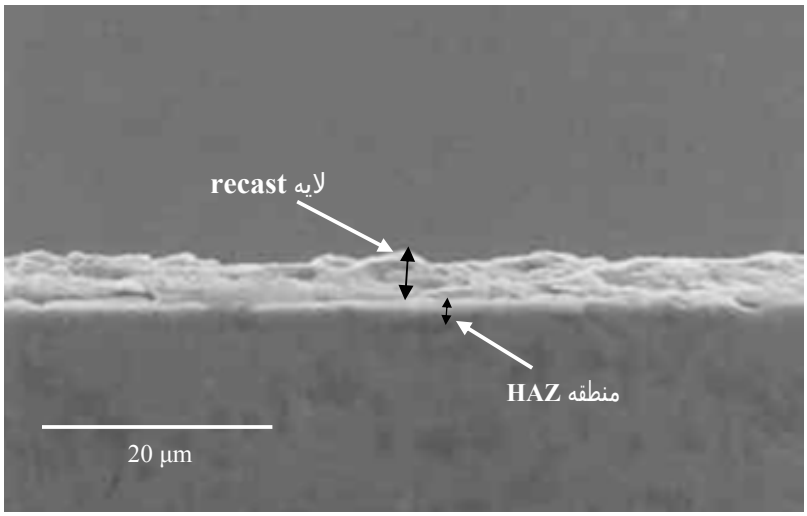
در حين فرايند، مقداري از سطح قطعه كار كه ذوب و دوباره بر روي سطح منجمد مي‌شود كه يك لايه نازك بنام لايه recast را تشكيل مي‌دهد. منطقه HAZ كه يك لايه سخت و ترد مي‌باشد شامل هيچگونه حفره اي نبوده و بين لايه recast و قسمت پايه قرار دارد. در شكل(۸) لايه هاي سطحي در مقطع نمونه ماشينكاري شده با وايركات استاندارد با بزرگنمايي ۷۵۰ با دستگاه SEM ديده مي‌شود. همانطور كه ديده مي‌شود لايه هاي سطحي تغيير يافته در اين شكل قابل تشخيص مي‌باشند. ضخامت لايه recast حدود ۱۵ ميكرون و لايه HAZ نزديک ۵ ميكرون مي‌باشد. گفتني است كه ضخامت اين لايه ها متغير بوده و در همه قسمتهاي مقطع يكسان نمي‌باشد. در تصاوير مربوط به اين لايه ها، بيشترين ضخامت حاصل، مورد توجه مي‌باشد. در شكلهاي (۹) و (۱۰) بيشترين ضخامت لايه هاي سطحي تغيير يافته در نمونه هاي ماشينكاري شده با دستگاههاي SI در حالت پرداختكاري با هم مقايسه شده اند. ديده مي‌شود كه ضخامت لايه هاي recast و HAZ در مجموع در نمونه مربوط به دستگاه**SI** ۲۰۲۰ زير ۷ ميكرون ودر نمونه مربوط به دستگاه **SI**۴۰۲۰ زير ۱۰ ميكرون مي باشد. شايان گفتن است كه در قسمتهاي مختلف نمونه هاي ماشينكاري شده با وايركات**SI** ۴۰۲۰ ضخامت لايه هاي تغيير يافته خيلي تغيير مي كرد. طوريكه در بعضي قسمتها برپايه شكل(۱۱), ضخامت اين لايه زير ۲ ميكرون هم مي‌رسيد. اما ضخامت اين لايه ها در نمونه هاي مربوط به وايركات **SI**۲۰۲۰ يكنواخت بود و در نمونه هاي مربوط به وايركات استاندارد، تغييرات در مقايسه با وايركات**SI** ۴۰۲۰ كم بود



شكل۱۰- لايه هاي سطحي تغيير يافته در نمونه ماشينكاري شده با وايركات **SI** ۴۰۲۰ (**x۷۵۰**)



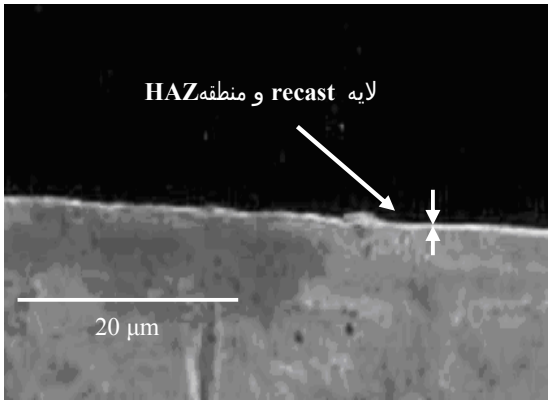
شكل۸- لايه هاي سطحي تغيير يافته در مقطع نمونه ماشينكاري شده با وايركات استاندارد **(x۷۵۰)**



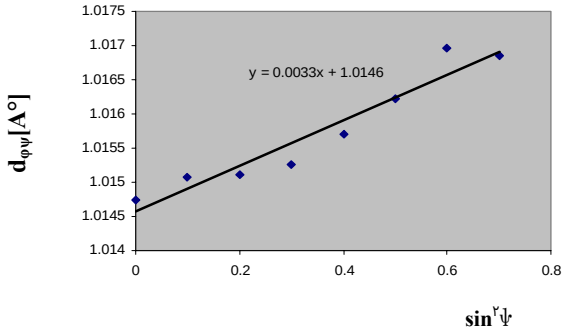
شكل۹- لايه هاي سطحي تغيير يافته در نمونه هاي ماشينكاري شده با وايركات SI۲۰۲۰ (x۷۵۰)

۳-۵- وضعيت تنشهاي پسماند

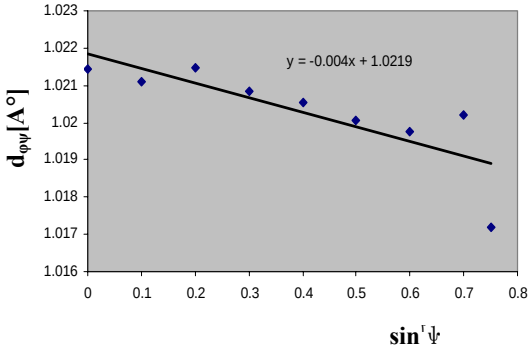
يكي از اثرات ماشينكاري با فرايند Wire EDM بوجودآمدن تنشهاي پسماند كششي در سطح ماشينكاري شده مي‌باشد كه اين تنشها در بوجود آمدن تركهاي ريز و در نتيجه كارايي پره نقش اساسي دارند. با توجه به كوچک بودن نمونه ها و مزاياي روش XRD از اين روش و شيوه $\sin^2\psi$ براي اندازه گيري تنشهاي پسماند نمونه ها استفاده شد(ضمائم). بدين منظور از دستگاه X-Pert ساخت شركت فيليپس هلند و نرم افزار PC-APD ۴ استفاده شد. نمودار $d\varphi\psi\_\sin^2\psi$ براي هر سه نمونه براساس شكلهاي (۱۲)و(۱۳)و(۱۴) رسم شد.



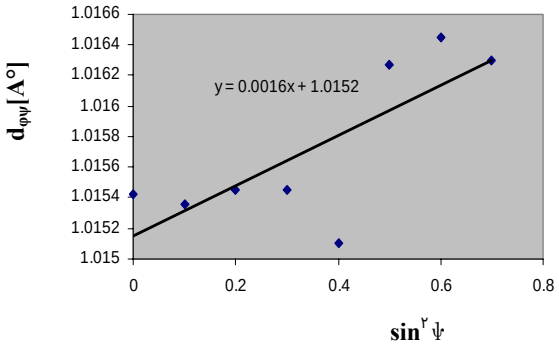
شكل ۱۱- كاهش ضخامت لايه هاي سطحي تغيير يافته در نمونه هاي ماشينكاري شده با وايركات SI۴۰۲۰ (x ۷۵۰)



شكل۱۲- نمودار $d\varphi\psi\_\sin^2\psi$ نمونه وايركات استاندارد



شكل۱۳- نمودار $d\varphi\psi\_\sin^2\psi$ نمونه پره اصلي



شكل۱۴- نمودار $d\varphi\psi\_sin^2\psi$ نمونه وايركات SI

همانطور كه در اين شكلها ديده مي‌شود علامت شيب نمودار $d\varphi\psi\_sin^2\psi$ براي نمونه‌هاي ماشينكاري شده مثبت بوده و براي نمونه پره اصلي منفي مي باشد. بنابراين تنشهاي پسماند در نمونه هاي ماشينكاري شده با وايركات كششي و در نمونه اصلي, فشاري مي‌باشد. با توجه به مقادير مدول الاستيسيته(E) و ضريب پواسون(υ) مربوط به جنس نمونه‌ها (AMS۵۶۴۳) به ترتيب برابر ۲۰۰ GPa و ۰,۳، مقدار تنشهاي پسماند مطابق جدول (۵) بدست آمد. همانطور كه ديده مي‌شود علاوه بر كششي بودن تنشهاي پسماند در نمونه هاي ماشينكاري شده، ميزان تنشها در نمونه ماشينكاري شده با وايركات SI كمتر از وايركات استاندارد مي باشد. بنابراين از لحاظ تنشهاي پسماند وايركاتهاي SI بهتر از وايركات استاندارد مي‌باشد. علت اين كاهش همانطور كه پيشتر اشاره شد, كاهش اثرات حرارتي در نوعSI مي‌باشد.

جدول(۵): نتايج حاصل از اندازه گيري تنشهاي پسماند

مقدار تنش پسماند(MPa)	نمونه
-۳۵۴	نمونه اصلي
۵۰۷	نمونه وايركات استاندارد
۲۴۷	نمونه وايركات **SI**۲۰۲۰

۳-۶- سختي سطح

سختي سطح قطعه كار نقش مهمي در مقاومت به سايش آن و در نتيجه كارايي قطعه دارد، به همين خاطر اندازه گيري سختي در سطوح ماشينكاري شده، ضروري مي‌باشد. با توجه به اينكه سطح ماشينكاري شده با وايركات داراي چاله هاي نامنظم مي‌باشد و نمي‌توان سختي آن را بادقت كافي از سطح ماشينكاري شده اندازه گرفت بهترين روش اندازه گيري سختي از سطح مقطع به فاصله كمتر از ضخامت لايه recast از لبه نمونه مي‌باشد اما با توجه به اينكه ميكروسختي سنج در دسترس فاصله بيش از ۲۰ ميكرون از لبه را مي‌توانست اندازه گيري كند بنابراين به ناچار بايد از سطح ماشينكاري شده سختي اندازه گرفته مي‌شد كه اين اندازه گيري در نمونه هاي مربوط به وايركاتهاي SI بخاطر صافي سطح بهتر، به ميزان قابل قبول بود ولي نمونه مربوط به وايركات استاندارد سنباده زده شد و سپس سختي سطحش اندازه گيري شد. ولي در هر صورت مقادير بدست آمده، دقت بالايي ندارند. سختي سطح ماشينكاري شده نمونه ها با دستگاه ميكروسختي سنج polyvar با اعمال نيروي ۵۰۰ گرم اندازه گيري شد. نتايج حاصل مطابق جدول(۶) مي‌باشد. همانطور كه ديده مي شود سختي سطوح مربوط به وايركاتهاي SI كه سطح ماشينكاري شده بدون سنباده زني مي باشد بزرگتر از سختي قسمت پايه مي باشد كه نشان مي دهد در اثر ماشينكاري با وايركات سختي سطح افزايش مي يابد. و در نمونه مربوط به وايركات استاندارد در اثر سنباده زني لايه هاي تغيير يافته سطحي حذف شده اند در نتيجه مقدار سختي برابر سختي قسمت پايه مي باشد. همچنين سختي سطح نمونه هاي ماشينكاري شده با وايركاتهاي SI بيش از سختي سطح نمونه اصلي مي باشد. بنابراين سطح ماشينكاري شده با وايركاتهاي SI سختي سطح كافي را دارد.

جدول٦- اندازه سختي سطح نمونه ها

سختي(HV)	نمونه
۳۴۰	ماشينكاري شده با واير كات استاندارد
۳۶۷	ماشينكاري شده با وايركات **SI**۲۰۲۰
۳۷۳	ماشينكاري شده با وايركات **SI**۴۰۲۰
۳۶۴	نمونه اصلي
۳۳۹	قسمت پايه

۴- نتايج

در اين مقاله، موارد مختلف مربوط به كيفيت سطح در نمونه‌هاي ماشينكاري شده با سه نوع وايركات (استاندارد، **SI**۲۰۲۰، **SI**۴۰۲۰) بررسي گرديد و نتايج عبارتند از:

۱- زبري سطح حاصل از وايركاتهاي SI به مراتب كمتر از وايركات استاندارد مي‌باشد. اگرچه زبري سطح حاصل از هر دو نوع وايركات، طبق استاندارد مربوط به پره كمپرسور مناسب مي‌باشد. و سطح حاصل از هردو وايركات حاوي چاله ها و حفره ها مي‌باشد كه اندازه انها در وايركاتهاي SI كوچكتر از وايركات استاندارد مي‌باشد.

۲- ضخامت لايه هاي تغيير يافته سطحي در سطح حاصل

از وايركات **SI**۴۰۲۰ حدود ۱۰ ميكرون و در **SI**۲۰۲۰ نزديک ۷ ميكرون است. كه نسبت به وايركات استاندارد (نزديک ۲۰ ميكرون) كمتر مي‌باشد.

۳- لايه recast حاصل از ماشينكاري با وايركاتهاي SI همانند وايركات استاندارد حاوي شبكه هايي از تركهاي ريزمي باشد كه براي استحكام خستگي ريشه پره به شدت آسيب‌رسان مي‌باشند.

۴- آناليز درصد عناصر سطح ماشينكاري شده نمونه ها نشان مي‌دهد كه در حين انجام فرايند، مقداري از مواد الكترود سيمي(مس و روي)، ذوب و در سطح ماشينكاري شده منجمد مي‌شود.

۵- تنشهاي پسماند در سطح ماشينكاري شده با وايركاتها از نوع كششي بوده و اندازه آنها در نمونه هاي مربوط به وايركاتهاي SI كمتر از وايركات استاندارد مي‌باشد و در سطح نمونه اصلي تنشهاي پسماند، فشاري مي‌باشد.

۶- در اثر ماشينكاري با وايركاتها سختي سطح افزايش مي‌يابد و در مقايسه با سختي سطح نمونه اصلي، سختي كافي را دارند.

بنابراين با توجه به نتايج گفته شده و نياز به استحكام خستگي بالا در ريشه پره، براي استفاده از وايركات براي ماشينكاري ريشه پره، در صورت استفاده از اين فرايند, علاوه بر اين فرايند نياز به يک عمليات پاياني مانند سنگزني مي‌باشد.

۵- تقدير و تشكر

از شركت صنايع هواپيمايي ايران، صنايع ساخت قطعات و موتورهاي توربيني بدليل حمايت مالي و فراهم نمودن تجهيزات موردنياز انجام اين طرح, قدرداني مي‌گردد.

۶- ضمائم

پراش اشعه ايكس طبق قانون براگ اين توانايي را دارد كه فضاي بين اتمي ناشي از كرنش ها را كه بوسيله نمونه تحمل مي‌شود اندازه گيري كند. مقادير تنشها با استفاده از اين كرنش هاي الاستيك در كريستالها و ثابتهاي الاستيك مواد بدست مي آيد. در روشXRD و شيوه $\sin^2\Psi$ از رابطه (۱) كه براساس تئوري الاستيسيته، رابطه اي بين تنشهاي پسماند سطحي و فاصله صفحات كريستالي است استفاده مي‌شود[۹].

$$\sigma_{\phi}=\left(\frac{E}{1+\upsilon}\right)\frac{1}{d_{\phi 0}}\left(\frac{\partial d_{\phi\varphi}}{\partial \sin^2\psi}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه(۱)، σ_{φ} تنش مورد اندازه گيري است كه با جهت اصلي زاويه φ مي‌سازد. زاويه ψ كه راستاي سطح نمونه را تعريف مي كند زاويه بين نرمال سطح و خط دونيم كننده پرتو پراش شده است. $d\varphi\psi$ فاصله اندازه گيري شده بين صفحات كريستالي در راستاي تعريف شده با زواياي φ و ψ بوده و E مدول الاستيسيته و υ نسبت پواسون است. در شيوه $\sin^2\Psi$ با توجه به معلوم بودن مقادير E و υ با بدست آوردن مقادير $d\varphi\psi$ براي ψ هاي مختلف بوسيله پراش اشعه x، نمودار خطي $d\varphi\psi\_\sin^2\Psi$ تقريب زده مي شود(شكلهاي ۱۴-۱۲) و با محاسبه شيب آن و جايگذاري در رابطه (۱)، مقدار تنشهاي پسماند محاسبه مي‌شود.[۸،۹]

جدول۱- مقادير پارامترهاي ماشينكاري نمونه ها با وايركات استاندارد

پارامتر / پاس	M	V (v)	P (A)	A (µs)	F (KHz)	Pal (A)	Tac (µs)	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	۰,۱۳۸
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

جدول۲- مقادير پارامترهاي ماشينكاري نمونه ها با وايركاتهايSI

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	۰	۰,۷	۴	۱	۱,۴

جدول ٤- درصد عناصر در سطح نمونه ها

عناصر	Mn	Si	Mo	Nb	Cr	Ni	Cu	Zn	Fe
پايه	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

۷ - مراجع

[۱] L.C. Lim, L.C. Lee, Y.S. Wong, H.H. Lu, Mater. Sci. Technol. 7(1991) 239.

[۲] Ahmet Hascalyk, Ulas Caydas, “experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel”, J.Mater.Process. technol 148 (2004) 362-367

[۳] J.C. Rebelo, A. Morao Dias, D. Kremer, J.L. Lebrun, J. Mater.Process. Technol. 84 (1–3) (1998) 90.

[۴] F.Ghanem,C.Braham, H.Sidhom," influence of steel type on electrical disch- arge machined surface integrity”, J.Mater.Process. technol 142 (2003) 163-173

[۵] L.Velterop, “influence of wire electrical discharge machining on the fatigue properties of high strength stainless steel”, NLR-TP-2003-104

[۶] 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

[۷] R.K.Jain, "engineering metrology", 3nd Edition, Romesh chander khanna, 2002

[۸] 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

[۹] Paul S. Prevey,” X-Ray diffraction residual stress techniques”, Metals Handbook, 10, Metals Park, 1986, pp. 380-392.

۸ - زير نويس

۱ :surface integrity

۲ : heat affected zone