



## بررسی اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد کربنی در فرآیند سوراخ کاری اصطکاکی

مقصود شلودی<sup>1\*</sup>، علی آقایی<sup>2</sup>

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 5166615471، mshalvandi@tabrizu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

فرآیند سوراخ کاری اصطکاکی یک فرآیند جدید برای تولید سوراخ‌های استوانه‌ای است و در این فرآیند از یک ابزار مخروطی با جنس کاربید تنگستن استفاده می‌گردد و پس از سوراخ کاری، یک بوش نیز همراه با سوراخ در پشت قطعه ایجاد می‌شود. از مزایای این فرآیند جدید می‌توان به کاهش زمان سوراخ کاری و عدم تولید براده اشاره کرد. در این مقاله، فرآیند سوراخ کاری اصطکاکی با تلفیق ارتعاشات اولتراسونیک انجام شده است. برای انجام فرآیند فوق، یک هورن اولتراسونیک مناسب طراحی شد و همچنین ابزار مخروطی شکل از جنس کاربید تنگستن با زوایای بهینه برای سوراخ کاری استفاده گردید و جنس قطعه کار انتخاب شده فولاد St37 بوده است. برای بررسی اثرات ارتعاشات اولتراسونیک در فرآیند سوراخ کاری اصطکاکی، از آزمون‌های میکرو سختی، آزمون صافی سطح، آزمون خوردگی، و تصاویر میکروسکوپ نوری و تصاویر SEM استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که، تلفیق ارتعاشات اولتراسونیک با فرآیند سوراخ کاری اصطکاکی سبب بالا رفتن مقدار میکرو سختی به مقدار متوسط 13 درصد در سرعت‌های دورانی و شدت‌های ارتعاشاتی معینی می‌گردد. همچنین مقاومت به خوردگی قطعه کار در حالتی که ارتعاشاتی با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$  اعمال شد، به مقدار 57 درصد بیشتر شد. با توجه به تصاویر میکروسکوپی مشاهده شد که اندازه دانه و مقدار مک‌های قطعه کار در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک کاهش می‌یابد که این اثر به صورت کیفی و مقایسه‌ای بیان شده است.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 22 فروردین 1400  
داوری اولیه: 31 اردیبهشت 1400  
پذیرش: 16 تیر 1400

### کلیدواژه‌ها:

سوراخ کاری اصطکاکی  
ماشین کاری  
ارتعاشات اولتراسونیک  
مقاومت به خوردگی

## Investigation of the effect of ultrasonic vibration on the microstructure and mechanical properties of carbon steel in friction drilling process

Maghsoud Shalvandi<sup>\*</sup>, Ali Aghaei

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

\* P.O.B 5166616471 Tabriz, Iran, mshalvandi@tabrizu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 11 April 2021  
First Decision: 21 May 2021  
Accepted: 7 July 2021

### Keywords:

Friction drilling  
Machining  
Ultrasonic vibration  
Corrosion resistance

### Abstract

The friction drilling process is a new process for producing cylindrical holes. In this process, a conical tool made of tungsten carbide is used and a bush is created along with a hole in the back of the part after drilling. The advantages of this new process include reducing drilling time and no chip production. In this paper, the friction drilling process is performed by combining ultrasonic vibrations. To perform the above process, a suitable ultrasonic horn was designed and made also a conical tool made of tungsten carbide with optimal angles was used for drilling. St37 steel material type was selected for workpiece. To investigate the effects of ultrasonic vibrations on the friction drilling process, micro-hardness tests, surface roughness test, corrosion test, and metallographic imaging (light microscope images and SEM images) were used. The results of this study indicated that the ultrasonic vibrations assisted friction drilling process increases the micro-hardness about 13 percent at special rotational speeds and vibrations intensities. Also, the corrosion resistance of the workpiece increased by about 57 percent in the case of applying vibrations of  $96 \text{ W/cm}^2$  intensity. According to the metallographic imaging, it was observed that the grain size and the amount of cavities of the workpiece are reduced due to the application of ultrasonic vibrations and these results is expressed qualitatively and comparatively.

### 1- مقدمه

اصطکاک حرارتی سوراخ را ایجاد می‌کند. حرارت تولید شده در محل اتصال مابین قطعه کار و ابزار مخروطی (دوار با سرعت دوران بالا) باعث نرمی، تغییر شکل و جابجایی مواد قطعه کار می‌شود. در نتیجه سبب ایجاد یک بوش با طول سه برابر بزرگ‌تر از ضخامت قطعه کار می‌شود.

در فرآیند سوراخ کاری اصطکاکی که یکی از فرآیندهای جدید تولید سوراخ به همراه بوش اختصاصی است، از یک ابزار مخروطی که عموماً از جنس کاربید تنگستن است استفاده می‌شود. این فرآیند بدون براده برداری بوده و با تکیه بر اصل

Please cite this article using:

M. Shalvandi, A. Aghaei, Investigation of the effect of ultrasonic vibration on the microstructure and mechanical properties of carbon steel in friction drilling process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 7, pp. 1- 9, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

همین‌طور تأثیرات مهم ارتعاشات اولتراسونیک در راندمان سوراخ‌کاری، در این پژوهش به بررسی اثرات متالورژیکی و تأثیر بر روی مقاومت به خوردگی پرداخته شده است.

## 2- روش تحقیق

ماده مورد استفاده در این پژوهش، فولاد کم کربن St37 با ضخامت 2 mm است. ترکیب شیمیایی ورق St37 در جدول 1 نشان داده شده است.

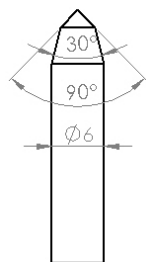
ورق مذکور تحت عملیات حرارتی آنیلینگ<sup>1</sup> قرار گرفته است. عملیات تابکاری تأثیرات عملیات نورد و عملیات دیگر انجام یافته بر روی ورق را از بین برده و تنش‌های پسماند اولیه را به حداقل مقدار ممکن می‌رساند. به همین منظور ورق‌ها به مدت 35 دقیقه تا دمای 680°C در کوره قرار داده شده سپس منبع حرارتی خاموش گشته و ورق‌ها تا رسیدن به دمای محیط، در داخل کوره ماندند.

در فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی از یک ابزار مخروطی استفاده می‌گردد. که مشخصات آن در شکل 1 آمده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق St37 به دست آمده از کوانتومتری.

Table 1 Chemical composition of St37 given by SES test

عناصر	مقادیر موجود (%)
کربن (C)	0/048
سیلیسیم (Si)	0/098
منگنز (Mn)	0/460
فسفر (P)	0/024
گوگرد (S)	0/012
کروم (Cr)	0/049
مولیبدن (Mo)	0/001
مس (Cu)	0/059
نیکل (Ni)	0/027
تنگستن (W)	0/014
آهن (Fe)	99/1



شکل 1 تصویر شماتیکی از ابزار مورد استفاده

Fig. 1 Schematic of tool used in the experiential tests

فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی به دلیل کاهش زمان ماشین‌کاری (زمان انجام فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی در حدود 3 ثانیه می‌باشد) و ایجاد بوش پیوسته با ورق که در امتداد حرکت ابزار و در پشت قطعه ایجاد می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا نیازی به جوش مهره بر روی ورق نبوده و می‌توان بوش ایجاد شده را رزوه نمود همچنین در فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی سایش ابزار کمتری وجود دارد و صافی سطح بالایی نیز به دست می‌آید [1].

از دیگر مزایای این روش کاهش آلودگی (عدم استفاده از مواد خنک کار مانند آب صابون و روغن و ...)، افزایش عمر ابزار در مقایسه با سوراخ‌کاری معمولی و عدم تولید براده ... را می‌توان نام برد. از محدودیت‌های این روش استفاده از آن در سوراخ‌های راه بدر می‌باشد. البته از نظر ضخامت قطعه ی مورد نظر محدودیت‌هایی نیز موجود می‌باشد.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که اضافه شدن ارتعاشات اولتراسونیک تأثیرات مثبتی بر روی فرآیند سوراخ‌کاری می‌گذارد. سیمون و همکاران به این نتیجه رسیدند که کاهش نیروی محوری با اضافه کردن ارتعاشات اولتراسونیک به سوراخ‌کاری میسر می‌گردد. مقدار حرارت ایجاد شده در فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی از اهمیت بالایی برخوردار است که اضافه شدن ارتعاشات اولتراسونیک سبب افزایش مقدار درجه حرارت فرآیند سوراخ‌کاری می‌گردد [2].

این افزایش دما سبب تبلور مجدد دوباره ساختار دانه و سبب افزایش میکرو سختی نیز می‌گردد [3]. همچنین این تلفیق، سبب انتقال تنگستن و کبالت از ابزار به سطح قطعه می‌شود [4].

در تحقیقی مشابه لطیف از لر و همکاران [5] نشان دادند سرعت‌های برشی مختلف سبب سرعت‌های سرد کردن مختلفی بین لایه‌های مواد پس از انجام فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی می‌شود. همین‌طور تغییر شکل سریع‌تر باعث سخت شدن تغییر شکل در قطعه کار می‌شود. (در دمای پایین سبب اکستروژن شدن مواد می‌گردد) بنابراین، طول اکستروژن کاهش یافته و گلبرگ‌های بیشتری تشکیل می‌شوند.

به‌طور کلی تلفیق ارتعاشات اولتراسونیک با انواع روش‌های ماشین‌کاری مکانیکی سبب بهبود فرآیند و نتایج به دست آمده می‌گردد. به همین دلیل در این پژوهش به بررسی تلفیق فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی با ارتعاشات اولتراسونیک پرداخته شده است.

به دلیل اهمیت سوراخ‌کاری اصطکاکی در صنایع مختلف و

<sup>1</sup> Annealing

جدول 2 جدول طراحی آزمایش‌ها (با مقدار پیشروی ثابت 0/07 mm/rev)

ترتیب اجرا	شدت ارتعاشات با اعمال ولتاژ V	سرعت دوران N	دامنه ارتعاشات (فرکانس)
1	-	2800	-
2	-	1800	-
3	-	2240	-
4	250	1800	18945
5	150	1800	19241
6	200	1800	18945
7	150	2240	18988
8	200	2240	19148
9	250	2240	18945
10	300	2240	18945
11	300	2800	18945
12	200	2800	18945
13	300	2800	18945
14	250	2800	18945
15	150	2800	18945

برای انجام فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی به همراه ارتعاشات اولتراسونیک از یک دستگاه فرز FNK 25 ساخت شرکت Tos Kurim Finesa استفاده شد.

مجموعه فیکسچر ساخته‌شده توسط دو روبنده و پیچ تی‌شکل بر روی میز دستگاه فرز ثابت شد. سپس هورن اولتراسونیک طراحی‌شده با پیچ  $M12 \times 1.25$  به ترانسدیوسر متصل گردید. پس از اتصال ترانسدیوسر به منبع تغذیه، ارتعاشات ایجادشده به قطعه‌کار منتقل شد.

برای بررسی تغییرات متالوگرافی از دستگاه میکروسکوپ نوری Olympus CK40M و دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN MIRA3 FEG-SEM استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری زبری سطح از دستگاه Maher مدل Perthometer M2 استفاده شده است.

اندازه‌گیری مقادیر میکرو سختی توسط دستگاه میکرو سختی سنج ساخت شرکت Pace Technologies، مدل HV-1000Z انجام شد که با اعمال بار 0/5 نیوتن و مدت زمان اعمال بار 15 ثانیه‌ای انجام شد و نوک اعمال نیروی دستگاه سختی سنجی در شکل 2 آورده شده است.

در این تحقیق، آزمایش‌های طراحی‌شده به صورت عملی کلی با تعداد 15 آزمایش انجام شده است که در جدول 2 آمده است. به‌طورکلی سه سرعت دوران و سه شدت ارتعاشات اولتراسونیک برای انجام فرآیند بر روی یک جنس قطعه انتخاب شده استفاده شده است.

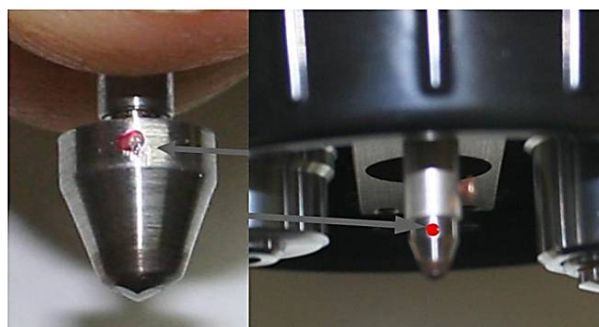
### 2-1- ساخت مجموعه فیکسچر

به‌منظور تثبیت موقعیت نمونه‌ها و اعمال ارتعاشات اولتراسونیک حین انجام فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی، یک مجموعه فیکسچر طراحی و ساخته شد. شکل 3 تصویری از مجموعه ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل 3 تصویر مجموعه‌ی پایه‌ی نگهدارنده به همراه هورن و ترانسدیوسر  
Fig. 3 Experimental setup with horn and transducer

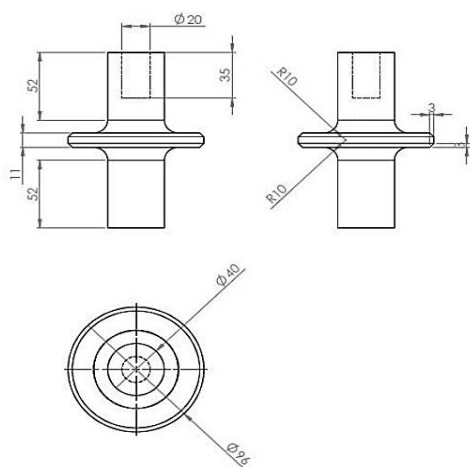
مجموعه فیکسچر با توجه به شکل هورن<sup>1</sup>، نحوه تثبیت نمونه بر روی آن و با در نظر گرفتن میزان انتقال ارتعاشات به قطعه‌کار به‌صورت مناسب طراحی و ساخته شده است. در بدنه این مجموعه، از ورق فلزی St37 (فولاد ساختمانی) که به‌وفور در بازار یافت می‌شود استفاده شده است و از برش CNC برای برش قسمت‌های مختلف مجموعه استفاده شد. قسمت‌های مختلف فیکسچر با روش جوشکاری قوس الکتریکی به هم اتصال داده شدند. با به کارگیری ورق‌های ضخیم، پایداری سازه فیکسچر در



شکل 2 شکل ضربه زننده دستگاه سختی سنجی  
Fig. 2 Hardness tester indenter

<sup>1</sup> Horn

باعث پارگی در لبه‌های سوراخ و به تبع آن گلب‌رگ‌های بزرگ‌تر در بوش می‌گردد.



شکل 4 هورن اولتراسونیک طراحی شده

Fig. 4 Ultrasonic horn designed in this research

جدول 3 مقادیر طول بوش به دست آمده در پارامترهای ورودی مختلف

Table 3 Length of bush produced by different input parameters

ردیف	سرعت دورانی ابزار (rpm)	شدت ارتعاشات اولتراسونیک اعمالی (W/cm <sup>2</sup> )	طول بوش (mm)
1	1800	-	7/92
2	2240	-	8/2
3	2800	-	8/14
4	1800	48	7/98
5	2240	48	7/82
6	2800	48	7/95
7	1800	64	8/05
8	2240	64	7/95
9	2800	64	7/85
10	1800	80	8/5
11	2240	80	7/82
12	2800	80	7/64
13	1800	96	7/53
14	2240	96	8/05
15	2800	96	7/9

بوش‌های ایجاد شده بدون حضور ارتعاشات اولتراسونیک و همچنین با حضور ارتعاشاتی با شدت  $48 \text{ W/cm}^2$  و  $64 \text{ W/cm}^2$  ، گلب‌رگ‌هایی با اندازه عمق یکنواخت دارند. این درحالی است که بوش‌های ایجاد شده در حضور ارتعاشاتی با شدت  $80 \text{ W/cm}^2$  و  $96 \text{ W/cm}^2$  ، گلب‌رگ‌هایی نسبتاً عمیق دارند که عدم یکنواختی در شکل بوش و گلب‌رگ‌ها نیز به چشم می‌خورد و علت این امر را می‌توان به انرژی زیاد اعمال شده به ناحیه سوراخ‌کاری نسبت

برابر گشتاور و نیروی محوری فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی میسر شد. قابل ذکر است که قسمت‌هایی از مجموعه فیکسچر که با نمونه در تماس بود با دستگاه فرز صاف گردید و نمونه توسط شش عدد پیچ M5 بر روی مجموعه فیکسچر ثابت شد تا تحمل نیروی محوری و گشتاور مقدور گردد. هورن اولتراسونیک با دو عدد پیچ در مجموعه فیکسچر مستقر شده که امکان تغییر موقعیت در سه حالت مختلف با فواصل مشخص به منظور انجام عملیات سوراخ‌کاری اصطکاکی ارتعاشی در مجموعه را دارد. در کف پایه‌ی فیکسچر سوراخی به منظور استفاده از پیچ تی-شکل برای ثابت کردن مجموعه در حین فرآیند ایجاد شده است. از روینده نیز در دو جهت برای محدود کردن کامل تمامی جهات آزادی حرکت فیکسچر استفاده شده است.

## 2-2- طراحی و ساخت هورن

به منظور انتقال صحیح ارتعاشات اولتراسونیک به قطعه کار، هورن اولتراسونیک مورد استفاده باید دارای طراحی خاصی باشد و فرکانس طبیعی هورن بایستی منطبق بر فرکانس ارسالی ترنسدیوسر باشد تا منجر به رزونانس شود. پس از تعیین شکل اولیه هورن، شبیه‌سازی آنالیز مودال هورن در نرم افزار آباکوس انجام شد. با توجه به نتایج شبیه سازی، فرکانس طبیعی هورن در مد طولی 20000 هرتز به دست آمد که ابعاد نهایی به دست آمده در شکل 4 نشان داده شده است.

## 3- نتایج و بحث

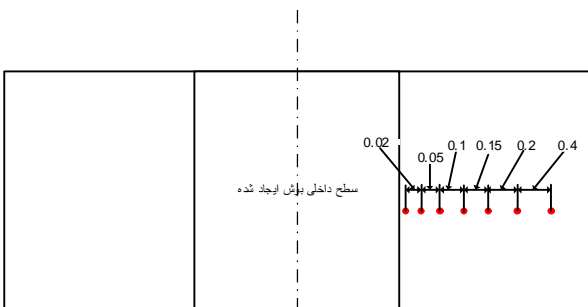
### 3-1- بررسی شکل و طول بوش

در این تحقیق، طول و شکل بوش ایجاد شده از نظر پارامترهایی مانند وجود و یا عدم وجود ارتعاشات و سرعت سوراخ‌کاری تأثیرپذیر است زیرا تغییر سرعت سوراخ‌کاری سبب سرعت‌های سرد کردن مختلفی بین لایه‌های مواد می‌گردد، بنابراین لایه‌های خارجی در مقایسه با لایه‌های درونی سریع‌تر خنک می‌شوند. پس هر دو پارامتر تأثیر بسزایی بر روی هندسه بوش دارند. طول بوش در حالت بدون ارتعاش و با سرعت دورانی میانگین ابزار، هم از نظر طول و هم از نظر شکل متقارن است.

جدول 3 طول بوش‌های به دست آمده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد که می‌توان گفت که اضافه شدن ارتعاشات تأثیر مثبتی بر روی طول بوش‌ها نداشته است.

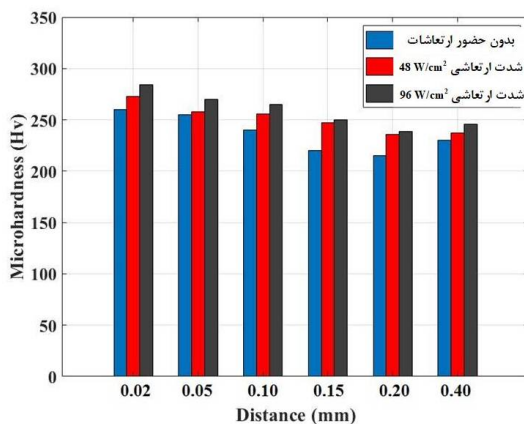
از نظر شکل بوش نیز در اکثر حالات گلب‌رگی شدن یکنواخت و قابل قبولی به دست آمد. البته قابل ذکر است که عموماً در فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی، نیروی شعاعی بیشتر

با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$  انجام شده است. البته همچنین پارامترهای ورودی ذکر شده تا فاصله  $0/1 \text{ mm}$  مقادیر میکرو سختی بالایی را از خود نشان داده‌اند اما فقط سوراخ‌کاری‌های اصطکاکی ارتعاشی با شدت ارتعاش  $96 \text{ W/cm}^2$  با سرعت دورانی ابزار  $2240 \text{ rpm}$  در بین تمامی نقاط و بافاصله‌های مختلف از سطح، دارای بیشترین سختی است. افزایش مقدار میکرو سختی در نمونه‌های سوراخ‌کاری شده با حضور ارتعاشات اولتراسونیک را می‌توان به دو عامل درصد کربن و فازهای موجود در نمونه‌ها مرتبط دانست در مورد درصد کربن باوجود اینکه آزمون EDAX (شکل 8) و کوانتومتری نمونه‌ها پس از عملیات سوراخ‌کاری مؤید افزایش جزئی درصد کربن است اما به دلیل خطاهای موجود در روش EDAX و کوانتومتری نمی‌توان با قطعیت در این مورد نظر داد (علی‌رغم اینکه در عکس‌های متالوگرافی مقدار پرلیت نمونه‌ها نیز افزایش داشته است) ولی در مورد فازهای موجود در بخش بعدی توضیحاتی داده خواهد شد.



شکل 6 جهت و فواصل مورد اندازه‌گیری میکروسختی

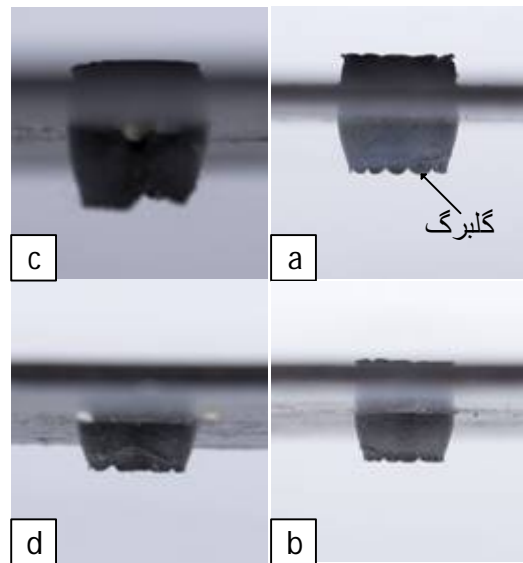
Fig. 6 Direction and distance of points selected for hardness measuring.



شکل 7 مقادیر میکرو سختی نمونه‌های سوراخ‌کاری اصطکاکی شده در سرعت دورانی  $2240 \text{ rpm}$  ابزار

Fig. 7 Micro harness of specimens after frictional drilling with rotational speed of  $2240 \text{ rpm}$ .

داد. تصاویر شکل بوش‌های ایجاد شده با فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی در شکل 5 به نمایش درآمده است.



شکل 5 تصاویر شکل بوش‌های ایجاد شده با فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی در سرعت دورانی ابزار  $2800 \text{ rpm}$  و با شرایط (a) بدون ارتعاشات اولتراسونیک (b) با ارتعاشات اولتراسونیک با شدت  $64 \text{ W/cm}^2$  (c) با ارتعاشات اولتراسونیک با شدت  $80 \text{ W/cm}^2$  (d) با ارتعاشات اولتراسونیک با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$ .

Fig. 5 Shape of bushes produced in frictional drilling with too rotational of  $2800 \text{ rpm}$  a)-without ultrasonic vibration. b)-ultrasonic intensity of  $64 \text{ W/cm}^2$ . c)- ultrasonic intensity of  $80 \text{ W/cm}^2$  d)-ultrasonic intensity of  $96 \text{ W/cm}^2$ .

### 3-2- بررسی مقادیر میکرو سختی

آزمون میکرو سختی به منظور اندازه‌گیری میزان سختی در نواحی که عملیات سوراخ‌کاری اصطکاکی همراه با ارتعاشات اولتراسونیک بر روی نمونه‌ها تأثیر داشته، در قسمت بوش‌ها انجام گرفته است.

میکرو سختی در هر قطعه از پنج نقطه با فواصل مشخص از نزدیک‌ترین محل به بوش به طرف داخل قطعه مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. فواصل محل اندازه‌گیری فرورونده<sup>1</sup> به ترتیب دارای مقادیر  $0/02$ ،  $0/05$ ،  $0/1$ ،  $0/15$ ،  $0/2$ ،  $0/4$  میلی‌متر است (شکل 6).

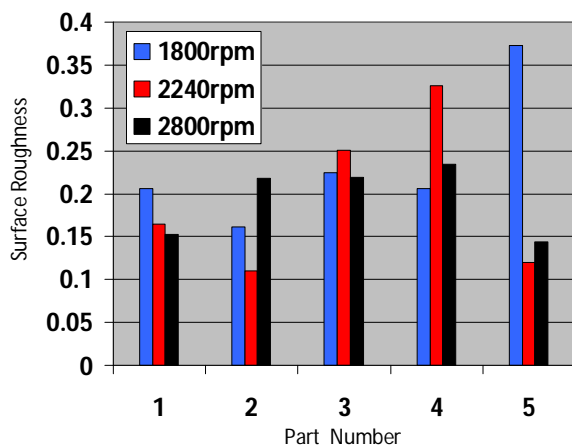
بیشترین مقدار میکرو سختی در نزدیک‌ترین محل به بوش دیده می‌شود و بافاصله گرفتن از بوش مقدار سختی کمتر می‌شود. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، در فاصله  $0/02 \text{ mm}$  تأثیر شدت ارتعاشات اعمالی کاملاً مشهود بوده و بیشترین مقدار سختی در حالتی است که سرعت دورانی ابزار  $2240 \text{ rpm}$  بوده و سوراخ‌کاری در حضور ارتعاشات اولتراسونیک

<sup>1</sup> Indent

### 3-4- بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری

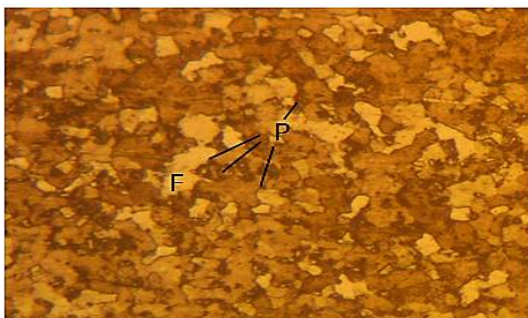
بعد از برش قسمتی که عملیات سوراخ کاری اصطکاکی بر روی آن انجام شده است. برای آماده سازی نمونه ها از سمباده کاغذی و نمد جهت صیقل کردن و پلیش سطح استفاده می گردد که در نتیجه آن سطحی صاف و آینه ای بدست می آید. که در زیر میکروسکوپ چیزی مشخص نیست بدین جهت نمونه ها تحت عملیات حکاکی<sup>1</sup> قرار می گیرند.

با توجه به تصاویر به دست آمده (شکل 10)، ساختار قطعه کار متشکل از فریت و پرلیت است. نسبت فریت به پرلیت در حدود یک به ده است. ولی پس از اعمال ارتعاشات. مقدار پرلیت ایجاد شده نسبتاً افزایش یافته است.



شکل 9 مقادیر زبری سطح نمونه های سوراخ کاری اصطکاکی شده در سرعت های دورانی 1800rpm، 2240rpm و 2800rpm ابزار

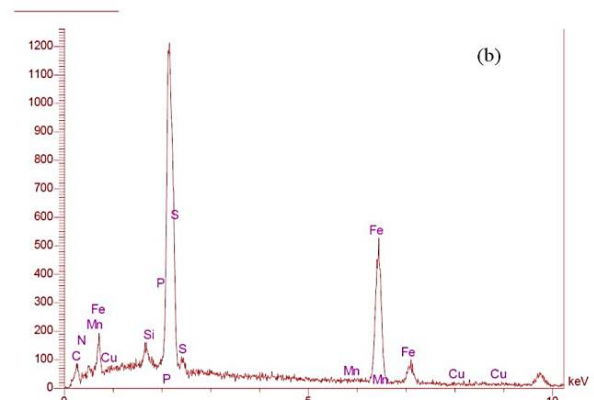
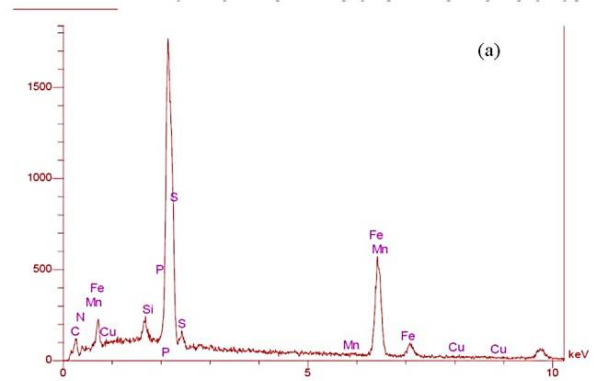
Fig. 9 Surface roughness of specimens after frictional drilling with tool speed of 1800, 2240 and 2800 rpm.



شکل 10 ذرات فریت و پرلیت ایجاد شده پس از فرآیند سوراخ کاری اصطکاکی  
Fig. 10 Ferrite and pearlite in the microstructure after frictional drilling

در حالت سوراخ کاری اصطکاکی با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک، بر اساس آزمون EDAX، مقداری درصد کربن افزایش یافته و این افزایش می تواند مبنا و دلیلی برای افزایش سختی و استحکام کششی باشد [6] اما چون آزمون EDAX

<sup>1</sup> Etching



شکل 8 نتایج آزمون EDAX برای حالت بدون اعمال ارتعاشات اولتراسونیک و با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک

Fig. 8 EDAX results for specimens drilled with and without ultrasonic vibrations.

### 3-3- بررسی مقادیر زبری سنجی

زبری سطح در نمونه های سوراخ کاری شده با روش اصطکاکی ارتعاشی، تابع عواملی مانند سرعت برشی، سرعت پیشروی و شدت ارتعاشات اعمالی است که از داخل سوراخ و در جهت حرکت ابزار مورد اندازه گیری قرار گرفته است. با توجه به اندازه گیری مقادیر زبری سطح که در شکل 9 نشان داده شده است، بیشترین زبری سطح در حالتی که سرعت دورانی ابزار 2240rpm و شدت ارتعاشات اعمالی برابر با  $96W/cm^2$  است، به دست آمده است و مقدار میانگین ارتفاعات زبری سطح به دست آمده در این حالت برابر با  $0/12$  میکرون بوده است که نسبت به مقدار  $0/2$  میکرون نمونه اولیه، زبری سطح به مقدار 40 درصد کاهش یافته است اما به دلیل تغییر در مقادیر زبری سطح در شدت های ارتعاشاتی مختلف و همچنین بازه تغییر که  $0/01$  میکرون است و در این بازه نمی توان به دقت دستگاه زبری سنج اکتفا کرد، بنابراین نمی توان بیان کرد که با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک، زبری سطح داخل بوش سوراخ کاری شده افزایش یا کاهش می یابد.



بنابراین می‌توان بیان کرد که ارتعاشات اولتراسونیک تأثیر مثبتی بر ریزساختار قطعه گذاشته است. متوسط مقدار اندازه دانه با اضافه شدن ارتعاشات کاهش یافته است و در بیشترین ولتاژ حداقل اندازه متوسط دانه مشاهده گردید.

همه تصاویر توسط میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی  $200\times$  و ناحیه نزدیک به محل ایجاد بوش گرفته شده است. با وجود در نظر گرفتن تدابیر لازم برای جلوگیری از اکسید شدن قطعه در طی فرآیند آماده‌سازی و حتی مراحل بعد آن، بازهم مقداری اکسید در سطح رویت گردید.

### 3-5- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

بعد از انجام عملیات سوراخ‌کاری اصطکاکی همراه با ارتعاشات اولتراسونیک سه عدد از نمونه‌ها شامل نمونه بدون ارتعاش و نمونه‌های با شدت ارتعاشات اعمالی  $48 \text{ W/cm}^2$  و  $96 \text{ W/cm}^2$  در سرعت دورانی ابزار  $2240 \text{ rpm}$  برای بررسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی انتخاب شدند و بعد از انجام عملیات آماده‌سازی نمونه‌ها که شامل سمباده‌کاری، پولیش‌زنی و روکش‌دهی طلا می‌باشد، با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل 12 مشخص شده است، در نمونه سوراخ‌کاری شده بدون اعمال ارتعاش اولتراسونیک، مک‌های ریزی در قطعه مشاهده می‌گردد (نقاط مشخص شده با فلش مشکی) که با افزودن ارتعاشات اولتراسونیک با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$  مک‌های موجود کاهش یافته و در مواردی حذف شده‌اند. دلیل این امر را شاید بتوان به این صورت تبیین کرد که ارتعاشات اولتراسونیک به دلیل افزایش انرژی داخلی مذاب و حرکت قطعه در حالت خمیری سبب بهبود شرایط در مذاب رسانی شده و این امر در جبران تخلخل‌های انقباضی خود را نشان داده است.

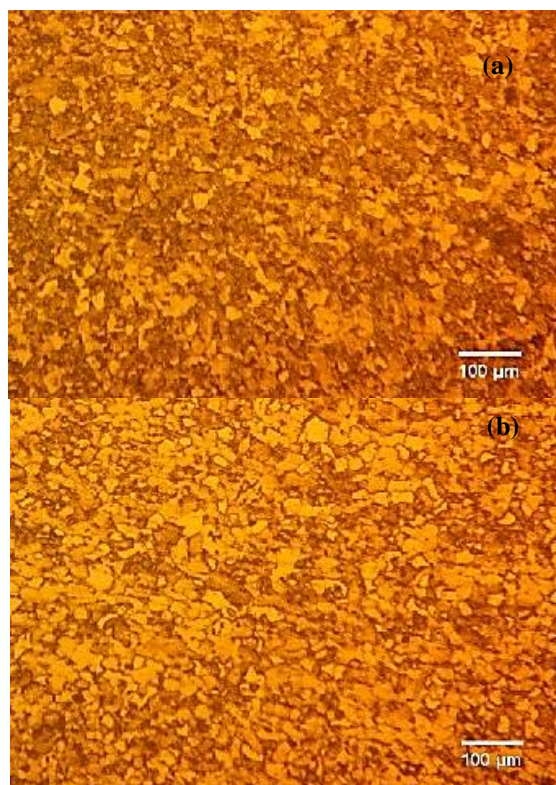
با توجه به شکل 13، در قسمت انتهایی بوش با افزایش میزان شدت ارتعاشات اعمالی به  $96 \text{ W/cm}^2$  ذرات کاربید تنگستن پخش شده در سطح قابل مشاهده است که تحقیقات مکمل نیز گواه این ادعا هستند [8].

این حالت به دلیل خارج نشدن حرارت در قسمت انتهایی بوش و بالا بودن میزان تغییر شکل در طی فرآیند است. پس می‌توان نتیجه گرفت با افزایش حرارت، قسمتی از ابزار جدا شده و در سطح قطعه کار نفوذ کرده است و به دلیل بالا بودن میزان سختی ذرات تنگستن، وجود این ذرات سبب افزایش سختی سطح گردیده که در بخش نتایج سختی سنجی مشاهده شد.

برای تخمین درصد عناصر در رنج‌های پایین از دقت خوبی برخوردار نیست نمی‌توان در این مورد با قطعیت نظر داد.

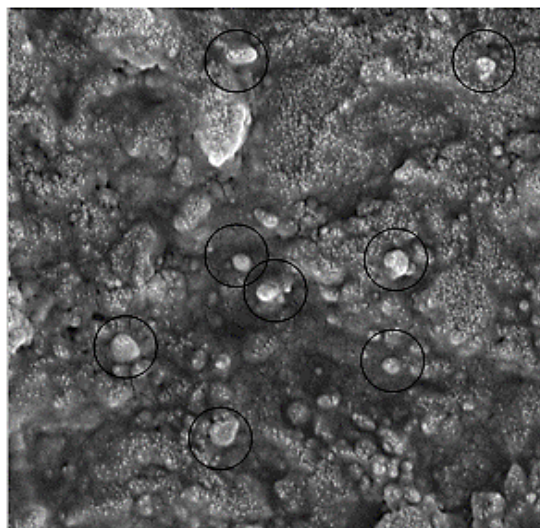
بر اساس تحقیقات گذشته، مناطقی از شبکه فلزی که نایبایی وجود دارد میرایی ارتعاش بیشتری رخ می‌دهد و این انرژی در مرز دانه‌ها پخش می‌شود و زمانی که حرارت فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی اضافه گردد، سبب پخش شدن نایبایی‌ها می‌شود که محلی برای شروع جوانه‌زنی در ساختار می‌باشند [7]؛ بنابراین افزودن ارتعاشات اولتراسونیک می‌تواند به دلیل افزایش انرژی داخلی مذاب، سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی گردد.

بر اساس نتایج شکل 11 و با اندازه‌گیری توسط نرم‌افزار متالوگرافی، به‌طور کلی متوسط اندازه دانه در دو حالت بدون اعمال ارتعاش و با اعمال ارتعاش (با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$ ) در حدود 35 درصد تفاوت دارد به صورتی که اندازه دانه در حالت بدون اعمال ارتعاش حدوداً برابر با 30 میکرون بوده و با اعمال ارتعاشاتی با شدت  $48 \text{ W/cm}^2$  به  $29/3$  میکرون و با اعمال ارتعاشاتی با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$  به مقدار  $19/5$  میکرون، کاهش یافته است.



شکل 11 سطح قطعه بعد از انجام فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی با سرعت دورانی  $2240 \text{ rpm}$ . a) در حالت بدون اعمال ارتعاش b) با اعمال ارتعاشاتی با شدت  $48 \text{ W/cm}^2$

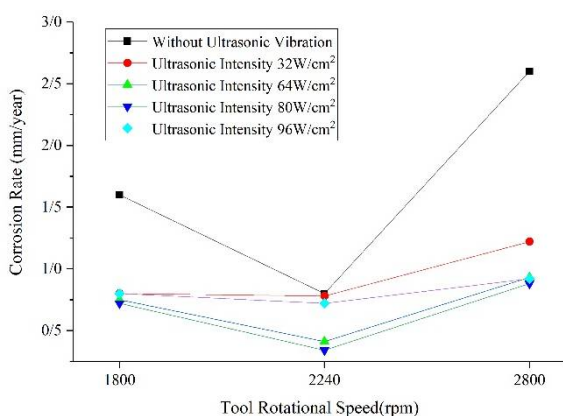
**Fig. 11** Specimen micro structure frictional drilling with rotational speed of  $2240 \text{ rpm}$ . a)- without ultrasonic vibration. b)- with vibration intensity of  $48 \text{ W/cm}^2$



شکل 13 ذرات کاربید تنگستن با بزرگنمایی 10Kx در نمونه سوراخ کاری شده با سرعت دورانی ابزار 2240rpm و با اعمال ارتعاشاتی با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$

**Fig. 13** Tungsten Carbide particles in specimens frictionally drilled with 2240 rpm with vibration intensity of  $96 \text{ W/cm}^2$

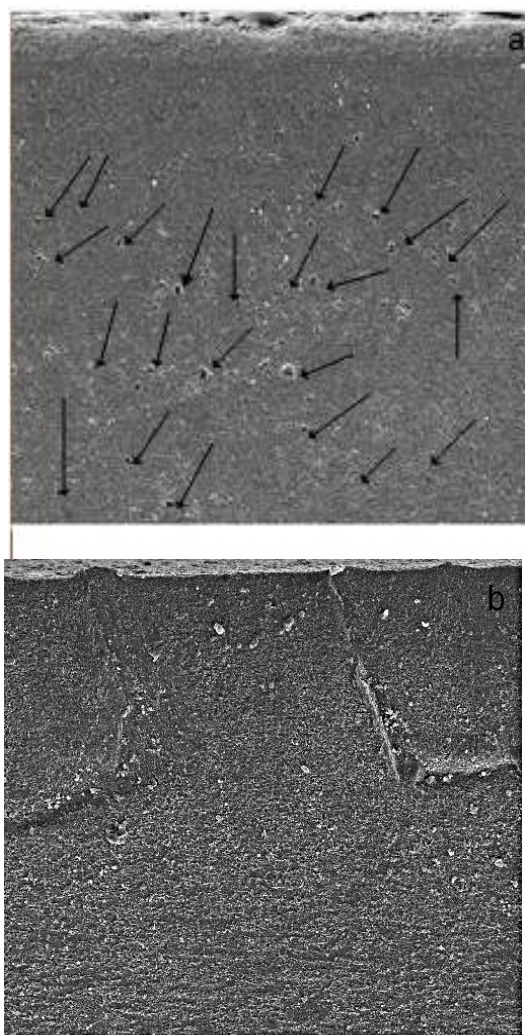
اضافه شدن ارتعاشات اولتراسونیک سبب کاهش مقدار میانگین خوردگی در قطعات گردید. شکل 14 مقادیر خوردگی در نمونه سوراخ کاری شده بدون اعمال ارتعاشات اولتراسونیک و همچنین در نمونه‌های با اعمال ارتعاشات با شدت‌های مختلف را نشان می‌دهد و همان‌گونه که مشخص است در همه موارد، اعمال ارتعاشات اولتراسونیک سبب افزایش مقاومت خوردگی شده و به عبارتی نرخ خوردگی کاهش یافته است.



شکل 14 بیشترین کاهش نرخ خوردگی با اعمال ارتعاشاتی با شدت  $80 \text{ W/cm}^2$

**Fig. 14** Maximum reduction of corrosion rate in specimens with vibration intensity of  $96 \text{ W/cm}^2$

همان‌طور که در شکل 14، مشخص است بیشترین کاهش نرخ خوردگی زمانی اتفاق افتاده است که سرعت دورانی ابزار  $2240 \text{ rpm}$  و مقدار شدت ارتعاشات اعمالی برابر با  $80 \text{ W/cm}^2$



شکل 12 نتایج حاصل از عکس‌های SEM در نمونه‌هایی با سرعت دورانی ابزار  $2240 \text{ rpm}$  (a) بدون اعمال ارتعاش با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$  (b) با اعمال ارتعاش با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$

**Fig. 12** SEM results of specimens after drilling with 2240 rpm tool speed. a)- without ultrasonic vibration. b)- with vibration intensity of  $96 \text{ W/cm}^2$

### 3-6- بررسی نتایج آزمون خوردگی

آزمون خوردگی انجام‌یافته از نوع الکترولیت بوده و شبیه‌ساز خوردگی در محیط دریا است (محیط خورنده حاوی 3/5% نمک محلول در آب است).

این آزمون بر روی نمونه‌های سوراخ کاری شده بدون اعمال ارتعاش و نمونه‌های سوراخ کاری شده با اعمال ارتعاشات با شدت‌های مختلف انجام شد. به‌طور کلی فرآیند سوراخ کاری اصطکاکی تأثیر مثبتی بر روی مقاومت خوردگی قطعات گذاشته است زیرا در اکثر نمودارها حالت رویین (پسیو)<sup>1</sup> شدن قطعات مشاهده گردید.

<sup>1</sup> Passive



کردند، مقاومت خوردگی بهبود یافت و این بهبود از 57 درصد در شدت ارتعاشاتی  $96 \text{ W/cm}^2$ ، تا مقدار 2/5 درصد در شدت ارتعاشاتی  $96 \text{ W/cm}^2$ ، متغیر بود که دلیل این امر می‌تواند به جذب انرژی ارتعاشی توسط مذاب و تغییر ترکیب فازهای موجود ارتباط داشته باشد که نیاز به مطالعه بیشتر در این مورد است اما در این تحقیق نفوذ ذرات کاربرد تنگستن به داخل سطح نیز به عنوان یک عامل مشاهده شد.

نتیجه‌گیری که از مجموع آزمایش‌های متالوگرافی و مکانیکی به عمل آمد حکایت از این داشت که با افزودن ارتعاشات اولتراسونیک به فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی، صافی سطح تغییرات خطی از خود نشان نداد اما ریزدانه شدن و سختی سطحی محسوسی دیده شد ولی واضح‌ترین اثر این ترکیب، به مقاومت به خوردگی مربوط می‌شود که به‌طور آشکاری بهبود یافت.

بوده است که در این حالت مقدار نرخ سایش از مقدار  $0/8 \text{ mpy}$  به مقدار  $0/34 \text{ mpy}$  رسیده است و به عبارتی حدوداً 57 درصد نرخ خوردگی کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل گویا است با کاهش شدت ارتعاشات اعمالی به مقدار  $64 \text{ W/cm}^2$  این مقدار به  $48 \text{ W/cm}^2$  کاهش یافته است و همچنین با افزایش شدت ارتعاشات اعمالی به  $96 \text{ W/cm}^2$ ، این مقدار به 13 درصد کاهش یافته است. از آنجاکه مقاومت خوردگی به مقدار و درصد فازهای فلز هم ارتباط دارد و با افزایش و کاهش شدت ارتعاشات اعمالی مقدار انرژی مذاب و گرانیوی آن در لحظه تشکل، تغییر می‌کند، بنابراین با نتیجه‌گیری از شکل 13، می‌توان بیان کرد که در یک مقدار حدی و بهینه از شدت ارتعاشات اعمالی، بیشترین افزایش مقاومت خوردگی به وجود آمده است.

#### 4- نتیجه‌گیری

در اولین مرحله از تحقیق، ابزاری با زاویه بهینه از جنس کاربرد تنگستن همچنین هورنی با شکلی خاص و با ابعاد به‌دست‌آمده از نتایج تحلیل عددی ساخته شد.

با بررسی نتایج متالوگرافی تأثیر مثبت اضافه شدن ارتعاشات اولتراسونیک در ریزساختار قطعه مشاهده گردید در حدی که می‌توان گفت اندازه دانه‌ها در حالتی که بیشترین شدت ارتعاشی اعمال شد، به مقدار 35 درصد ریزتر شد و از مقدار 30 میکرون به  $19/5$  میکرون کاهش یافت. همچنین افزودن ارتعاشات اولتراسونیک سبب کاهش مک‌های موجود در قطعه شده که می‌توان دلیل این امر را به افزایش انرژی داخلی مذاب و حرکت قطعه در حالت خمیری به‌منظور جبران تخلخل‌های انقباضی نسبت داد بنابراین با افزایش شدت ارتعاشات اعمالی قطعه نیز به دماهای بالا رسیده و کاهش بیشتر در تخلخل قابل مشاهده است و همین‌طور به دلیل افزایش انرژی داخلی مذاب، افزایش سرعت جوانه‌زنی و در نتیجه کاهش اندازه دانه مشاهده شد.

همچنین با اعمال ارتعاشاتی با شدت  $96 \text{ W/cm}^2$ ، ذرات کاربرد تنگستن در قسمت انتهایی بوش دیده شد که سبب سختی سطح داخلی بوش گردید.

مقدار سختی سطحی در حالتی که بیشترین شدت ارتعاشات اعمالی یعنی  $96 \text{ W/cm}^2$  اعمال شده بیشترین افزایش به مقدار تقریباً 11 درصد از خود نشان داد.

مهم‌ترین و مؤثرترین اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک به فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی در مقادیر مقاومت خوردگی ظاهر شد و در همه نمونه‌هایی که ارتعاشات اولتراسونیک دریافت

#### 5- مراجع

- [1] Ku, W.-L., et al., Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53: pp. 935-944, 2011.
- [2] Chang SS, Bone GMJR, manufacturing c-i: Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(4-5):442-450, 2005.
- [3] Eliseev, A.A., et al., Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling. *Materials Science and Engineering: A*, 691: pp. 121-125, 2017.
- [4] Lee, S.M., et al., Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN-and TiAlN-coated tungsten carbide tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(1): pp. 81-88, 2009.
- [5] Ozler, L. and N. Dogru, An experimental investigation of hole geometry in friction drilling. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(4): pp. 470-475, 2013.
- [6] Ashoubi. A., Familiarity with industrial work materials in manufacturing and production, Sect. 3, Tabriz, P. 87, (in Persian).
- [7] Zhang, H., et al., New insight into high frequency impacting and rolling of 2A12 aluminum welded joint involving nanocrystallization. *Applied Surface Science*, 488: pp. 115-127, 2019.
- [8] Salemi, G.A., et al., The Effect of Friction Stir Processing Speed Ratio on the Microstructure and Mechanical Properties of A 430 Ferritic Stainless Steel. 2014.