



## بررسی فناوری کوبش التراسونیک بر فولاد گرافیتی GSH48

علیرضا عباسی<sup>1</sup>، سعید امینی<sup>2\*</sup>، قنبرعلی شیخزاده<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان  
3+2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان  
\*کاشان، صندوق پستی 8731751167، kashanu.ac.ir، amini.s@kashanu.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق به استفاده از فناوری کوبش التراسونیک بر فولاد گرافیتی (GSH48) غلتک‌های نورد جهت بهبود برخی خواص مکانیکی سطح پرداخته شد. فناوری کوبش التراسونیک، از فناوری‌های جدید تغییر شکل پلاستیک شدید است که در آن ابزار ارتعاشی با حرکات رفت و برگشتی مداوم خود به سطح قطعه کار ضربه می‌زند و موجب تغییر شکل پلاستیک شدید در سطح می‌شود. این روش خواص مکانیکی از جمله سختی، صافی سطح، طول عمر خستگی، استحکام کششی را بهبود می‌دهد. با شبیه‌سازی و ساخت ابزار ارتعاشی التراسونیک، آماده‌سازی فرآیند شامل نصب ابزار ارتعاشی التراسونیک بر دستگاه تراش انجام گرفت. بررسی آزمایش‌های سختی، صافی سطح، خستگی و استحکام کششی بر قطعات در حالت‌های مختلف بدون عملیات کوبش التراسونیک و پس از عملیات کوبش التراسونیک با یک، دو و سه پاس انجام گرفت. نتایج حاکی از افزایش سختی به میزان 36 درصد تا عمق 0.2 میلی‌متر از سطح و افزایش صافی سطح از 1.376 میکرومتر به 0.545 میکرومتر بر سطح است. بیشترین افزایش صافی سطح و عمر خستگی در قطعات با سه پاس کوبش التراسونیک مشاهده شد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 08 خرداد 1395  
پذیرش: 04 مرداد 1395  
ارائه در سایت: 21 شهریور 1395  
کلیدواژه‌ها:  
فناوری کوبش التراسونیک  
هون  
میدل  
آباکوس  
خواص مکانیکی

## Investigation of ultrasonic peening technology on the GSH48 graphite steel

Alireza Abbasi, Saeid Amini\*, Ghanbarali Shikhzade

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran  
\*P.O.B. 8731751167 kashan, Iran, amini.s@kashanu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 28 May 2016  
Accepted 25 July 2016  
Available Online 11 September 2016

Keywords:  
Ultrasonic Peening Technology  
Hom  
Transducer  
Abaqus  
Mechanical Properties

### ABSTRACT

In this study, the use of Ultrasonic Peening Technology (UPT) on the mill rollers graphite steel (GSH48) for enhancement of some of the surface mechanical properties was surveyed. One of the new technologies for severe plastic deformation is ultrasonic peening technology in which vibratory tool strikes the workpiece surface with continual reciprocating motions, resulting in severe plastic deformation on surface. This method improves mechanical properties like hardness, surface roughness, fatigue life and tension strength. With simulation and manufacturing of peening vibratory tool, preparation of process was accomplished including setting up the ultrasonic vibratory tool on lathe machine. The investigation of hardness tests, surface roughness, and fatigue and tension strength on the pieces was performed in different conditions, before and after the process of ultrasonic peening with one, two and three passes. The results showed increase of hardness up to 36% in depth of 0.2 mm. Also, the surface roughness was reduced from Ra=1.376  $\mu\text{m}$  to Ra=0.545  $\mu\text{m}$ . The most improvement in surface roughness and fatigue life was observed on the pieces with three passes of ultrasonic peening.

### 1-مقدمه

در یک دهه گذشته مواد فلزی دارای دانه‌های کوچک‌تر از یک میکرومتر با استفاده از روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD<sup>1</sup>) به‌طور قابل ملاحظه‌ای مورد علاقه محققین و دانشمندان واقع شده است. این مواد به‌عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی مطرح است که خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در مقایسه با مواد درشت دانه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاست. یکی از مؤثرترین روش‌های فرآوری مواد فلزی فوق ریزدانه، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید است. استحکام بالا، چقرمگی بالا، قابلیت فرم‌پذیری بیشتر در مواد فلزی فوق ریزدانه بسیار بالاتر از مواد درشت دانه است. در سال‌های

اخیر فرایندهایی با عنوان تغییر شکل پلاستیک شدید معرفی شده‌اند که موجب افزایش خواص مکانیکی سطح مانند سختی، استحکام خستگی و صافی سطح می‌شوند [1]. برخی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید در شکل 1 نشان داده شده است [2].

فناوری کوبش التراسونیک (UPT<sup>2</sup>) روشی جدید جهت ایجاد کرنش‌های بزرگ روی لایه‌های سطحی مواد است. این روش عملیات سطحی مکانیکی بدون براده برداری است که با تغییر شکل پلاستیک سطح قطعه به وسیله کار سختی، فشردگی سطح و ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه‌های سطحی قطعه کار در کاهش زبری سطح، افزایش سختی، بالا بردن مقاومت سایشی، مقاومت خوردگی و بالا بردن عمر خستگی قطعه مؤثر است.

از محدودیت‌های کوبش التراسونیک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

<sup>1</sup> Severe Plastic Deformation  
<sup>2</sup> Ultrasonic Peening Technology

Please cite this article using:

A. Abbasi, S. Amini, Gh. Shikhzade, Investigation of ultrasonic peening technology on the GSH48 graphite steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 29-36, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

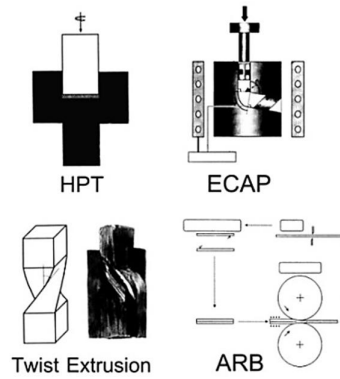


Fig. 1 Schematic view of some of the SPD methods [2] HPT: high-pressure torsion- ECAP: equal channel angular pressing-Twist Extrusion-ARB: accumulative roll bonding

شکل 1 نمایش شماتیک برخی از روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید [2] پیچش با فشار بالا- پرس در کانال زاویه‌دار- اکستروژن پیچشی- نورد تجمعی

- سرعت انجام فرایند پایین است به ویژه برای قطعات با قطرهای زیاد عملیات زمان بر است.
  - با این روش تا حدود 0.2 میلی‌متر از سطح خواص مکانیکی افزایش می‌یابد.
  - در این روش سر ابزار همواره باید بر قطعه کار عمود باشد که قطعات پیچیده محدودیت دارند.
  - کنترل و تنظیم پارامترهای فرایند باید دقیق تنظیم شوند.
  - فناوری کوبش التراسونیک مزایا و مشخصاتی به ترتیب زیر دارد:
  - این فرایند موجب بهبود خواص مکانیکی قطعات می‌شود.
  - از فرایندهای مدرن به همراه مصرف کم انرژی است.
  - فرایند مناسبی است که می‌تواند روی انواع مواد با قطرها و طول‌های متفاوت مورد استفاده قرار گیرد.
  - انجام فرایند بر دستگاه‌های تراش، فرز و دریل قابل اجراست.
- این روش به دلیل توجیه اقتصادی و قیمت تمام شده پایین، منجر به افزایش راندمان می‌شود. این فرایند برای بیشتر سطوح داخلی و خارجی کاربرد دارد و محدود به قطعات مدور نمی‌شود. در واقع تجهیزات این فرایند انرژی مکانیکی را به صورت ارتعاشات متمرکز مکانیکی روی لایه‌های سطحی مواد منتقل می‌کنند. این ارتعاشات یکنواخت موجب افزایش سختی و صافی سطح می‌شود، همچنین این فرایند جایگزین مناسبی برای عملیات حرارتی قطعات است [2].

تاکنون فرایندهای بسیاری جهت بهبود خواص مکانیکی سطوح از طریق ایجاد تغییرات در ریز ساختار و خواص متالورژیکی مواد معرفی شده‌اند. تکنولوژی فورج سرد التراسونیک برای نخستین بار در سال 2001 توسط پیون و همکارانش به عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک برای بهبود صافی سطح و سختی قطعات مطرح شد [3]. چریف و همکارانش در سال 2010 روش کوبش التراسونیک به نام UNSM<sup>1</sup> را جهت ایجاد نانو ساختارها روی کریستال‌های سطحی فولاد آستنیتی AISI به کار گرفتند. آن‌ها افزایش تنش‌های پسماند فشاری و کرنش سختی قابل ملاحظه‌ای را پس از فرایند گزارش دادند [4]. فرایند کوبش التراسونیک به نام USRP<sup>2</sup> توسط تینگ و همکاران جهت افزایش خواص سطحی روی فولاد 40Cr به کار

گرفته شد. نتایج حاکی از شکل‌گیری یک لایه نانو ساختار بود که کاهش زبری سطح از مزایای آن به شمار می‌رفت [5]. فرایندهای جدید آزمایشگاهی با عنوان تغییر شکل پلاستیک شدید جهت دستیابی به مواد با دانه‌های ریزتر در مقایسه با فرایندهای متعارف معرفی و به کار گرفته شده‌اند. در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید بر خلاف سایر روش‌ها نیاز به پس فرایندهایی چون عملیات حرارتی و تف جوشی نیست. پیون و همکاران فرایند کوبش التراسونیک را بر فولاد ابزار D2 مورد استفاده در تیغه‌های قیچی نورد سرد، شرکت فولادی پوسکو کره جنوبی انجام دادند. با بهبود خواص مکانیکی طول عمر تیغه‌های قیچی از 60 درصد به 170 درصد افزایش یافت [6]. مطالعات پیشین که مین سو و همکاران در استفاده از روش کوبش التراسونیک بر تیغه‌های قیچی از جنس SKD61 انجام دادند، حاکی از افزایش عمر خستگی و در نتیجه افزایش طول عمر تیغه‌های قیچی و افزایش راندمان تولید شد [7]. آمانو و همکاران در سال 2012 فرایند کوبش التراسونیک را بر آلیاژ منیزیم AZ91D انجام دادند که به کاهش 23 درصد اصطکاک و افزایش سختی از 230 ویکرز به 295 ویکرز در عمق 100 میکرومتر از سطح رسیدند [8]. آمانو و همکارانش ضمن بررسی توپولوژی سطح بر بیرینگ SAE 52100 توسط فرایند کوبش التراسونیک با استفاده از میکروسکوپ الکترونی به کاهش 25 درصد ضریب اصطکاک و افزایش سختی سطح از 720 به 840 ویکرز رسیدند [9]. شی و همکاران فرایند فورج سرد التراسونیک بر فولاد AISI D2 انجام دادند که سختی سطح از 200 به 530 ویکرز افزایش یافت [10]. لی و همکاران فرایند را بر آلومینیم A6061-T6 انجام دادند که به 40 درصد افزایش سختی پس از فرایند رسیدند [11]. ژانگ و همکاران با انجام فرایند کوبش التراسونیک بر فولاد ضد زنگ SUS 304 با چهار نیروی استاتیکی متفاوت 70-90-110-130 نیوتن خواص مکانیکی از جمله خستگی را بررسی کردند که با نیروی 90 نیوتن به 81 درصد بهبود استحکام خستگی دست یافتند [12]. کریمی و همکارانش در سال 2015 فرایند کوبش التراسونیک را بر فولاد 7225 انجام دادند که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار میکرو به ساختار ریزدانه‌تر در چند میکرومتر از سطح رسیدند [13].

فرایند کوبش التراسونیک بر سطح از فرایندهای جدید است که اثر پارامترهای مختلف بر مواد مختلف جدید هنوز جای کار دارد که در این تحقیق اثر تعداد پاس کوبش بر خواص مکانیکی با قطعه کار فولاد گرافیتی GSH48 غلنک‌های نورد گرم بررسی شده است. هورن پس از شبیه‌سازی و ساخت بر میدل التراسونیک مونتاژ شد و فناوری کوبش التراسونیک بر نمونه‌هایی که از غلنک‌های نورد به دست آمده بود انجام شد و آزمایش‌های کشش، سختی، زبری سطحی و خستگی بر نمونه‌ها حاکی از بهینه‌شدن خواص مکانیکی داشت.

نوع‌آوری این تحقیق نخست اعمال فرایند بر فولاد گرافیتی GSH48 مورد استفاده در غلنک‌های نورد گرم شرکت ذوب آهن اصفهان و همچنین بررسی تعداد پاس کوبش بر خواص مکانیکی قطعه کار است که شرایط آزمایش و تجهیزات مورد استفاده نسبت به کارهای پیشین بهینه‌سازی شده است.

### 1-1- آماده‌سازی فرایند

قید و بند این فرایند بر ماشین تراش جهت انجام فناوری کوبش التراسونیک بسته شده، قطعه کار نیز توسط دستگاه تراش حول محور خود دوران داده می‌شود. ابزار ارتعاشی التراسونیک خود شامل میدل، بوستر، هورن و ابزار کروی است که فرکانس در حدود 20 کیلوهرتز را به ارتعاشات مکانیکی

<sup>1</sup> Ultrasonic Nanocrystal surface Modification

<sup>2</sup> Ultrasonic surface rolling processing

جدول 2 خواص مکانیکی فولاد گرافیتی GSH48

**Table 2 Mechanical properties of GSH48 graphite steel**

چگالی ( $\rho$ )	مدول یانگ ( $E$ )	ضریب پواسون ( $\nu$ )
7800 kg/m <sup>3</sup>	200 GPa	0.3

**2-1- طراحی و ساخت ابزار**

جهت ساخت هورن از شبیه‌سازی رایانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس برای به‌دست‌آوردن ابعاد صحیح هندسی آن استفاده شد. وظیفه هورن افزایش دامنه ارتعاشی حاصل از مبدل و انتقال آن به ابزار کروی است.

با توجه به نتایج حاصله اجزاء مکانیکی و پنوماتیکی طراحی، ساخته و مونتاژ شد. قید و بند مناسبی برای نصب ابزار ارتعاشی التراسونیک روی میز عرضی ماشین تراش نیز طراحی و ساخته شد. جهت تعیین ابعاد هندسی هورن از آنالیز مودال در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. این آنالیز عموماً جهت تعیین فرکانس طبیعی و شکل مود هر فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار فرکانس طبیعی هر سازه به شکل، جنس و تکیه‌گاه آن بستگی دارد [14].

هدف اصلی از شبیه‌سازی هورن، تعیین صحیح ابعاد هندسی با در نظر گرفتن دو نکته اصلی بود. الف) در این شبیه‌سازی فرکانس طبیعی باید به فرکانسی در حدود 20 کیلوهرتز برسد که توسط ژنراتور التراسونیک فرکانس مربوطه تولید می‌شود. ب) در فرکانس‌های به‌دست‌آمده، تنها جابه‌جایی در راستای Z یا موازی با محور هورن قابل قبول است، زیرا هر نوع انحراف از محور هورن موجب تأثیر منفی روی فرکانس تشدید و فناوری کوبش التراسونیک خواهد گذاشت.

جنس هورن فولاد CK45 درنظر گرفته شد که خواص مکانیکی آن به نرم‌افزار داده شد. به منظور طراحی هورن از یک مدل اولیه استفاده شد، اما تا رسیدن به فرکانس طبیعی مناسب در حدود 20 کیلوهرتز ابعاد تغییر داده شد. در شکل 3 ابعاد نهایی مدل هورن برحسب میلی‌متر حاصل می‌شود. در شکل 4 فرم تغییر یافته هورن پس از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. شکل 5 مقدار فرکانس طبیعی طولی 20466 هرتز در دومین مود استخراج شده را نمایش می‌دهد. هورن توسط یک پیچ مغزی از یک سو به بوستر و از سمت دیگر به ساچمه کروی به‌عنوان ابزار متصل می‌شود و دامنه ارتعاش را موازی با محور خود افزایش داده و آن‌ها را به سمت ابزار منتقل می‌کند. ساچمه کروی از جنس تنگستن کاربید با سختی 80 راکول سی و با قطر 6 میلی‌متر به‌عنوان ابزار فناوری کوبش التراسونیک برای مقاومت در برابر حرارت تولیدی در این فرایند و ضربات مکانیکی شدید بر قطعه کار استفاده شد، همچنین یک ابزارگیر جهت محکم کردن هورن روی آن تعبیه شد. شکل 6 اجزاء ابزار ارتعاشی التراسونیک که خود شامل هورن، بوستر و مبدل است را نشان می‌دهد.

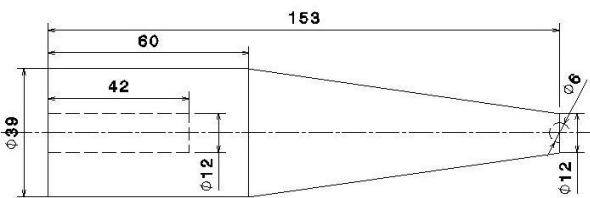


Fig. 3 Horn dimensions in simulation

شکل 3 ابعاد هورن در شبیه‌سازی

تبدیل می‌کند. ارتعاشات مکانیکی توسط بوستر و هورن تقویت شده و توسط ابزار کروی به‌صورت ضربه‌زدن ابزار با حدود 20000 بار در ثانیه به سطح قطعه کار وارد می‌شود.

تجهیزات مورد استفاده در این فرایند عبارت است از:

- دستگاه تراش مدل TN50 که قید و بند تجهیز فناوری کوبش التراسونیک به‌جای سوپرت عرضی دستگاه تراش قرار گرفت. قطعه‌کار بین سه نظام و مرگک دستگاه تراش بسته می‌شود.
- ابزار ارتعاشی التراسونیک که فرایند کوبش التراسونیک را بر قطعه کار انجام می‌دهد.
- قید و بند که بر دستگاه تراش نصب می‌شود و نگهدارنده ابزار ارتعاشی التراسونیک است.
- دستگاه ژنراتور التراسونیک مدل MPI با توان 3 کیلووات، فرکانس در محدوده 18 تا 30 کیلوهرتز و با کنترل دامنه ارتعاشی استفاده می‌شود.
- کمپرسور هوا با فشار 8 بار برای تأمین فشار هوا به‌عنوان نیروی استاتیکی فرایند با شیر کنترل فشار استفاده شد.
- جهت اندازه‌گیری میکرو سختی قطعات از دستگاه میکرو ویکرز سختی سنج مدل FM700 استفاده شد.
- دستگاه زبری‌سنج مدل Mahr- Perthometer M2 برای زبری‌سنجی قطعات استفاده شد.
- جهت اندازه‌گیری سختی قطعات از دستگاه آزمایش سختی مدل WPI40 استفاده شد.
- دستگاه آزمایش کشش مدل Shimadzu AG-25TA برای آزمایش استحکام کششی قطعات استفاده شد.
- سیلندر پنوماتیکی مدل SC-50 × 25-S جهت تأمین نیروی استاتیکی بر قید و بند مونتاژ می‌شود.
- قطعه‌کار از گوشه‌های غلتک‌های قفسه‌های نورد گرم شرکت ذوب آهن اصفهان تهیه شد.

جنس غلتک‌های نورد فولاد گرافیتی GSH48 با ساختار پرلیت و کاربیدهای پراکنده است که در شکل 2 نشان داده شده است. فولاد گرافیتی GSH48 دارای استحکام بالا و مقاوم در برابر ترک‌های حرارتی است که خواص مکانیکی و شیمیایی آن به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 نمایش داده شده است.



Fig. 2 GSH48 graphite steel by pearlitic and dispersed carbide(x200)  
شکل 2 فولاد گرافیتی GSH48 با ساختار پرلیت و کاربیدهای پراکنده  
جدول 1 خواص شیمیایی فولاد گرافیتی GSH48 (درصد جرمی)

**Table 1 Chemical properties of GSH48 graphite steel (mass %)**

عنصر	C	Ni	Mo	Cr	Mn	Si
حداقل	1.5	0.8	0.8	1	0.5	0.5
حداکثر	2.5	2.5	2	1.5	1.5	1.5

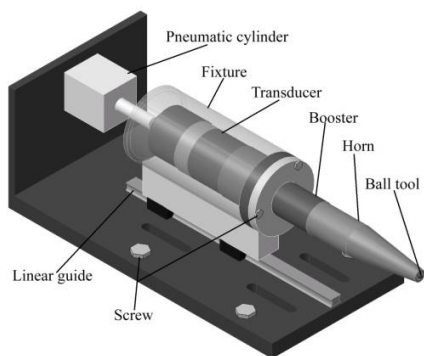


Fig. 7 Modeling of UPT equipment Components in CATIA

شکل 7 مدل سازی اجزاء تجهیز UPT در نرم افزار کتیا

مبدل شده و به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می شود. این ارتعاشات موجب حرکات رفت و برگشتی ابزار شده که این حرکات در دامنه ای کم تکرار می شود. هورن که به عنوان یکی از قطعات اصلی به مبدل متصل شده است وظیفه متمرکز کردن، تقویت و انتقال ارتعاشات به قطعه کار را بر عهده دارد. در نهایت ابزار این ارتعاشات را به سطح قطعه کار منتقل می کند. مقدار دامنه ارتعاش برای مبدل (ترانسدیوسر) 5 میکرومتر است که پس از اتصال هورن دامنه ارتعاش تقویت شده 15 میکرومتر می شود. دامنه ارتعاش توسط سنسور فاصله سنج مدل AEC-5502A-17 که با مکانیزم میدان الکترو مغناطیسی کار می کند اندازه گیری می شود. مونتاژ بوستر بر دستگاه فرز و اندازه گیری دامنه توسط سنسور فاصله سنج در شکل 8 نشان داده شده است. جهت اندازه گیری ابتدا سنسور فاصله سنج را در میان دو فک گیره دستگاه فرز مهار کرده و همچنین ترانسدیوسر را بر کلگی دستگاه فرز متصل می شود و فاصله بین ترانسدیوسر و نوک سنسور 0.5 میلی متر باید قرار گیرد. با اتصال ترانسدیوسر به ژنراتور التراسونیک و تنظیم میزان فرکانس 20 کیلوهرتز بر آن می توان توسط دستگاه اسیلوسکوپ شکل موج ولتاژ بر واحد زمان را مشاهده و میزان دامنه ارتعاش را اندازه گیری کرد. تمام مراحل بالا را با اتصال هورن به ترانسدیوسر هم آزمایش می شود و میزان دامنه ارتعاش در هر دو حالت حاصل می شود.

در این تحقیق یک سیلندر پنوماتیکی که در قسمت انتها به صفحه عمودی قید و بند پیچ می شود و سر پیستون به انتهای محفظه ای که نگهدارنده ترانسدیوسر است متصل می شود. جهت اعمال نیروی استاتیکی پشت ابزار طراحی و به کار گرفته شد. کمپرسور هوا با فشار 8 بار برای تامین فشار هوا استفاده شد و با قرار دادن شیر کنترل فشار پیش از مسیر ورودی هوا به داخل سیلندر پنوماتیک می توان میزان فشار هوا را تنظیم کرد که میزان فشار هوای ورودی با مانومتر نمایش داده می شود. در شکل 9 شماتیک حرکت تجهیز کوبش التراسونیک بر ریل خطی نشان داده شده است که فشار هوا به عنوان نیروی استاتیکی باید از پس زنی ابزار هنگام برگشت جلوگیری کند و سبب حرکت قید و بند روی ریل خطی شود.

نیروی استاتیکی پشت ابزار نیز به عنوان یک پارامتری است که چون در بررسی اولیه تأثیری بر نتایج نداشت از تغییر آن صرف نظر شد.

در شکل 10 مونتاژ تجهیز فناوری کوبش التراسونیک روی دستگاه تراش را نشان می دهد. جهت انجام فرایند قطعه کار توسط دستگاه تراش حول محور خود دوران داده می شود و ابزار ارتعاشی التراسونیک ارتعاشات مکانیکی را بر سطح قطعه کار انتقال می دهد. این انتقال شامل ضربه زدن ابزار با حدود

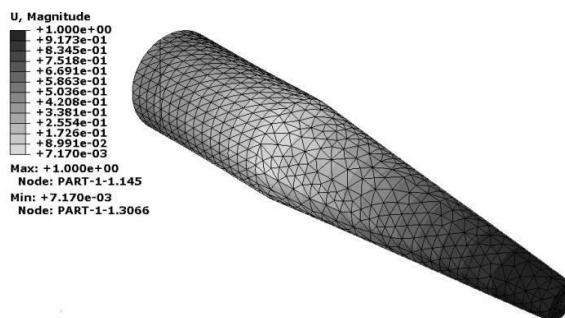


Fig. 4 Deformed shape of the horn in simulation in mm

شکل 4 فرم تغییر شکل یافته هورن در شبیه سازی بر حسب میلی متر

Step/Frame	
Step Name	Description
Step-1	
Frame	
Index	Description
0	Increment 0: Base State
1	Mode 1: Value = 9.55302E+09 Freq = 15556. (cycles/time)
2	Mode 2: Value = 1.65366E+10 Freq = 20466. (cycles/time)
3	Mode 3: Value = 2.10273E+10 Freq = 23079. (cycles/time)
4	Mode 4: Value = 2.10274E+10 Freq = 23079. (cycles/time)
5	Mode 5: Value = 2.19461E+10 Freq = 23578. (cycles/time)

Fig. 5 Linear resonance frequency modes for horn

شکل 5 مدهای فرکانس تشدید طولی برای هورن

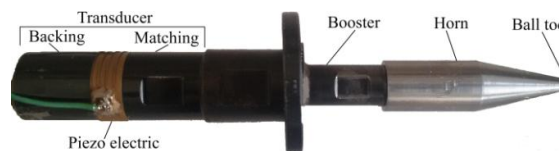


Fig. 6 Components of ultrasonic vibratory tool

شکل 6 اجزاء ابزار ارتعاشی التراسونیک

مبدل که شامل چهار عدد پیزوالکتریک حلقوی است که بین دو قطعه متچینگ و بکینگ قرار دارد. مبدل فرکانس در حدود 20 کیلوهرتز را از ژنراتور التراسونیک دریافت و توسط پیزو الکتریک ها به صورت وایبره مکانیکی تبدیل می کند. بوستر وایبره مکانیکی را تقویت کرده و آن را به هورن انتقال می دهد. هورن طراحی شده ضمن تقویت وایبره مکانیکی، آن را از بوستر به ساچمه انتقال می دهد. ساچمه به عنوان ابزار کروی شکل در محل تعبیه شده در قسمت انتهای مخروطی هورن قرار می گیرد. شکل 7 مدل سازی اجزاء فناوری کوبش التراسونیک در نرم افزار کتیا را نشان می دهد.

پس از تعیین ابعاد هندسی هورن در نرم افزار آباکوس جهت ساخت آن و باقی اجزاء در نرم افزار کتیا مدل سازی انجام گرفت و نقشه های ساخت و مونتاژ تهیه شد. قطعات استاندارد از جمله یک عدد سیلندر پنوماتیکی چهار عدد پیچ  $M12 \times 40$ ، سه عدد پیچ  $M6 \times 30$ ، یک عدد مبدل 20 کیلوهرتز و یک عدد ریل خطی در تجهیز فناوری کوبش التراسونیک مورد استفاده قرار گرفت.

## 2- انجام آزمایش

انرژی الکتریکی در این فرایند از طریق ژنراتور التراسونیک با فرکانس مورد نظر تولید می شود. انرژی الکتریکی با فرکانسی در حدود 20 کیلوهرتز وارد

برای مواد پلی کریستال رابطه تجربی آورده شده و ارتباط بین استحکام تسلیم و اندازه دانه‌ها را بیان می‌کند. رابطه (2) رابطه هال پیچ را نشان می‌دهد [15].

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (2)$$

در معادله،  $\sigma_0$  تنش تسلیم ذاتی برای آغاز حرکت نابه‌جایی‌ها،  $d$  قطر دانه‌ها و  $K$  مقدار ثابت در ارتباط با میزان تأثیر مرزدانه‌ها در حرکت نابه‌جایی است. با توجه به رابطه می‌توان دریافت که با کاهش اندازه دانه تنش تسلیم افزایش می‌یابد. رابطه (3) برای سختی مواد براساس رابطه هال پیچ است که در آن  $H$  سختی ماده،  $H_0$  ثابت سختی معادله،  $d$  قطر دانه‌ها و  $K$  ثابت معادله است، و سختی مواد با ریزشدن دانه‌ها تا یک اندازه بحرانی میان 10 تا 15 نانومتر افزایش می‌یابد [15].

$$H = H_0 + Kd^{-1/2} \quad (3)$$

شکل 12 نمایش شماتیک اختلاف تنش تسلیم با اندازه دانه در فلزات و آلیاژها را نشان می‌دهد. این روش به‌عنوان یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید ریزدانه‌شدن ساختار می‌شود که طبق رابطه هال پیچ سختی و تنش تسلیم افزایش می‌یابد [15].

در معادله 4،  $N$  تعداد ضربه ویرنه التراسونیک برحسب  $\text{times/mm}^2$  را نشان می‌دهد که  $f$  فرکانس التراسونیک برحسب هرترتز،  $d$  قطر قطعه کار برحسب میلی‌متر،  $n$  سرعت اسپیندل برحسب دور بر دقیقه،  $S$  پیشروی برحسب میلی‌متر بر دور و  $V$  سرعت خطی برحسب میلی‌متر بر ثانیه است [16]. در معادله 4 اگر فرایند کوبش التراسونیک با یک پاس انجام گرفت تعداد ضربه ویرنه التراسونیک برای نمونه آزمایش کشش  $N_1=8500 \text{ times/mm}^2$  و برای نمونه آزمایش خستگی  $N_2=13500 \text{ times/mm}^2$  حاصل می‌شود. مطابق معادله 4، اثر فرکانس، سرعت دورانی، قطر قطعه کار و سرعت پیشروی با تعداد ضربه کوبش التراسونیک روی سطح به صورت رابطه (4) نشان داده می‌شود.

$$N = \frac{f}{S \times V} = \frac{60f}{S \times \pi dn} \quad (4)$$

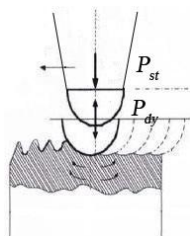


Fig. 11 Schematic representation of UPT tool on the work piece surface

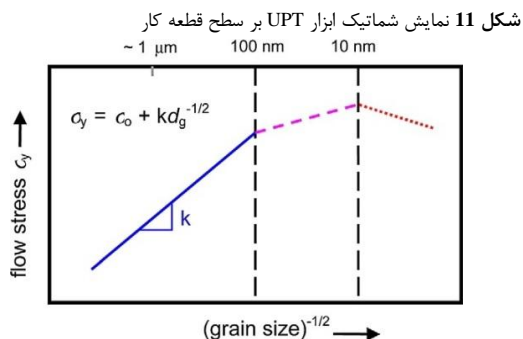


Fig. 12 Schematic representation of the variation of yield stress as a function of grain size in metals and alloys [15]

شکل 12 نمایش شماتیک اختلاف تنش تسلیم با اندازه دانه در فلزات و آلیاژها [15]



Fig. 8 Measurement of amplitude by gap sensor

شکل 8 اندازه‌گیری دامنه توسط سنسور فاصله‌سنج

20000 بار در ثانیه به سطح قطعه کار است. فناوری کوبش التراسونیک روی جنس فولاد گرافیتی GSH48 مورد استفاده در غلتک‌های نورد گرم انجام گرفت که نتایج در ادامه حاکی از بهبود خواص مکانیکی است.

در این مقاله فناوری کوبش التراسونیک از رابطه (1) تبعیت می‌کند که در این رابطه  $P_t$  نیروی کل وارد شده به سطح قطعه کار است و خود شامل نیروی استاتیکی و  $P_{dy}$  نیروی دینامیکی است. نیروی دینامیکی خود تابعی از فرکانس ژنراتور، و  $p$  دامنه نیروی دینامیکی است. تغییر در فرکانس توسط ژنراتور التراسونیک سبب نیروی دینامیکی متفاوتی در سر ابزار می‌شود. نیروی استاتیکی با جک پنوماتیک تأمین و به قید و بند به‌صورت رابطه (1) اعمال می‌شود.

$$P_t = P_{st} + P_{dy} = P_{st} + p \sin 2\pi ft \quad (1)$$

جدول 3 پارامترهای انتخاب‌شده جهت انجام فناوری کوبش التراسونیک روی دستگاه تراش را نشان می‌دهد. شکل 11 شماتیک فناوری کوبش التراسونیک بر سطح قطعه کار را نشان می‌دهد. نیروی استاتیکی و دینامیکی به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. استحکام تسلیم و سختی مواد پلی کریستال متعارف به اندازه دانه‌های آن‌ها بستگی دارد.

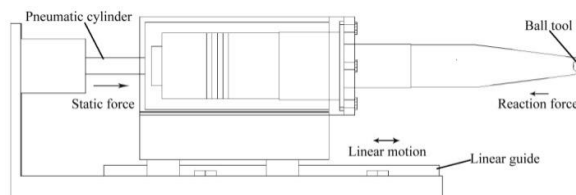


Fig. 9 Schematic of motion of ultrasonic peening equipment on linear guide

شکل 9 شماتیک حرکت تجهیز کوبش التراسونیک بر ریل خطی



Fig. 10 Assembling of UPT equipment on the lathe

شکل 10 مونتاژ تجهیز UPT بر دستگاه تراش

جدول 3 تنظیم پارامترها برای فرایند کوبش التراسونیک

Table 3 Arrangements parameters for UPT

فرکانس	پیشروی	دوران
20 kHz	0.08 mm/rev	45 RPM

بتوان مقایسه سختی نمونه قبل و بعد از فرایند را بررسی کرد. نوع فرو رونده برای میکروسختی سنجی هرم مربع القاعده الماسی کوچک با زاویه رأس  $136^\circ$  استفاده شد. سختیسنجی در پنج نقطه از سطح به فواصل مساوی 0.05 میلی‌متر توسط میکروسکوپ دیجیتالی با دقت 0.001 میلی‌متر اندازه گیری شد. در شکل 14 اثر فرو رونده بر فولاد گرافیتی GSH48 با ساختار پرلیت و کاربیدهای پراکنده نشان داده شده است. شکل 15 نتایج سختی نمونه قبل و بعد از فناوری کوبش التراسونیک را به صورت نمودار نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، سختی میکرو ویکرز در سطح نمونه از 345 ویکرز به 542 ویکرز افزایش یافته است. البته در این فرایند بیشترین عمق سختی در سطح نمونه است. در نقطه 0.2 میلی‌متر دو نمودار پیش و پس از فرایند به هم نزدیک می‌شوند. فرایند کوبش التراسونیک یک روش عملیات سطحی مکانیکی بدون براده برداری است که با تغییر شکل پلاستیکی سطح قطعه، به وسیله کار سختی و فشردگی در لایه‌های سطحی قطعه کار در افزایش سختی سطح قطعه کار مؤثر است. نتایج آزمایش میکرو سختی با فواصل مساوی 0.05 میلی‌متر از سطح در جدول 5 نشان می‌دهد که سختی به میزان 36 درصد افزایش یافته است. با انجام فناوری کوبش التراسونیک، بهبود صافی سطح حاصل می‌شود که با حرکت ابزار روی سطح قطعه کار، برآمدگی‌های سطح یا همان قله‌ها دچار تغییر شکل پلاستیک شده و شروع به حرکت به سمت فضاهای خالی کرده و حفره‌ها را پر می‌کند. این فرایند به‌عنوان یک فرایند پایانی برای بهبود زبری سطح است. مطابق شکل 16، صافی سطح کلی قطعه کار با توجه به دیانگرام استخراج شده افزایش یافته است. اندازه‌گیری صافی سطح توسط دستگاه زبری‌سنج انجام شد که صافی سطح اولیه قطعه کار 1.376 میکرومتر بود که پس از انجام فناوری کوبش التراسونیک صافی سطح به 0.545 میکرومتر بهبود یافت. راه‌های مختلفی برای شرح زبری سطح وجود دارد که یکی از آن‌ها زبری متوسط است که با Ra نشان داده و به‌عنوان مقدار اختلاف محاسبه شده از خط میانگین تعریف می‌شود.

با توجه به این که مرز بین اتم‌ها قدری الاستیک است و اندکی مجاز به جابه‌جایی است. در وضعیت الاستیک شبکه‌های اتم اندکی جابه‌جا می‌شوند و وقتی نیروی اعمالی برداشته شود، اتم‌ها به وضعیت اولیه خود باز می‌گردند. اگر بار وارده به مواد بالاتر از حد الاستیک باشد، در این مرحله شاهد تغییر شکل پلاستیک خواهیم بود. این تغییر شکل پلاستیک حتی پس از حذف نیرو نیز به حالت ایجاد شده خود باقی خواهد ماند. در فرایند کوبش التراسونیک در اثر فشار اعمالی توسط ساچمه کروی بر سطح قطعه کار سبب لهیدگی در سطح و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک کوچکی ایجاد می‌شود. مواد تحت تنش‌های تکراری یا نوسانی، در تنشی به مراتب کمتر از تنش

در این تحقیق این اثر با تغییر تعداد پاس روی سطح بررسی شده است. در مورد دامنه نوسان و توان انتقالی دستگاه التراسونیک مورد استفاده در این تحقیق در شرایط بهینه دامنه و توان کار می‌کند و امکان تغییر این دو پارامتر و بررسی تأثیر واقعی آن بر فرایند وجود ندارد. با انجام دو پاس فرایند کوبش التراسونیک بر سطح تعداد ضربه و بهره التراسونیک دو برابر می‌شود و لایه‌های سطح بیشتر فشرده می‌شوند. تأثیر انجام فرایند با یک و دو پاس بر نمونه‌های کشش و خستگی انجام گرفت که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

### 3- نتایج و بحث

نمونه‌ها از جنس فولاد گرافیتی مطابق استاندارد ASTM-E8 آماده شد. شکل 13، ابعاد استاندارد نمونه کشش را نشان می‌دهد که نمونه‌ها طبق آن آماده شد. آزمایش کشش توسط دستگاه کشش بر نمونه‌های استاندارد کشش انجام گرفت. اعمال فرایند کوبش التراسونیک با یک و دو پاس بر دو نمونه کشش انجام شد. نتایج آزمایش کشش در جدول 4 آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که انجام فناوری کوبش التراسونیک بر نمونه‌ها درصد کمی در افزایش استحکام تسلیم و نهایی تأثیر دارد و انجام فرایند در دو پاس بر نمونه نسبت به انجام فرایند در یک پاس تأثیر چندانی ندارد.

فرایند کوبش التراسونیک عملیات سخت‌کاری سطحی را با صاف کردن ناهمواری‌های سطحی و فشردن آن‌ها درون یک لایه سخت‌شده حول قطعه کار انجام می‌دهد. با شکست لایه‌های زیر سطحی و ایجاد کار سختی، سختی سطح افزایش می‌یابد. اساساً میکروسختی سنج ویکرز برای کاربرد نیروهای خیلی کم، سختیسنجی قطعات کوچک و نازک و فازهای ریز ساختار است.

با توجه به این که توزیع سختی سطح تا عمق 0.2 میلی‌متر از سطح است. آزمایش سختی سطحی میکرو ویکرز، جهت تعیین سختی بر نمونه با یک پاس فناوری کوبش التراسونیک انجام گرفت. نمونه از سطح مقطع برش داده شد و سطح با پولیش آماده شد. در سختیسنجی میکرو ویکرز بارهای مورد استفاده بین 1 تا 1000 گرم است. توسط دستگاه سختیسنج میکروویکرز سختی نمونه پیش و پس از فرایند با نیروی 1 کیلوگرم اندازه‌گیری شد. جنس غلتک‌های نورد فولاد گرافیتی GSH48 دارای ساختار پرلیت و کاربیدهای پراکنده است که سختیسنجی از زمینه انجام شد تا

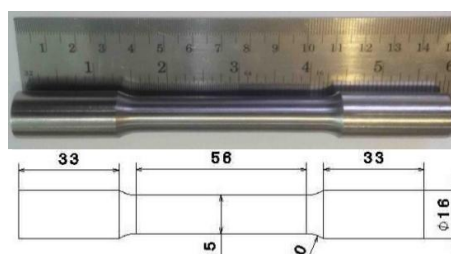


Fig. 13 The specimen used for the tension test

شکل 13 نمونه مورد استفاده برای آزمایش کشش

جدول 4 نتایج آزمایش کشش

Table 4 Results of tension test

نوع نمونه	استحکام نهایی (kgf/mm <sup>2</sup> )	استحکام تسلیم (kgf/mm <sup>2</sup> )	تعداد پاس فرایند UPT	ازدیاد طول نسبی %
پیش از UPT	60.6	59.9	0	0.2
پس از UPT	67	63.5	1	0.2
پس از UPT	67.5	65.4	2	0.2

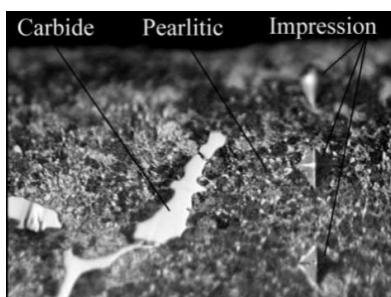


Fig. 14 Indenter impression on graphite steel with pearlitic and dispersed carbide (x500)

شکل 14 اثر فرو رونده بر فولاد گرافیتی با ساختار پرلیت و کاربیدهای پراکنده

حاصل از خستگی سبب افزایش عمر خستگی می‌شود. خستگی به‌عنوان عاملی تعیین‌کننده در عمر قطعات در معرض تنش‌های متناوب است. در فناوری کوبش التراسونیک نتایج تحقیقات حاکی است که خستگی به شرایط سطح قطعه بسیار حساس است. عواملی چون ناهمواری‌های سطح، منابع تنش سطحی، تغییرات تنش‌های باقی‌مانده، سایش و خوردگی بر خستگی تأثیرگذار است. کوبش التراسونیک توسط امواج التراسونیک به‌عنوان یک فرایند شکل‌دهی سطحی مواردی که بر گسیختگی خستگی دارای اهمیت است را تحت تأثیر قرار داده در نتیجه سبب بهبود عمر خستگی می‌شود. در این فرایند اعمال تغییر شکل پلاستیک بر لایه‌های سطحی سبب بهبود صافی سطح و افزایش تنش پسماند فشاری سطح می‌شود. هر نیروی خارجی که سبب تخریب قطعه می‌شود ابتدا باید بر تنش‌های باقی‌مانده فشاری غلبه کند، این موضوع سبب بالا رفتن عمر قطعه می‌شود. نمونه‌ها از گوشه غلطک‌های نورد بریده و مطابق استاندارد دستگاه WP140 شکل 17 آماده شد.

در رابطه 5 طبق ابعاد استاندارد خستگی و با داشتن تنش استحکام تسلیم  $600 \text{ N/mm}^2$  از آزمایش کشش، میزان نیروی اعمالی 300 نیوتن حاصل شد. آزمایش خستگی بر نمونه‌ها پیش و پس انجام فناوری کوبش التراسونیک صورت گرفت که نتایج آن در جدول 6 آورده شده است. نتایج حاصل از آزمایش خستگی افزایش قابل توجه عمر خستگی پس از انجام فرایند را نشان می‌دهد که می‌تواند بر افزایش عمر غلتک‌های نورد و راندمان تولید تأثیر مؤثری داشته باشد. رابطه (5) به شرح زیر است.

$$F = \sigma \times \left[ \frac{\pi d^3}{32a} \right] = 600 \times \left[ \frac{\pi \times 8^3}{32 \times 100.5} \right] = 300 \text{ N} \quad (5)$$

مطابق جدول 6، میزان نیرو به اندازه 200 و 300 نیوتن بر دستگاه آزمایش خستگی تنظیم شد. سه نمونه خستگی، بدون انجام فرایند، با یک پاس و دو پاس فرایند آماده شد و نتایج نشان می‌دهد اگر فرایند در دو پاس بر نمونه انجام شود افزایش عمر خستگی نسبت به انجام فرایند در یک پاس بهتر می‌شود و افزایش عمر خستگی پس از فرایند نسبت به نمونه بدون فناوری کوبش التراسونیک بسیار قابل توجه است.

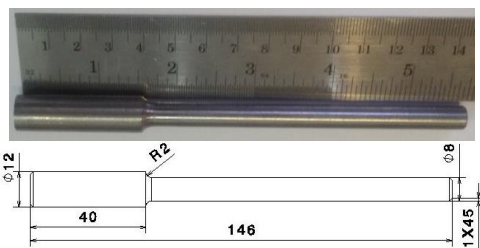


Fig. 17 The specimen used for the fatigue test

شکل 17 نمونه مورد استفاده برای آزمایش خستگی  
جدول 6 نتایج آزمایش خستگی

Table 6 Results of fatigue test

نوع نمونه	تعداد دوران نمونه (RPM)	میزان تنظیم نیرو (N)	تعداد پاس انجام فرایند UPT
قبل از UPT	29872	200	0
بعد از UPT	179475	200	1
بعد از UPT	185607	200	2
قبل از UPT	14301	300	0
بعد از UPT	74795	300	1
بعد از UPT	80233	300	2

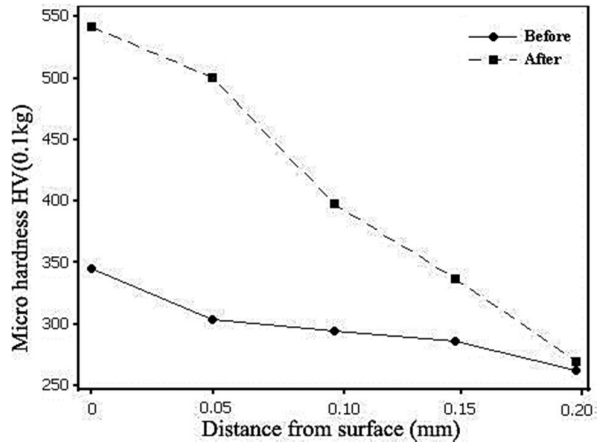


Fig. 15 UPT effect on hardness surface

شکل 15 تأثیر فرایند UPT روی سختی سطح

جدول 5 نتایج آزمایش سختی

Table 5 Results of hardness test

فاصله از سطح	0.20mm	0.15mm	0.10mm	0.05mm	0mm	قبل از UPT
262 HV	286 HV	294 HV	304 HV	345 HV	345 HV	UPT از
269 HV	337 HV	389 HV	501 HV	542 HV	542 HV	بعد از UPT

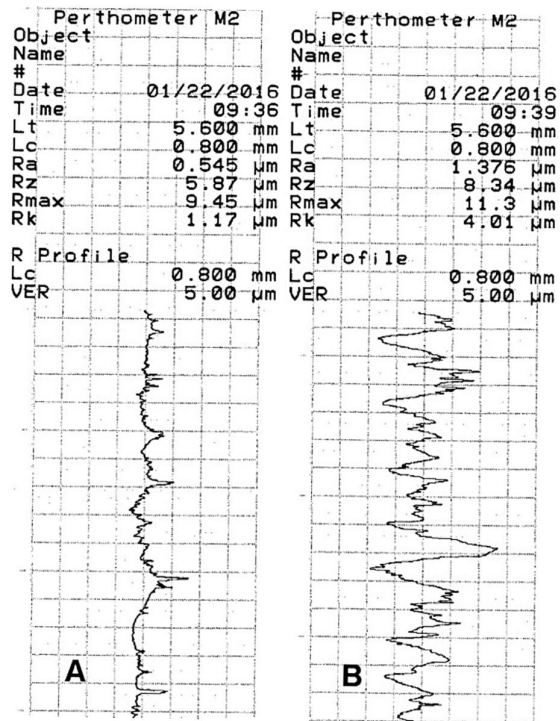


Fig. 16 UPT effect on surface roughness A) After UPT B) Before UPT

شکل 16 تأثیر فرایند UPT روی صافی سطح (A) پس از فرایند UPT (B) پیش از فرایند UPT

نقطه تسلیم خود خواهند شکست که این پدیده خستگی نامیده می‌شود. فناوری کوبش التراسونیک با به تأخیر انداختن شروع و انتشار ترک‌های

## 4- نتیجه گیری

در این مطالعه اثر فناوری کوپش التراسونیک بر فولاد گرافیتی GSH48 بررسی شد. این فرایند یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید است که لایه‌های سطحی قطعه کار را با حرکات رفت و برگشتی و منظم ابزار فشرده می‌سازد. در واقع ابزار در هر ثانیه حدود 20000 بار به‌صورت پیوسته به لایه‌های سطحی قطعه کار ضربه می‌زند.

با انجام آزمایش‌ها و به‌دست آوردن نتایج آزمایش استحکام کششی، سختی، زبری سطحی و خستگی نتایج زیر حاصل شد:

- با انجام آزمایش سختی بر قطعه کار سختی در سطح از 345 ویکرز به 542 ویکرز افزایش یافته است. افزایش لایه سختی تا عمق 0.2 میلی‌متر از سطح قطعه کار بوده است.

- فناوری کوپش التراسونیک درصد کمی در افزایش استحکام تسلیم و نهایی در آزمایش کشش تأثیر داشت.

- در آزمایش صافی سطح، صافی سطح از 1.376 میکرومتر به 0.545 میکرومتر بر سطح بهبود یافت.

- نتایج آزمایش خستگی بر نمونه‌ها حاکی از افزایش قابل توجه عمر خستگی داشت. افزایش عمر خستگی نمونه‌ها با دو پاس فرایند نسبت به انجام فرایند در یک پاس بهتر می‌شود.

نمونه‌ها از گوشه‌های غلتک‌های قفسه‌های نورد گرم شرکت ذوب آهن اصفهان حاصل شد که نتایج حاصل شده مبین افزایش خواص مکانیکی فولاد گرافیتی GSH48 است که در افزایش طول عمر غلتک‌های نورد و راندمان تولید اثر گذار است.

## 5- تشکر و قدردانی

نویسندگان از همکاری شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان و شرکت چدن‌سازان تشکر می‌نمایند.

## 6- مراجع

- [1] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, Vol. 45, No. 2, pp. 103-189, 2000.
- [2] A. Abbasi, S. Amini, A. Emamikhah, Design and implementation of the ultrasonic cold forging technology process for improving surface mechanical properties of 6XB2C cold-worked alloy steel tool, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 230, No. 2, pp. 267-278, 2014.
- [3] I. Cho, G. Song, C. Kim, A. Nobuhide, A. Combs, J. Park, C. M. Suh, J. H. Park, Y. S. Pyoun, Nano structured surface modification of tool steel and its beneficial effects in mechanical properties, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 11, pp. 2151-2156, 2005.
- [4] A. Cherif, Y. Pyoun, B. Scholtes, Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) on residual stress state and fatigue strength of AISI 304, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 2, pp. 282-286, 2010.
- [5] W. Ting, W. Dongpo, L. Gang, Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing, *Applied Surface Science*, Vol. 255, No. 5, pp. 1824-1829, 2008.
- [6] Y.S. Pyoun, H.S. Kim, K.G. Son, G.H. Song, M.K. Kim, J.H. Kang, B.U. Choi, J. Park, I.H. Cho, C.S. Kim, J.H. Park, J. Kinney, Development of D2 Tool Steel Trimming Knives with Nanoscale Microstructure, *Proceedings of the AISTech*, Vol. 2, pp. 465-468, 2005.
- [7] C.M. Suh, G.H. Song, Y.S. Pyoun, A quality control method by ultrasonic vibration energy and diagnosis system at trimming process, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 397-402, 2007.
- [8] A. Amanov, O. Penkov, Y. S. Pyun, D. E. Kim, Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the tribological properties of AZ91D magnesium alloy, *Tribology International*, Vol. 54, pp. 106-113, 2012.
- [9] A. Amanov, I.S. Cho, Y.S. Pyoun, C.S. Lee, I.G. Park, Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects, *Wear*, Vol. 286-287, pp. 136-144, 2012.
- [10] D. She, W. Y. Zhiqiang, Y. Gu, C. Wang, J. Liu, The effect of nitriding temperature on hardness and microstructure of die steel pre-treated by ultrasonic cold forging technology, *Materials and Design*, Vol. 49, pp. 392-399, 2013.
- [11] C. J. Lee, R.I. Murakami, Fatigue properties of aluminum alloy (A6061-T6) with ultrasonic nano-crystal surface modification, *International Journal of Modern Physics*, Vol. 24, No. 15 - 16, pp. 2512-2517, 2010.
- [12] K. Y. Zhang, Y. S. Pyoun, X. J. Cao, B. Wu, R. Murakami, Fatigue properties of SUS304 stainless steel after ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM), *International Journal of Modern Physics Conference*, Vol. 6, pp. 330-335, 2012.
- [13] A. Karimi, S. Amini, Steel 7225 surface ultrafine structure and improvement of its mechanical properties using surface nanocrystallization technology by ultrasonic impact, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 5, pp. 1127-1134, 2016.
- [14] R.D. Blevins, *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Van Nostrand Reinhold Co, New York, 1979.
- [15] K.S. Kumar, H. Van Swygenhoven, S. Suresh, Mechanical behavior of nanocrystalline metals and alloys, *Acta Materialia*, Vol. 51, No. 19, pp. 5743-5774, 2003.
- [16] X.J. Cao, Y.S. Pyoun, R. Murakami, Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification, *Applied Surface Science*, Vol. 256, No. 21, pp. 6297-6303, 2010.