



بررسی تجربی و شبیه سازی عددی توزیع تنش های پسماند غلتک های نورد در فناوری کوبش التراسونیک

علیرضا عباسی¹، سعید امینی^{2*}، قنبرعلی شیخ زاده³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

2-3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

*کاشان، صندوق پستی 8731751167، amini.s@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 فروردین 1396
پذیرش: 17 خرداد 1396
ارائه در سایت: 06 مرداد 1396
کلید واژگان:
فناوری کوبش التراسونیک
آباکوس
پراش پرتو یکس
تنش های پسماند
اندازه دانه

چکیده

در این تحقیق برای تعیین تنش پسماند غلتک های نورد از جنس فولاد گرافیتی (GSH48)، از روش غیر مخرب پراش اشعه ایکس استفاده شد. در این روش، برای تعیین تنش پسماند از تغییرات فاصله بین صفحات کریستالی به عنوان کرنش استفاده می‌کند. تعیین تنش پسماند بر روی نمونه‌ها قبل و بعد از فناوری کوبش التراسونیک (UPT) در عمق های مختلف انجام شد. در فناوری کوبش التراسونیک با ایجاد کار سختی و فشردگی در لایه های سطحی قطعه کار باعث بهبود برخی خواص مکانیکی از جمله تنش پسماند می‌شود. با شبیه سازی و ساخت ابزار ارتعاشی التراسونیک و نصب آن بر روی دستگاه تراش، عملیات UPT بر روی نمونه‌های آماده شده از غلتک های نورد انجام گرفت. اندازه گیری تنش پسماند از سطح تا عمق 0.5 میلیمتر، قبل و بعد از فرایند کوبش التراسونیک انجام شد. با شبیه سازی عددی فناوری کوبش التراسونیک، توزیع تنش پسماند تجربی و شبیه سازی عددی مقایسه گردید. نتایج مبین افزایش تنش پسماند فشاری در حدود 0.4 میلیمتر از سطح بعد از عملیات UPT می‌باشد. افزایش تنش پسماند فشاری باعث افزایش استحکام و عمر خستگی آنها می‌شود و راندمان کاری آنها افزایش می‌یابد. محاسبه اندازه دانه سطح بعد از عملیات کوبش التراسونیک از روی الگوی پراش پرتو ایکس با استفاده از رابطه ویلیامسون - هال انجام گرفت که اندازه دانه 60.2 نانومتر حاصل شد. این ریز دانه شدن ساختار سطح به دلیل چینش مجدد نابجایی ها در اثر ارتعاش با فرکانس بالا و تغییر شکل شدید پلاستیک بعد از عملیات UPT رخ می‌دهد.

Investigation experimental and numerical simulation of residual stresses distribution of rolling mill rolls in ultrasonic peening technology

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 07 April 2017
Accepted 07 June 2017
Available Online 28 July 2017

Keywords:

Ultrasonic Peening Technology (UPT)
Abaqus
X-ray diffraction
Residual stresses
Grain size

ABSTRACT

In this study, a non-destructive method of x-ray diffraction (XRD) was used to determine residual stress of rolling mill rolls made of graphite steel (GSH48). This method utilizes the variations of distance between crystal planes as strain. The determination of residual stress was performed on samples in different depths before and after conducting ultrasonic peening technology. In UPT process, impacts were exerted on the workpiece by ball tool, resulting in the improvement of some mechanical properties such as residual stress by creating work hardening and compression. After the simulation and manufacturing of ultrasonic vibratory tool and then the installation of that on lathe machine, UPT operations were conducted on the prepared samples. Measuring residual stress from surface to 0.5 mm depth was performed before and after the UPT process. After the numerical simulation of the UPT, the distribution of experimental residual stress and numerical simulation was compared, the results suggested the increase of compressive residual stress about 0.4 mm from the surface after the UPT process. The rise of compressive residual stress in the rolling mill rolls leads to the increase of their strength and fatigue life and, as a result, their working efficiency is boosted. After the UPT process, the grain size of the surface was calculated from the model of the x-ray diffraction using Williamson-Hall relation in which grain size was obtained 60.2 nm. The refinement of surface structure arises because of displacement arrangement, again due to vibration with high frequency and severe plastic deformation after the UPT process.

1- مقدمه

قطعه بسیار مهم است. تنش های پسماند، تنش های خود متعالی هستند که در قطعه در اثر فرایند تولید نظیر نورد، ریخته گری، ماشین کاری، جوشکاری و غیره محبوس می‌گردند که می‌تواند تاثیر منفی یا مثبت روی عمر قطعه

تنش پسماند، تنشی است که در جسم باقی مانده و در تعادل با محیط اطراف خود است. بنابراین دانستن مقدار و جهت آن در طراحی و خواص مکانیکی

Please cite this article using:

A. Abbasi, S. Amini, Gh. Shikhzade, Investigation experimental and numerical simulation of residual stresses distribution of rolling mill rolls in ultrasonic peening technology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 316-324, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

داشته باشند. تنش های پسماند در فلزات به طور غیر مستقیم به وسیله کرنش های موجود در نمونه اندازه گیری می شوند.

روش های مختلفی برای اندازه گیری تنش پسماند وجود دارد که بعضی از آن ها مخرب و بعضی غیر مخرب می باشند که اندازه گیری به روش استاندارد پراش اشعه ایکس¹ غیر مخرب است که در این تحقیق از آن استفاده می شود. اصول و مبانی اندازه گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس را اولد و همکارانش در سال 1945 ارائه نمودند [1]. در این روش، نمونه در زاویه های کجی مختلفی نسبت به افق (زاویه سای) قرار داده می شود و در هر یک از این زاویه ها، با تابش اشعه ایکس به سطح نمونه، منحنی های پراش به دست می آید. موقعیت قله منحنی ها پراش (2θ) در هر یک از زاویه های کجی نمونه باید با دقت تعیین شود. بنابراین مقدار زاویه 2θ باید از روی قله منحنی های پراشی که بسیار پهن و در مواردی دارای شکل نامنظم می باشند بدست آید. از روی زاویه های 2θ بدست آمده فاصله بین صفحات کریستالی بدست می آید و در نهایت با تحلیل رگرسیون خطی بین فاصله صفحات کریستالی و توان دوم سینوس زاویه سای از شیب و عرض از مبدا خط تقریب زده شده استفاده و تنش پسماند محاسبه می شود. از جمله تحقیقات انجام شده می توان به اندازه گیری تنش پسماند فیلم های شش ضلعی از جنس روی توسط راموس در سال 1978 اشاره نمود [2]. آلبرتینی و همکارانش در سال 1997 تنش پسماند در صفحات جوشکاری شده AI-2219 را اندازه گیری نمودند [3]. پارینت و همکارانش به بررسی تنش پسماند در تماس چرخ دنده ها در سال 2009 پرداختند [4]. روش پراش اشعه ایکس برای اندازه گیری تنش پسماند نمونه های تخت ارائه شده است و دستگاه های اندازه گیری تنش پسماند، دقیق ترین جواب ها را برای نمونه های تخت می دهند [5].

فناوری کوبش التراسونیک² (UPT) یک فرآیند کار سرد است که در آن سطح قطعه توسط ابزار کروی تحت ضربات شدید قرار می گیرد. در این فرآیند لایه زیر سطح فلز به نقطه تسلیم کششی خود می رسد تا تغییر فرم پلاستیک ایجاد شود. با بلند شدن ابزار کروی از سطح و برگشت الاستیک لایه زیر سطح در محل برخورد ابزار کروی سطح تحت تنش فشاری ناشی از این برگشت قرار می گیرد. با ادامه فناوری کوبش التراسونیک و همپوشانی فرورفتگی های ناشی از برخورد ابزار کروی به سطح، یک لایه یکنواخت با تنش فشاری باقیمانده تشکیل می شود. 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 لایه های سطحی در کاهش زبری سطح، افزایش سختی، بالا بردن مقاومت سایشی، و بالا بردن عمر خستگی قطعه موثر است. تنش های پسماند کششی تمایل دارند تا ذره های تشکیل دهنده قطعه را از هم دور کنند که باعث ترد شدن و کاهش مقاومت مکانیکی سطح می شوند. تنش های پسماند فشاری باعث فشرده شدن مرز دانه های سطحی شده و شروع ترک را به تأخیر می اندازند.

رشد ترک در ناحیه تحت فشار بسیار آهسته تر می باشد هر چه عمق سطح فشرده شده بیشتر باشد میزان مقاومت به ترک نیز بیشتر خواهد بود [6].

اکنون فرایندهای زیادی جهت بهبود خواص مکانیکی سطوح از طریق ایجاد تغییرات در ریز ساختار و خواص متالورژیکی مواد معرفی شده اند. تکنولوژی فورج سرد التراسونیک برای اولین بار در سال 2001 توسط پیون و

همکارانش به عنوان یکی از روش های تغییر شکل پلاستیک برای بهبود صافی سطح و سختی قطعات مطرح شد [7]. چریف و همکارانش در سال 2010 روش بهبود سطح با نانو ساختار کردن به روش التراسونیک³ را بر روی فولاد آستنیتی AISI 304 به کار گرفتند. آنها افزایش سختی سطح از 220 ویکرز به 390 ویکرز را پس از فرایند گزارش دادند [8]. فرایند غلتک کاری سطح به روش التراسونیک⁴ توسط تینگ و همکاران جهت افزایش خواص سطحی به روی فولاد 40Cr به کار گرفته شد. نتایج حاکی از شکل گیری یک لایه نانو ساختار بود که کاهش زبری سطح از مزایای آن به شمار می رفت [9]. فرایندهای جدید آزمایشگاهی تحت عنوان تغییر شکل پلاستیک شدید جهت دستیابی به مواد با دانه های ریزتر در مقایسه با فرایندهای متعارف، معرفی و به کار گرفته شده اند. در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید بر خلاف سایر روش ها نیاز به پس فرایندهائی چون عملیات حرارتی و تف جوشی نمی باشد. پیون و همکاران فرایند کوبش التراسونیک را بر روی فولاد ابزار D2 مورد استفاده در تیغه های قیچی نورد سرد، شرکت فولادی پوسکو کره جنوبی انجام دادند. با بهبود خواص مکانیکی، طول عمر تیغه های قیچی از 60 درصد به 170 درصد افزایش یافت [10]. مطالعات قبلی که مین سو و همکاران در استفاده از روش کوبش التراسونیک بر تیغه های قیچی از جنس SKD61 انجام دادند، حاکی از افزایش عمر خستگی و در نتیجه افزایش طول عمر تیغه های قیچی و افزایش راندمان تولید شد [11]. آمانو و همکارانش با 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 ویکرز به 840 ویکرز رسیدند [12]. شی و همکاران فرایند فورج سرد التراسونیک بر روی فولاد AISI D2 انجام دادند که سختی سطح از 200 ویکرز به 530 ویکرز افزایش یافت [13]. لی و همکاران فرایند را بر روی آلومینیم A6061-T6 انجام دادند که به 40 درصد افزایش سختی بعد از فرایند رسیدند [14]. ژانگ و همکاران با انجام فرایند کوبش التراسونیک بر روی فولاد ضد زنگ SUS 304 با چهار نیروی استاتیکی متفاوت 70-90-110-130 نیوتن خواص مکانیکی از جمله خستگی را بررسی نمودند که با نیروی 90 نیوتن به 81 درصد بهبود استحکام خستگی دست یافتند [15]. عباسی و همکاران در سال 2014 تکنولوژی فورج سرد را بر روی تیغه های قیچی 800 تی نورد گرم ذوب آهن که از جنس فولاد آلیاژی 6XB2C است انجام دادند که به 37 درصد سختی سطح رسیدند [16]. کریمی و همکارانش در سال 2015 فرایند کوبش التراسونیک را بر روی فولاد 7225 انجام دادند که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار میکرو به ساختار ریزدانه تر در چند میکرومتر از سطح رسیدند [17].

فرایند کوبش التراسونیک بر سطح از فرایندهای جدید می باشد که اثر پارامترهای مختلف بر روی مواد مختلف جدید هنوز جای کار دارد. در این تحقیق اثر کوبش التراسونیک بر روی تنش پسماند قطعه کار از جنس فولاد گرافیتی GSH48 غلتک های نورد گرم بررسی می شود. ابزار ارتعاشی التراسونیک شامل ابزار کروی، هورن، بوستر و ترانسدیوسر است که هورن پس از شبیه سازی و ساخت بر مبدل التراسونیک مونتاژ گردید و فناوری کوبش التراسونیک بر نمونه هایی که از غلتک های نورد بدست آمده بود انجام شد. در این تحقیق در انجام آزمایش ها و شبیه سازی کارهای جدیدی انجام شده که در زیر لیست شده است:

³ Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM)

⁴ Ultrasonic surface rolling processing (USRP)

¹ x-ray diffraction (XRD)

² Ultrasonic Peening Technology (UPT)

جدول 1 خواص شیمیایی فولاد گرافیتی GSH48 (درصد جرمی)

Table 1 Chemical properties of GSH48 graphite steel (mass %)							عنصر
C	Mg	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	درصد جرمی
1.95	0.01	2.02	0.345	1.27	0.735	1.1	درصد جرمی
							عنصر
S	W	P	Cu	V	Al	Nb	درصد جرمی
0.029	0.038	0.02	0.15	0.029	0.053	0.037	درصد جرمی

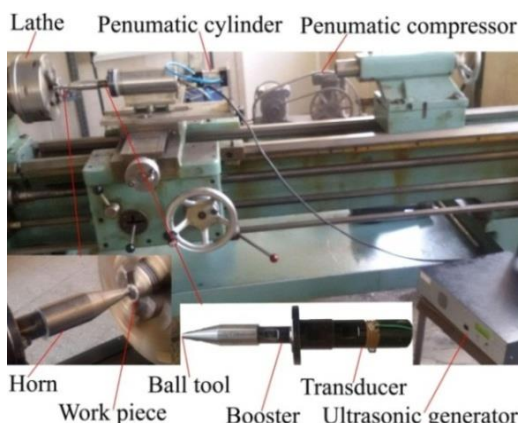


Fig. 1 Components of UPT equipment on the lathe machine

شکل 1 اجزاء، تجهیز UPT بر روی دستگاه تراش

- دستگاه الکترو پولیش مدل مگا تک (MP 3003) و الکترو پلاتین مدل IRI.2000-E استفاده شد.

با شبیه سازی کامپیوتری هورن از جنس فولاد CK45 در نرم افزار آباکوس ابعاد صحیح هندسی آن حاصل و سپس ساخته شد. در واقع وظیفه هورن افزایش دامنه ارتعاشی حاصل از مبدل و انتقال آن به ابزار کروی می باشد. ابزار کروی از جنس تنگستن کاربرد با سختی 80 راکول سی و با قطر 6 میلی متر به عنوان ابزار فناوری کوبش التراسونیک به منظور مقاومت در برابر حرارت تولیدی در این فرایند و ضربات مکانیکی شدید بر روی قطعه کار استفاده شد. یک سیلندر پنوماتیکی جهت اعمال نیروی استاتیکی پشت ابزار در قسمت انتها به پشت ترانسدیوسر متصل می شود. کمپرسور هوا با فشار 8 بار برای تأمین فشار هوا استفاده شد و با قرار دادن شیر کنترل فشار قبل از مسیر ورودی هوا به داخل سیلندر پنوماتیک می توان میزان فشار هوا را تنظیم نمود که میزان فشار هوای ورودی با مانومتر نمایش داده می شود. فشار هوا به عنوان نیروی استاتیکی باید از پس زنی ابزار حین برگشت جلوگیری کند و باعث حرکت تجهیز کوبش التراسونیک روی ریل خطی شود. نیروی استاتیکی در حالت بهینه، با فشار هوای 1 بار تأمین و بر روی مانومتر شیر کنترل فشار نمایش داده می شود که از رابطه (1) با داشتن سیلندر پنوماتیکی (SC-50×25-S) نیروی استاتیکی 200 نیوتن حاصل می شود.

$$F = P \times A = 0.1 \times (\pi \times 25^2) \cong 200 \text{ N} \quad (1)$$

2-2- مباحث تئوری فرایند

در این مقاله فناوری کوبش التراسونیک از معادله (2) تبعیت می کند که در این رابطه P_t ، نیروی کل وارد شده به سطح قطعه کار است و خود شامل P_{st} ، نیروی استاتیکی و P_{dy} ، نیروی دینامیکی می باشد. نیروی دینامیکی خود تابعی از f ، فرکانس ژنراتور و p ، دامنه نیروی دینامیکی است. تغییر در فرکانس توسط ژنراتور التراسونیک باعث نیروی دینامیکی متفاوتی در سر ابزار می شود. نیروی استاتیکی با سیلندر پنوماتیک تأمین می شود و به قید و بند اعمال

- اعمال فناوری کوبش التراسونیک بر روی جنس فولاد گرافیتی GSH48 که در غلتک های نورد کاربرد دارد جهت بهبود خواص مکانیکی، افزایش راندمان تولید و کاهش هزینه ها انجام شد. همچنین عملیات بر روی پیشانی نمونه ها انجام شد که برای این منظور، طراحی و ساخت تجهیز UPT جهت مونتاژ بر دستگاه تراش انجام گرفت.

- شبیه سازی فناوری کوبش التراسونیک در نرم افزار آباکوس انجام گرفت و ضمن بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند نتایج تنش پسماند حاصل شد.

- اندازه گیری تنش پسماند از سطح تا عمق 0.5 میلیمتر در پنج نقطه به فواصل مساوی، قبل و بعد از فرایند کوبش التراسونیک به روش غیر مخرب پراش اشعه ایکس انجام شده و افزایش دقت در اندازه گیری تنش پسماند در عمق با روش پولیش الکترو شیمیایی لایه برداری انجام شد.

- بررسی ریز ساختار شدن سطح بعد از فناوری کوبش التراسونیک به روش ویلیامسون - هال از روی الگوی پراش پرتو ایکس و تعیین اندازه دانه انجام گرفت.

2- فرایند کوبش التراسونیک

1-2- آماده سازی و انجام فرایند

جنس استفاده شده در این تحقیق فولاد گرافیتی GSH48 غلتک های نورد با ساختار پرلیت و کاربیدهای پراکنده می باشد که خواص شیمیایی آن در جدول 1 نمایش داده شده است. نمونه های استوانه ای از جنس فولاد گرافیتی به قطر و طول 20 میلیمتر تهیه شد و فرایند کوبش التراسونیک بر روی پیشانی قطعات انجام شد. جهت انجام فناوری کوبش التراسونیک، مطابق شکل 1 تجهیز فرایند بر روی ماشین تراش مونتاژ شد و قطعه کار نیز توسط دستگاه تراش حول محور خود دوران داده می شود. جهت انجام فرایند کوبش التراسونیک روی دستگاه تراش دوران 45 RPM و پیشروی 0.08 mm/rev تنظیم شد. مبدل (ترانسدیوسر) ابزار ارتعاشی التراسونیک، دارای چهار عدد پیژوالکتریک است که فرکانس در حدود 20 کیلوهرتز را از ژنراتور التراسونیک دریافت و به صورت وایبره مکانیکی تبدیل می کند. ارتعاشات مکانیکی توسط بوستر و هورن تقویت شده و توسط ابزار کروی به صورت متوالی بر سطح قطعه کار ضربه وارد می کند.

تجهیزات مورد استفاده در این فرایند عبارتست از:

- دستگاه تراش مدل TN50 که قید و بند تجهیز فناوری کوبش التراسونیک به جای سوپرت عرضی دستگاه تراش قرار گرفت. قطعه کار بین سه نظام و مرغک دستگاه تراش بسته می شود.

- تجهیز UPT که بر روی دستگاه تراش نصب می شود و فرایند کوبش التراسونیک را بر قطعه کار انجام می دهد.

- دستگاه ژنراتور التراسونیک مدل MPI با توان 3 کیلو وات، فرکانس در محدوده 18 تا 30 کیلوهرتز و با کنترل دامنه ارتعاشی استفاده می شود.

- سیلندر پنوماتیکی مدل SC-50×25-S و کمپرسور هوا با فشار 8 بار برای تأمین فشار هوا به عنوان نیروی استاتیکی فرایند استفاده شد.

- جهت اندازه گیری تنش پسماند قطعات از دستگاه پراش پرتو ایکس ساخت شرکت فیلیپس استفاده شد.

- دستگاه آزمایش کشش مدل شیمادزو (AG-25TA) برای آزمایش استحکام کششی قطعات استفاده شد.

صورت تجربی استحکام مرز دانه ها را برای فلزات و آلیاژها بیان می کند که در آن H سختی ماده، H_0 ثابت سختی، d اندازه دانه و K ثابت ماده می باشد و سختی مواد با ریز شدن دانه افزایش می یابد [21].

$$H = H_0 + Kd^{-1/2} \quad (5)$$

3- شبیه سازی فرایند کوبش التراسونیک

فرایند کوبش التراسونیک با اهداف زیر در نرم افزار آباکوس 6.14 شبیه سازی شد:

- شناخت پارامترهای تأثیر گزار بر فرایند
- بررسی میزان تأثیر پارامترهای مختلف
- مقایسه و بررسی نتایج فرایند تجربی با شبیه سازی
- استفاده از شبیه سازی ها به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه های آزمایش ها

هندسه ی قطعه کار، قطاعی از استونه ای به قطر 10 میلی متر و به صورت سه بعدی مدل سازی شد تا به واقعیت فرایند نزدیک باشد. در شکل 3 مدل سازی نمونه با تقسیم بندی جهت کنترل بیشتر مش ریزی نشان داده شده است. شبیه سازی ابزار کرووی با قطر 6 میلی متر به صورت صلب فرض شد. در جدول 2 خواص مکانیکی قطعه کار از جنس فولاد گرافیتی نشان داده شده است. آزمایش کشش توسط دستگاه کشش بر روی نمونه مطابق استاندارد ASTM-E8 انجام گرفت و نمودار تنش کرنش حاصل شد. از نتایج آزمایش کشش رفتار پلاستیکی قطعه کار در نرم افزار داده شد. پس از همگرایی ابعادی المان ها، در نهایت تعداد 3815 المان مکعبی از نوع C3D8R با ابعاد 73 میکرومتر برای مش بندی¹ مدل هندسی استفاده شد. این نوع المان دارای 8 گره با انتگرال گیری کاهش یافته است تا زمان محاسبات کاهش یابد. شکل 4 مونتاز فرایند کوبش التراسونیک را نشان می دهد که نمونه مش ریزی شده است. شبیه سازی به صورت صریح² با استفاده از مقیاس جرم³ انجام گرفت. در شبیه سازی تماس میان غلتک و ابزار کرووی از نوع تماس سطح به سطح در نظر گرفته شده است که به این منظور یک جفت تماسی با ضریب اصطکاک صفر در مدل وارد شد. یکی از موارد مهم در شبیه سازی اعمال شرایط مرزی است تا مدل سازی مسئله با واقعیت هم خوانی داشته باشد. بدین منظور کلیه درجات آزادی قطعه کار صفر در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه حرکت دورانی نمونه برای انجام فرایند بر محیط نمونه است در مدل سازی از حرکت دورانی نمونه صرف نظر گردید.

ابزار کرووی فقط در راستای محوری (Z) و عرضی (Y) درجه آزادی دارد که در راستای محوری با ارتعاش التراسونیک بر روی سطح کوبش ایجاد کرده و در راستای عرضی در طول قطعه پیشروی می کند. بارگذاری در شبیه سازی عملیات کوبش التراسونیک به صورت کنترل

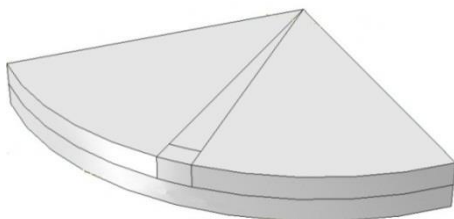


Fig. 3 Geometric model of sample with section

شکل 3 مدل هندسی نمونه با تقسیم بندی

¹ Meshing
² Explicit
³ Mass scale

می شود [18].

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

شکل 2 شماتیک فنآوری کوبش التراسونیک بر روی سطح قطعه کار را نشان می دهد. مطابق شکل نیروی استاتیکی حاصل از نیروی پنونماتیکی (P_{st})، نیروی دینامیکی حاصل از ارتعاش ابزار (P_{dy}) در مجموع نیروی نهایی (P_t) را تشکیل می دهد که به سطح قطعه کار وارد می شود و با نیروی عکس العمل قطعه کار مقابله می کند. هنگام عملیات کوبش التراسونیک قطعه دوران دارد و ابزار بر روی پیشانی قطعه کار پیشروی می نماید.

در معادله (3)، N تعداد ضربه و بیره التراسونیک بر حسب times/mm^2 را نشان می دهد که f فرکانس التراسونیک بر حسب هرتز، d قطر قطعه کار بر حسب میلی متر، n سرعت اسپیندل بر حسب دور بر دقیقه، S پیشروی بر حسب میلی متر بر دور و V سرعت خطی بر حسب میلی متر بر ثانیه می باشد [19]. اگر فرایند کوبش التراسونیک با یک پاس انجام گرفت تعداد ضربه و بیره التراسونیک برای نمونه آزمایش کشش $N_1=8500 \text{ times/mm}^2$ و برای نمونه آزمایش تنش پسماند و سایش بر روی پیشانی نمونه استوانه ای به قطر 20 میلی متر ضربه و بیره التراسونیک وارد می شود که تعداد ضربه و بیره التراسونیک $N_2=5308 \text{ times/mm}^2$ حاصل می شود که از قطر خارجی به مرکز نمونه کاهش می یابد. مطابق معادله (3)، اثر فرکانس، سرعت دورانی، قطر قطعه کار و سرعت پیشروی با تعداد ضربه و بیره کوبش التراسونیک روی سطح نشان داده می شود.

$$N = \frac{f}{S \times V} = \frac{60f}{S \times \pi dn} \quad (3)$$

رابطه حال-پیچ (4) وابستگی نقطه تسلیم پایین یا تنش شکست را با اندازه دانه بیان می کند. اخیراً تأثیر اندازه دانه بر خواص مکانیکی فلزات و آلیاژهای پلی کریستال بررسی شده است. در رابطه حال-پیچ، σ_y تنش تسلیم وابسته به d ، اندازه دانه و σ_0 ، K مقدار ثابت این رابطه می باشند. با توجه به رابطه می توان دریافت که با کاهش اندازه دانه تنش تسلیم افزایش پیدا می کند. [20].

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (4)$$

بررسی ها نشان داد سختی مواد به تنش موجودش وابسته است. در رابطه حال-پیچ (5) وابستگی سختی با اندازه دانه بیان شده است. این رابطه به

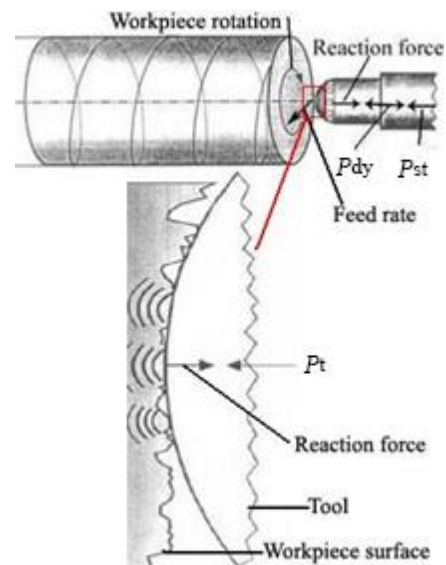


Fig. 2 Schematic representation of UPT tool on the work piece surface

شکل 2 نمایش شماتیک ابزار UPT بر روی سطح قطعه کار

جدول 2 خواص مکانیکی فولاد گرافیتی GSH48

چگالی (ρ) kg/m ³	مدول یانگ (E) GPa	ضریب پواسون (ν)	استحکام تسلیم (N/mm ²)	استحکام نهایی (N/mm ²)
7800	200	0.3	599	606

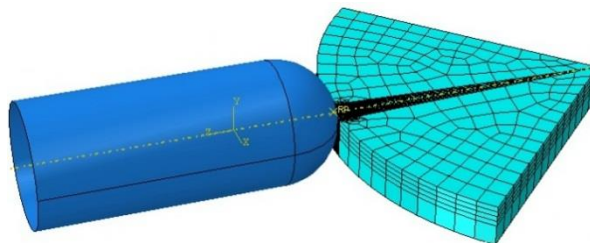


Fig. 4 Assemblage of UPT equipment

شکل 4 مونتاژ فرایند کوبش التراسونیک با مش بندی نمونه با ابزار کروی

جابجایی اعمال شد به گونه‌ای که نیروی عکس‌العمل اعمال شده به ابزار کروی معادل نیروی استاتیکی شود. پس از شبیه‌سازی فرایند نمودار نیروی عکس‌العمل اعمال شده به ابزار بر واحد زمان مطابق شکل 5 حاصل شد که باید 200 نیوتن باشد تا با کار تجربی هم خوانی داشته باشد. این نیرو، نیروی استاتیکی است که توسط سیلندر پنوماتیک به ابزار وارد می‌شود. با جابجایی عرضی ابزار کروی، پیشروی عملیات کوبش التراسونیک در طول قطعه کار شبیه‌سازی شد.

یکی از چالش‌ها شبیه‌سازی فرآیند UPT اعمال ارتعاش التراسونیک همراه با حرکت عرضی ابزار کروی می‌باشد. تعریف این حرکت ارتعاشی به صورت نوسان جابجایی بر زمان است که در قسمت دامنه¹ نرم‌افزار با استفاده از معادله (6) که روابط تبدیل فوریه است داده شد در روابط تبدیل فوریه فرکانس 20 کیلوهرتز و دامنه 15 میکرومتر در نظر گرفته شد.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L}) \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx$$

$$b_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx$$

در معادله (7)، با فرکانس 20 کیلوهرتز زمان یک دوره تناوب 50×10^{-6} حاصل شد و دامنه جابجایی ابزار کروی در این دوره تناوب

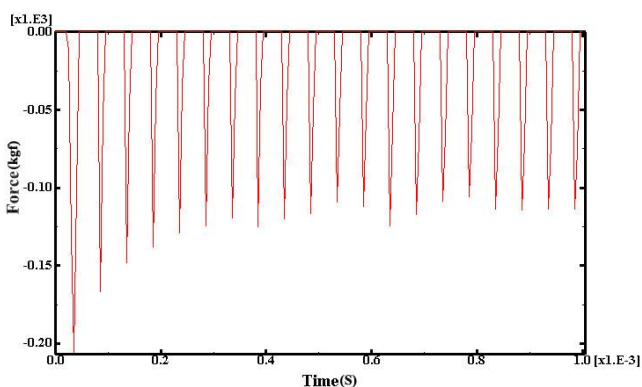


Fig. 5 Exerted reaction force to the tool in time

شکل 5 نیروی عکس‌العمل اعمال شده به ابزار بر واحد زمان

15 میکرو متر است. این دوره تناوب به طور پیوسته تکرار می‌شود و حاکی از نیروی دینامیکی ابزار است.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20000} = 50 \times 10^{-6} \quad (7)$$

جهت تعیین تنش پسماند باید قطعه کار شبیه‌سازی که فرایند کوبش التراسونیک بر آن انجام شده در حالت آزاد و بدون بارگذاری قرار گیرد تا تنش‌های آن آزاد گردد پس بدین منظور قطعه کار بدون بار و به صورت مطلق² شبیه‌سازی می‌شود. پس از اتمام شبیه‌سازی در قسمت نتایج، نمودار تنش پسماند در جهت محور γ و در راستای عمق قطعه کار حاصل می‌شود.

4- آزمایش تنش پسماند

1-4- تعیین منحنی پراش و نمودار $d \cdot \sin^2 \psi$

فرایند کوبش التراسونیک بر روی پیشانی نمونه استوانه‌ای به قطر و طول 20 میلیمتر از جنس فولاد گرافیتی انجام گرفت. ضخامت نمونه استاندارد برای دستگاه تنش پسماند 5 میلیمتر است که توسط دستگاه وایر کات به اندازه مورد نظر رسید. برای اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش پرتو ایکس از دستگاه پراش اشعه ایکس ساخت شرکت فیلیپس استفاده شد. برای بدست آوردن جواب دقیق، باید سطح نمونه صاف و تمیز باشد.

رابطه (8)، رابطه براگ در روش استاندارد پراش اشعه ایکس می‌باشد:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (8)$$

که در آن n مرتبه انعکاس، λ طول موج اشعه ایکس بر حسب \AA ، d فاصله بین صفحات کریستالی بر حسب \AA و θ زاویه براگ می‌باشد. در این روش پرتوهای ایکس به سطح نمونه تابیده شده و اشعه‌های منعکس شده، در جایی که دارای بیشترین شدت می‌باشند دریافت می‌شوند. یک پرتو ایکس تک فام که به وسیله آند فلزی تیوب های اشعه ایکس تولید می‌شود دارای طول موج مشخص بوده و هر تغییری در فاصله صفحات کریستالی منجر به جابجایی زاویه انعکاس می‌شود. آند تیوب های اشعه ایکس، یک طیف پیوسته و سه پرتو پر انرژی تک فام ($k\alpha_1, k\alpha_2, k\beta$) تولید می‌کند. از پرتوی $k\alpha_1$ و با زاویه براگ در محدوده $120^\circ < 2\theta < 180^\circ$ برای اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده می‌شود. پرتوی $k\beta$ از پرتوهای $k\alpha_1$ و $k\alpha_2$ فاصله می‌گیرد و تاثیری در موقعیت پیک ندارد. پرتو $k\alpha_2$ را نیز بر اساس تجربه کاربر، می‌توان حذف نمود و یا به صورت ترکیب با پرتو $k\alpha_1$ در نظر گرفت.

انتخاب یک قله منحنی پراشی که برای تعیین تنش پسماند مناسب باشد تأثیر مهمی بر دقت این روش دارد. در آنالیز تنش پسماند، از زاویه‌های انعکاس بالاتر از 120° استفاده می‌شود چون که در این زاویه‌ها منحنی پراش، شدت و دقت بالاتری دارد. هر چه تنش پسماند در ماده بیشتر باشد پیک‌ها پهن تر می‌باشند و بالعکس، هر چه تنش پسماند در ماده کمتر باشد پیک‌ها باریکتر می‌شوند [22].

روش‌های متنوعی برای تقریب پروفیل پیک وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش تقریب سهمی، روش گوسین، روش کوشی و روش تابع توزین پیرسون هفت اشاره نمود. هدف از تقریب پروفیل پیک، آوردن یک رابطه‌ی ریاضی است تا بتوان موقعیت دقیق آن را تعیین نمود [23].

شرایط آزمایش بر روی دستگاه پراش پرتو ایکس طبق جدول 3 برای اندازه‌گیری تنش پسماند تنظیم شد و آزمایش بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در شکل 6 نمودار پراکندگی پراش اشعه ایکس نشان داده شده است که

² Implicit

¹ Amplitude

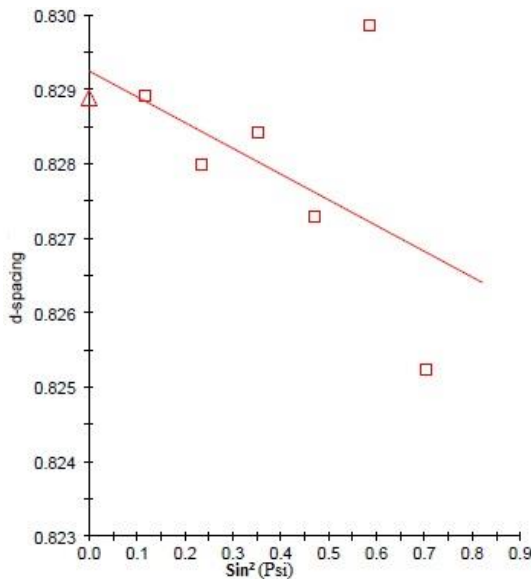


Fig. 7 Linear diagram of $d\text{-sin}^2\psi$ with angle $\psi = 0^\circ$
 شکل 7 نمودار خطی $d\text{-sin}^2\psi$ با زاویه $\psi = 0^\circ$

پس از هر اندازه گیری تنش پسماند از سطح قطعه کار باید در تنظیمات نرم افزاری دستگاه پراش پرتو ایکس از بین روش های متنوع برای تقریب پروفیل پیک حالت بهینه انتخاب شود که روش مجذور سینوسی¹¹ در نظر گرفته شد.

2-4- پولیش الکتروشیمیایی

تنها روش مطمئن برای برداشتن سطح فلز، بدون ایجاد تنش، روش پولیش الکتروشیمیایی است که جهت اندازه گیری تنش پسماند در عمق، از سطح نمونه لایه برداری انجام شد. تنش پسماند از سطح جدید حاصل شده توسط دستگاه پراش پرتو ایکس اندازه گیری می شود. در هر مرحله به میزان 0.1 میلیمتر از سطح لایه برداری می شود و تا عمق 0.5 میلیمتر تنش پسماند اندازه گیری می شود.

فرایند لایه برداری از سطح نمونه ها به روش پولیش الکتروشیمیایی در محلول حاوی پرکلریک (60 cc)، آب (140 cc)، اتانول (800 cc) در ولتاژ ثابت 30 ولت به مدت زمان 30 دقیقه انجام گرفت.

برای این منظور از سیستم دو الکترودی شامل نمونه به عنوان الکترود آند و پلاتین به عنوان الکترود کاتد استفاده شد. در شکل 8 عملیات پولیش الکتروشیمیایی بر روی نمونه نشان داده شده که از دستگاه الکترو پولیش و الکترود پلاتین استفاده شد. برای لایه برداری دقیق از سطح نمونه، قبل از عملیات پولیش الکتروشیمیایی ضخامت توسط میکرومتر دیجیتالی با دقت 0.001 میلیمتر اندازه گیری شد و بعد از عملیات نیز مجدداً اندازه گیری انجام گرفت. برای به دست آوردن مدت زمان مناسب بر روی چند نمونه به صورت سعی و خطا عملیات انجام گرفت تا زمان 30 دقیقه برای لایه برداری 0.1 میلیمتر از سطح حاصل شد. طبق رابطه 10، چگالی جریان در عملیات پولیش الکتروشیمیایی 30.25 A/dm^2 حاصل شد.

$$J = \frac{I}{A} = \frac{0.95}{0.0314} = 30.25 \text{ A/dm}^2 \quad (10)$$

3-4- نتایج تنش پسماند

اندازه گیری تنش پسماند نمونه ها از سطح تا عمق 0.5 میلیمتر، قبل و بعد از

منحنی پراش زاویه 136.86° که بیشترین شدت در زاویه براگ بزرگتر از 120° را دارد در نظر گرفته می شود. بعد از انتخاب منحنی پراش مناسب و تعیین موقعیت آن در زوایای مختلف ψ با استفاده از رابطه براگ فاصله بین صفحات کریستالی در هر زاویه محاسبه شده و نمودار فاصله بین صفحات کریستالی (d-spacing) بر حسب $\sin^2\psi$ حاصل می شود.

خط راستی از نقاط ترسیم شده عبور داده می شود که از روی شیب و عرض از مبدا خط حاصل با استفاده از رابطه ی (9)، تنش پسماند تعیین می شود.

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{(1 + \nu)d_{\varphi 0}} \left(\frac{\partial d_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2\psi} \right) \quad (9)$$

در رابطه ی فوق E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون، $d_{\varphi 0}$ فاصله بین صفحات کریستالی در زاویه $\psi = 0^\circ$ و $d_{\varphi\psi}$ فاصله بین صفحات کریستالی در زاویه دلخواه φ و ψ می باشد [24].

عمق نفوذ پرتو ایکس در سطح نمونه کمتر از 5 میکرومتر است. تنش پسماند با زاویه ψ صفر، 45 و 90 درجه اندازه گیری شد و تانسور تنش های اصلی از آن حاصل شد. شکل 7 نمودار خطی $d\text{-sin}^2\psi$ با زاویه $\psi = 0^\circ$ در حالت تنش پسماند روی سطح قطعه کار بعد از فرایند UPT را نشان می دهد که برای عمق های دیگر هم بدین صورت پس از عملیات لایه برداری با پولیش الکتروشیمیایی، تنش پسماند اندازه گیری می شود. همچنین اندازه گیری تنش پسماند از نمونه قبل از فرایند UPT و در عمق های زیر سطح انجام شد.

جدول 3 تنظیمات دستگاه پراش پرتو ایکس برای تنش پسماند

Table 3 X.R.D device adjustments for residual stress	
1.54060	طول موج پرتو $k\alpha_1$
1.54443	طول موج پرتو $k\alpha_2$
مس	آند تیوب
40 mA – 40Kv	مشخصات ژنراتور
0.2mm	پهنای پرتو تابیده شده
پیوسته	نحوه تابش پرتو اشعه ایکس
1 S	زمان هر مرحله
132.025	زاویه شروع آنالیز (2θ)
140.975	زاویه شروع آنالیز (2θ)
0.05	اندازه هر مرحله (2θ)
16	تعداد مراحل

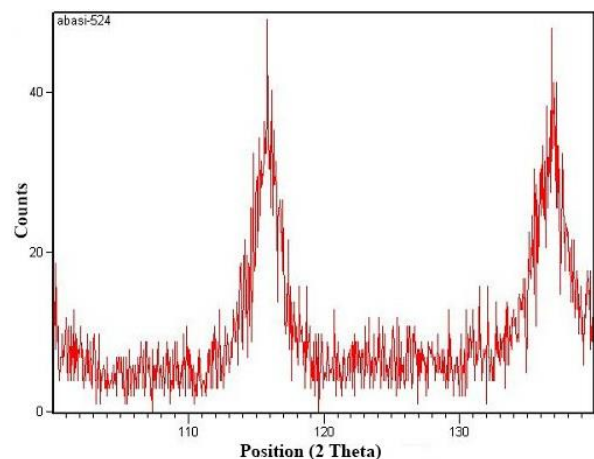


Fig. 6 Diagram of X-ray diffraction

شکل 6 نمودار پراش اشعه ایکس

¹ sine square

فرایند کوبش التراسونیک نشان می دهد. نتایج تجربی و شبیه سازی عددی توزیع تنش های پسماند بعد از عملیات کوبش التراسونیک حاکی از وجود تنش پسماند فشاری روی سطح نمونه در حدود 405 MPa - است که تا عمق حدود 0.4 میلیمتر وجود دارد و مقدار آن کاهش می یابد. اندازه گیری تنش های پسماند به صورت شبیه سازی عددی کمک می کند که تنظیم پارامترهای موثر در فرایند کوبش التراسونیک جهت ایجاد تنش های پسماند فشاری و در عمق بیشتر از سطح قطعه، با هزینه پایین و دقیق انجام شود. در این تحقیق نتیجه شبیه سازی عددی تنش پسماند بعد از فرایند کوبش التراسونیک با نتیجه تجربی همخوانی داشت.

میزان تنش های پسماند فشاری در سطح نمونه بعد از فرایند کوبش التراسونیک افزایش می یابد که به مقاومت قطعه در برابر خستگی و جلوگیری از رشد ترک کمک می کند. با توجه به اینکه برآیند نیروهای اعمال شده به قطعه ناشی از بارگذاری خارجی است، تا وقتی تنش کششی نتواند بر تنش پسماند فشاری غلبه کند، برآیند تنش اعمال شده به ماده فشاری است و از رشد ترک و نهایتاً شکست جلوگیری می شود.

در غلتک های نورد وجود تنش های پسماند کششی در سطح تمایل به باز کردن ترک ها و انتشار آنها دارند و چون ترک های حرارتی ریز در سطح غلتک در هنگام نورد و شرایط نورد کاری به وجود می آید، حضور تنش های پسماند کششی می تواند باعث رشد ترک ها و شکست غلتک شود. وجود تنش های پسماند فشاری در سطح غلتک های نورد بسیار حائز اهمیت است چون از رشد ترک ها ممانعت کرده و عمر خستگی آنها را افزایش می دهد که می تواند توسط فرایند کوبش التراسونیک بر روی سطح غلتک های نورد اعمال شود.

5- تعیین انداز دانه با روش ویلیامسون - هال

اساس این روش تغییر عرض انتگرالی پیک ها با تغییر اندازه دانه و کرنش های شبکه ای می باشد. با افزایش فواصل شبکه ای طبق رابطه براگ (رابطه 8) زاویه پراش کاهش می یابد و بالعکس با کاهش فواصل شبکه ای زاویه پراش افزایش می یابد و نتیجه این افزایش و کاهش عریض شدن پیک ها در نمودار پراش پرتوی ایکس خواهد شد. ریزدانه شدن ساختار باعث عریض شدن پیک ها می شود [25].

انجام عملیات کوبش التراسونیک بر روی سطح نمونه با تغییر شکل شدید پلاستیک منجر به تغییر محسوس در پهنای خطوط پراش پرتو ایکس می شود که می توان با روش ویلیامسون - هال اندازه دانه سطح نمونه بعد از فرایند را تعیین کرد. شرایط آزمایش بر روی دستگاه پراش پرتو ایکس ساخت شرکت فیلیپس برای پراش پرتوی ایکس طبق جدول 5 تنظیم شد و آزمایش

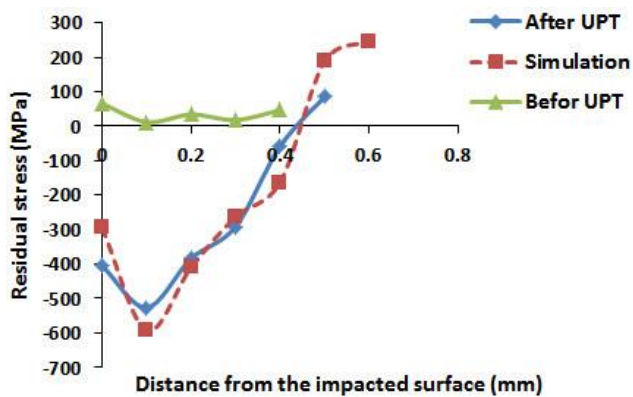


Fig. 9 Diagram of prepared results from residual stresses

شکل 9 نمودار نتایج حاصل از تنش های پسماند

فرایند کوبش التراسونیک انجام شد. اندازه گیری تنش های پسماند در عمق که نیاز به لایه برداری توسط عملیات پولیش الکتروشیمیایی دارند باید با ضریب تصحیح مور - ایونز تصحیح شوند.

نتایج حاصل از اندازه گیری تنش های پسماند در راستای ضخامت قطعه کار توسط دستگاه پراش پرتو ایکس در عمق های مختلف بعد از اعمال ضریب تصحیح در جدول 4 آورده شده است و با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه شده است. تنش پسماند قبل از فرایند کوبش التراسونیک تا عمق 0.4 میلیمتر از سطح حاصل شد که تنش پسماند مثبت و از نوع کششی را نشان می دهد. در سطح نمونه تنش پسماند 66 MPa و از نوع کششی مشاهده می شود که احتمالاً ناشی از فرایند ساخت فولاد گرافیتی GSH48 است. در کل برای نمونه قبل از عملیات می توان تنش پسماند را صفر در نظر گرفت.

در نمونه عملیات شده با اندازه گیری تنش پسماند تا عمق 0.5 میلیمتر از سطح، تنش از نوع منفی و فشاری مشاهده شد. علت ایجاد تنش فشاری این است که ناحیه ضرب دیده دچار تغییر فرم شدید پلاستیک می شود ولی ماده اطراف آن ناحیه که در حالت الاستیکی است سعی در مهار و برگرداندن به ابعاد اولیه را دارد، در نتیجه یک تنش باقی مانده فشاری ایجاد می شود. برای وضعیتی که بخشی از سطح مقطع به طور پلاستیکی تغییر فرم می دهد، در حالی که ناحیه اطراف تغییر فرم الاستیکی دارند، ناحیه ای که در کشش تحت تغییر فرم پلاستیکی بوده تحت یک تنش باقی مانده فشاری پس از باربرداری قرار خواهد گرفت، در حالی که ناحیه ای که در فشار تحت تغییر فرم پلاستیکی قرار گرفته یک تنش باقی مانده کششی پس از باربرداری را تجربه می کند تا تنش روی سطح مقطع نمونه بالانس باشد.

حداکثر تنش باقی مانده متناسب با پارامترهای اعمال فرایند کوبش التراسونیک و حد الاستیکی فلز است. شکل 9 نمودار نتایج حاصل از تنش نمونه پسماند را در سه حالت شبیه سازی، قبل و بعد از عملیات کوبش

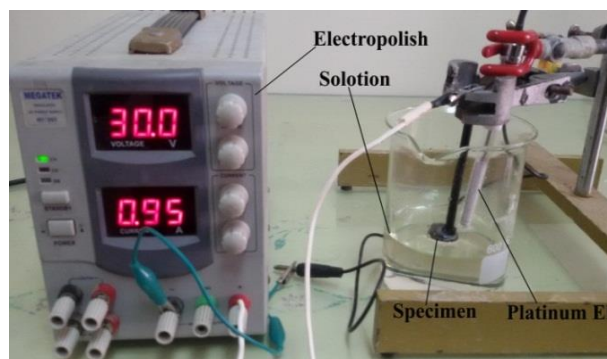


Fig. 8 Electrochemical polish operations on the sample

شکل 8 عملیات پولیش الکتروشیمیایی بر روی نمونه

جدول 4 نتایج حاصل از تنش های پسماند

Table 4 Prepared results from residual stresses

Before UPT (MPa)	After UPT (MPa)	(MPa) Simulation	Location
66	-405	-295	سطح نمونه
12	-526	-592	عمق 0.1 mm
34	-384	-410	عمق 0.2 mm
18	-291	-263	عمق 0.3 mm
47	-58	-163	عمق 0.4 mm
-	85	188	عمق 0.5 mm
-	-	247	عمق 0.6 mm

است مطابق شکل 11 حاصل می شود. از روی شیب نمودار ویلیامسون- هال، کرنش و از روی عرض از مبدا آن اندازه دانه تعیین می شود. با داشتن عرض از مبدا معادله خط و طول موج اشعه ایکس (لامپ مسی $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) طبق رابطه (12) اندازه دانه 60 نانومتر حاصل می شود. از روی شیب نمودار، کرنش 0.0026 بدست می آید.

$$\frac{0.9\lambda}{d} = 0.0023 \Rightarrow d = 60.2 \text{ nano}$$

$$2\varepsilon = 0.0052 \Rightarrow \varepsilon = 0.0026 \quad (12)$$

این ریزدانه شدن ساختار سطح به دلیل چینش مجدد نابیایی ها در اثر ارتعاش با فرکانس بالا و تغییر شکل شدید پلاستیک در دانه ای سطحی است. طبق نظریه بلاها، ارتعاشات مافوق صوت موجب تغییر شکل آسان دانه های سطحی شده و هرچه به سطح نزدیکتر می شود، میزان و تأثیر ارتعاشات بیشتر می شود. از طرف دیگر شدیدترین میزان تغییر شکل پلاستیک در سطح اعمال می شود و در نقاط عمیق تر تغییر شکل کمتر است بنابراین اندازه دانه ها در سطح نمونه در مقیاس نانومتر است و در لایه های زیر سطح بیشتر می شود. طبق رابطه هال - پیچ با کاهش اندازه دانه، تنش تسلیم و سختی افزایش می یابد که منجر به بهبود خواص مکانیکی قطعه کار می شود.

6- نتیجه گیری

یکی از فرایندهای تغییر شکل شدید پلاستیک برای نانو ساختار کردن و بهبود خواص مکانیکی سطح از جمله تنش پسماند فرایند کوبش التراسونیک (UPT) است. با شبیه سازی و ساخت ابزار ارتعاشی التراسونیک و نصب آن بر روی دستگاه تراش، عملیات UPT بر روی نمونه های آماده شده از جنس فولاد گرافیتی GSH48 غلتک های نورد انجام گرفت. تنش پسماند نمونه ها توسط دستگاه پراش پرتو ایکس از سطح تا عمق 0.5 میلیمتر در فواصل مساوی 0.1 میلیمتر اندازه گیری شد که نتایج حاکی از وجود تنش پسماند فشاری، در حدود 0.4 میلیمتر از سطح نمونه بعد از عملیات UPT است و میزان تنش پسماند در سطح نمونه در حدود 405MPa - می باشد

جدول 6 نتایج حاصل از پیک های پراش پرتوی ایکس

θ	β	$\sin\theta$	$\beta \cos\theta$	شماره پیک
22.367	0.00467	0.3803	0.00432	1
30.5389	0.00574	0.5081	0.00495	2
41.1393	0.00766	0.6578	0.00577	3
49.3883	0.00961	0.7591	0.00626	4

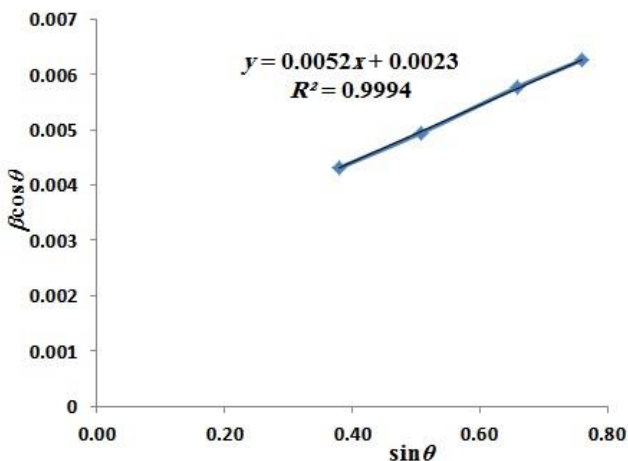


Fig. 11 Williamson-Hall linear diagram

شکل 11 نمودار خطی ویلیامسون- هال

بر روی نمونه بعد از عملیات UPT انجام گرفت که نمودار پراش پرتو ایکس مطابق شکل 10 از سطح نمونه حاصل شد.

با استفاده از الگوی پراش پرتوی ایکس و معادله 11، رابطه ویلیامسون- هال می توان اندازه دانه و کرنش را بدست آورد. در این رابطه طول موج پرتو ایکس (λ)، اندازه دانه، β پهناي پیک در نیمه ارتفاع آن بر حسب رادیان و θ زاویه ی براگ می باشد [26].

$$\beta \cos\theta = \frac{0.9\lambda}{d} + 2\varepsilon \sin\theta \quad (11)$$

معادله ویلیامسون- هال را می توان به صورت $Y = aX + b$ در نظر گرفت که اگر داده های مربوط به $\beta \cos\theta$ بر حسب $\sin\theta$ برای چندین پیک الگوی پراش پرتو ایکس در زوایای مختلف، رسم شود بایستی بر روی یک خط راست واقع شوند که از روی شیب آن کرنش و از روی عرض از مبدا آن اندازه دانه تعیین می شود که چنین خطی به نمودار ویلیامسون- هال موسوم است. برای داشتن پهناي پیک در نیمه ارتفاع (β) منحنی هر پیک حاصل از پراش پرتوی ایکس با استفاده از نرم افزار سیگما پلات¹ ترسیم شد و پیک ها با تابع گاوس² چهار متغیره که شبیه ترین تابع به شکل پیک است برازش شد. با برازش چهار پیک اول پراش پرتوی ایکس، ضریب برازش (b) از فرمول ریاضی هر پیک بدست آمد. برای بدست آوردن پهناي پیک در نیمه ارتفاع (β) بر حسب رادیان، ضریب برازش در عدد 0.0411 ضرب می شود. مقدار θ زاویه ی براگ از نرم افزار ایکس پرت³ از نمودار پراش پرتو ایکس حاصل شد.

نتایج حاصل از چهار پیک اول پراش پرتوی ایکس در جدول 6 آورده شده است. نمودار $\beta \cos\theta$ بر حسب $\sin\theta$ که نمودار خطی ویلیامسون- هال

جدول 5 تنظیمات دستگاه پراش پرتو ایکس برای پراش پرتوی ایکس

1.54060	طول موج پرتو $k\alpha_1$ کده
1.54443	طول موج پرتو $k\alpha_2$ کده
1.39225	طول موج پرتو $k\beta$ کده
مس	آند تیوب
30 mA - 40Kv	مشخصات ژنراتور
0.3mm	پهناي پرتو تابیده شده
پیوسته	نحوه تابش پرتو اشعه ایکس
10.025	زاویه شروع آنالیز (2θ)
156.975	زاویه شروع آنالیز (2θ)
0.05	اندازه هر مرحله (2θ)

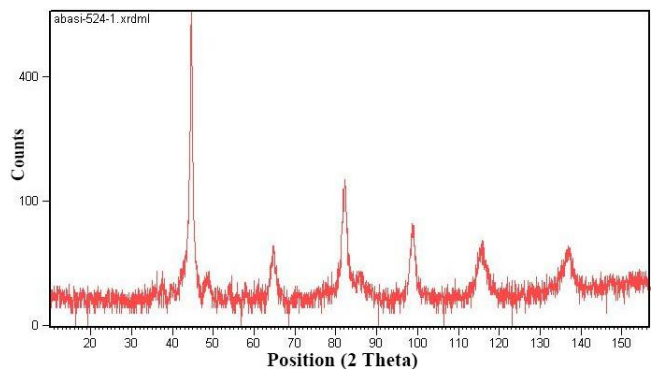


Fig. 10 Diagram of X-ray diffraction

شکل 10 نمودار پراش پرتو ایکس

¹ Sigma plot
² Gaussian
³ X Pert

- 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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, No.1, pp. 465-468, 2005.
- [11] 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.
- [12] 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, No. 1, pp. 136-144, 2012.
- [13] 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, No.1, pp. 392-399, 2013.
- [14] 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.
- [15] 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, No.1, pp. 330-335, 2012.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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)
- [19] X. J. Cao, Y. S. Pyoun, R. Murakami, Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surfacemodification, *Applied Surface Science*, Vol. 256, No. 21, pp. 6297-6303, 2010.
- [20] N. Hansen, Hall-Petch relation and boundary strengthening, *Scripta Materialia*, Vol. 51, No.8, pp. 801-806, 2004.
- [21] 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, No.1, pp. 106-113, 2012.
- [22] P. S. Prevey, X-ray Diffraction Residual stress Technique, *Metals Handbook.10, Metals park: American Society for Metals*, pp. 380-392, 1986.
- [23] M. M. Hall, The Approximation of Symmetric X-Ray Peaks by Pearson Type VII Distributions, *Journal of Applied Crystallography*, Vol. 10, No.1, pp. 66-68, 1977.
- [24] M. E. Hilly, Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction, *SAE J784a*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, pp. 19,1971.
- [25] G. K. Williamson, W. H. Hall, X-ray line broadening from filed aluminum and wolfram, *Acta Metall*, Vol. 22, No. 1, pp. 22-31, 1953.
- [26] Y. T. Prabhu, K. V. Rao, V. S. S. Kumar, B. S. Kumari, Synthesis of ZnO Nanoparticles by a Novel Surfactant Assisted Amine Combustion Method, *Advances in Nanoparticles*, Vol. 2, No. 1, pp. 45-50, 2013.

برای نمونه قبل از عملیات UPT تنش پسماند در سطح 66 MPa و به صورت کششی است. نتیجه شبیه سازی عددی تنش پسماند بعد از فرایند کوبش التراسونیک با نتیجه تجربی همخوانی داشت. با شبیه سازی عددی می توان پارامترهای موثر در فرایند کوبش التراسونیک را با توجه به خواص مکانیکی جنس نمونه در حالت بهینه انتخاب کرد و نتایج آن را مشاهده نمود. همچنین در زمان و هزینه صرفه جویی شده و مرجع مناسبی برای اجرای تجربی فرایند بر روی قطعه کار می باشد. تنش های پسماند فشاری که در سطح نمونه بعد از فرایند کوبش التراسونیک ایجاد می شوند به مقاومت قطعه در برابر خستگی و جلوگیری از رشد ترک کمک می کنند.

محاسبه اندازه دانه سطح بعد از عملیات کوبش التراسونیک از روی الگوی پراش پرتو ایکس با استفاده از رابطه ویلیامسون - هال انجام گرفت که اندازه دانه 60.2 نانومتر حاصل شد. این کاهش اندازه دانه در ساختار سطح به دلیل چینش مجدد نایبایی ها در اثر ارتعاش با فرکانس بالا و تغییر شکل شدید پلاستیک بعد از عملیات UPT رخ می دهد. طبق رابطه هال - پیچ با کاهش اندازه دانه، تنش تسلیم و سختی افزایش می یابد که منجر به بهبود خواص مکانیکی قطعه کار می شود.

غلتک های نورد اهمیت خاصی در خط نورد دارند که ایجاد تنش پسماند فشاری و ریزدانه شدن ساختار سطح باعث افزایش طول عمر غلتک های نورد و راندمان تولید می شود.

7- تشکر و قدردانی

نویسندگان از همکاری شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان، شرکت چدن سازان و دانشگاه صنعتی اصفهان تشکر می نمایند.

8- مراجع

- [1] J. H. Auld, G. B. Greenough, Residual lattice strains in iron single crystals, *Acta Metallurgica*, Vol. 2, No. 2, pp. 209-213, 1954.
- [2] A. k. Ramos, Residual stress measurements in hexagonal zinc films from X-ray peak shift analysis, *Vacuum*, Vol. 28, No. 2, pp. 100, 1978.
- [3] G. Albertini, G. Bruno, B. D. Dunn, F. Fiori, W. Reimers, J. S. Wright, Comparative neutron and X-ray residual stress measurements on Al-2219 welded plate, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 224, No. 1-2, pp. 157-165, 1997.
- [4] I. F. Pariente, M. Guagliano, Contact fatigue damage analysis of shot peened gears by means of X-ray measurements, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 3, pp. 964-971, 2009.
- [5] K. Nishioka, T. Hanabusa, H. Fujiwara, Theory of the X-ray residual stress analysis, *Scripta Metallurgica*, Vol. 8, No.12, pp. 1349-1350, 1974.
- [6] P. Zhang, J. Lindemann, Influence of shot peening on high cycle fatigue properties of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80, *Scripta Materialia*, Vol. 52, No.1, pp. 485-490, 2005.
- [7] I. Cho, G. Song, C. Kim, A. Nobuhide, A. Combs, J. Park, C. M. Suh, J. H.