

## تحلیل تجربی فرآیند نورد سطحی به همراه ارتعاشات فراصوت

محمد کی منش<sup>۱</sup> و حامد رضوی<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه فنی و مهندسی گلپایگان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۰۳)

### چکیده

فرآیند نورد سطحی به همراه ارتعاشات فراصوت (UASR)، یکی از برجسته‌ترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید و ایجاد ساختار ریزدانه می‌باشد. هدف از این مقاله این است که تأثیر ارتعاشات فراصوت در فرآیند نورد سطحی، به‌طور تجربی مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، هورن موردنظر جهت ارتعاش مود طولی طراحی و ساخته شد که در آن هورن (ابزار) می‌تواند با اعمال فشار استاتیک و همچنین ضربات دینامیکی، در خواص مکانیکی سطح فلز، تغییر ایجاد کند. آزمون تجربی برای سه نمونه CK15، CK45 و CK60 (کم کربن، متوسط کربن و پرکربن) با حضور و بدون حضور ارتعاشات فراصوت انجام گردید. میکرو سختی سطحی نمونه‌ها بعد از انجام فرآیند UASR، نسبت به حالت معمولی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد هرچه فشار استاتیک بالاتر باشد، میکرو سختی سطحی نمونه‌ها افزایش بیشتری می‌یابد، ضمن این که اعمال ارتعاشات فراصوت در فرآیند UASR نیز می‌تواند میکرو سختی سطحی را با افزایش قابل توجهی مواجه نماید. از طرفی مشاهدات تجربی نشان داد که اثرگذاری ارتعاشات فراصوت بر فرآیند نورد سطحی، در نمونه‌های پرکربن بیشتر است. سپس طی مقایسه‌ای نسبی، عمر خستگی برای سه جنس ذکر شده، با دامنه‌های ارتعاشی مختلف بررسی شد که بهبود عمر نسبی خستگی در فرآیند UASR خصوصاً در دامنه‌های ارتعاشی بالاتر نشان داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** فرآیند نورد سطحی به همراه ارتعاشات فراصوت، UASR، ریزسختی سطحی، عمر نسبی خستگی

## Experimental Study of Ultrasonic Assisted Surface Rolling Process

M. Keymanesh and H. Razavi

Mechanical Engineering Department  
Golpayegan University of Technology

(Received: 11/July/2016 ; Accepted: 25/September/2017)

### ABSTRACT

Ultrasonic assisted surface rolling (UASR) process is one of the most prominent methods to create severe plastic deformation and fine-grained structures. The aim of this paper is to study the ultrasonic vibration effects in surface rolling process, experimentally. In this regard, the desired horn was designed and manufactured in order to vibrate at longitudinal mode, which the proposed horn is able to change the mechanical properties of the metal surface by applying static pressure and dynamic impacts. Experimental tests were performed for three samples: CK15, CK45 and CK60 (Low, medium and high carbon) with and without applying ultrasonic vibrations. Micro surface hardness tests of samples were compared before and after UASR. The results showed that the higher static pressure leads to the higher micro surface hardness of samples. In addition, the use of ultrasonic vibrations in UASR can cause considerable rise in micro surface hardness. Based on the experimental results, it was found that, applying ultrasonic vibrations in surface rolling process are more effectiveness specifically in high carbon samples. Fatigue life investigation in various amplitudes showed the relative fatigue life improved in UASR process, especially in high vibrations amplitudes.

**Keywords:** Ultrasonic Assisted Surface Rolling Process, UASR, Micro Surface Hardness, Relative Fatigue Life

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: keymanesh.mohammad@gut.ac.ir

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): razavi@gut.ac.ir

## ۱- مقدمه

به طور کلی اندازه متوسط دانه‌های کریستالی مواد، نقش بسیار مهمی و به عبارت بهتر، نقش کلیدی در خواص مکانیکی و فیزیکی آنها دارد. استحکام مواد پلی کریستال با اندازه دانه  $d$ ، به وسیله رابطه هال-پچ قابل بیان است. این رابطه تنش تسلیم  $\sigma_y$  را به صورت زیر نشان می‌دهد [۱]:

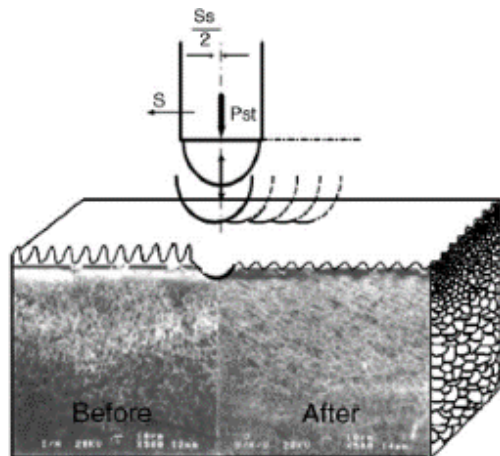
$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

که در آن،  $\sigma_0$  تنش اصطکاکی و  $k_y$  ثابت تسلیم است. رابطه (۱) نشان می‌دهد که استحکام ماده با کاهش اندازه دانه افزایش می‌یابد. تغییر شکل‌های پلاستیک بسیار زیاد تمایل دارند تا به صورت باندهای برشی محلی ظاهر شوند. چنین باندهایی دانه‌های درشت اولیه را به ریزدانه‌ها و یا شبکه‌های نابجایی تبدیل می‌کند، همچنین جهت‌گیری کریستوگرافی بعضی از ریزدانه‌ها را تا حدی تغییر می‌دهد. از این رو می‌توان آنها را به صورت دانه‌های جدید و مجزا از همسایگان خود در نظر گرفت [۱]. یکی از فرآیندهایی که در آن تغییرات قابل توجهی در ریز ساختار اتفاق می‌افتد و باعث کاهش اندازه دانه می‌شود، تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) است [۲].

مکانیزم تشکیل ساختار نانومتری در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید همانند روش آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد چنانچه تغییر شکل پلاستیک بر روی ماده چندین بار تکرار شود، دانه‌های اولیه به طور مکرر به دانه‌های کوچک‌تر تقسیم و تا مقیاس چند نانومتر کوچک می‌شوند [۳]. تغییر شکل پلاستیک شدید به منظور بهبود خستگی، خوردگی، اصطکاک، سایش و افزایش سختی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴-۶]. از جمله روش‌هایی که تحت عنوان SPD شناخته می‌شوند می‌توان به فشار پیچشی [۷]، پرس در کانال زاویه دار با مقاطع یکسان (ECAP) [۸]، اکستروژن تناوبی [۹] و فرآیند فورج سرد با فراصوت اشاره کرد [۱۰]. در این فرآیندها دانه‌های سطحی ارتباط آشکاری با مواد پایه نداشته [۱۱] و در همه‌ی موارد ثابت شده است که امکان کاهش اندازه دانه‌های سطحی در مواد به زیر چند میکرومتر وجود دارد [۱۲-۱۴]. یکی از راه‌های امیدوار کننده برای تغییر شکل پلاستیک شدید در مقیاس صنعتی، پژوهش بر روی فرآیند UASR و توسعه آن می‌باشد. در این پژوهش، براساس روش

وانگ [۱۵]، فرآیند نورد سطحی به همراه ارتعاشات فراصوت انجام شده است. در این فرآیند به طور همزمان از نیروی استاتیک و ضربات دینامیکی برای متاثر کردن سطح فلزات با یک ابزار کروی شکل از جنس سخت استفاده می‌شود. اعمال ارتعاشات فراصوت بر روی سطح فلز باعث تغییر شکل پلاستیک شدید در سطح می‌گردد که باعث ایجاد یک لایه نانو ساختار در سطح فلز می‌شود. این لایه نانو ساختار به همراه کار سختی و تنش پسماند ایجاد شده در سطح موجب بهبود خواص مکانیکی قطعه از جمله استحکام خستگی و میکرو سختی سطحی می‌شود. در شکل ۱ نما شماتیکی از چگونگی انجام عملیات UASR بر روی سطح فلز نشان داده شده است.

در شکل ۱، ابزار کروی شکل، در اثر نیروی استاتیک ( $P_{st}$ ) در سطح فرو می‌رود. سپس هم‌زمان نیروی دینامیکی ( $P_d$ ) به نیروی استاتیک اضافه می‌شود و ابزار با سرعت ثابت ( $S$ ) روی سطح حرکت داده می‌شود. در اثر این فرآیند تا عمق مشخصی دانه‌بندی ساختار سطحی قطعه ریزتر شده و در بهترین حالت اندازه دانه به  $50\text{nm}$  می‌رسد [۱۰].



شکل (۱): شماتیک فرآیند UASR [۱۰].

در سال ۱۹۵۵، تحقیقات بسیاری در خصوص اثر ارتعاشات فراصوت بر تغییر شکل فلزات آغاز شد. بلاها و لانجنکر [۱۶]، اولین افرادی بودند که اثر ارتعاشات فراصوت را در پلاستیسیته فلزات مشاهده کردند. آنها ارتعاشات فرکانس بالا را به یک نمونه کریستالی اعمال نموده و کاهش قابل توجهی در تنش تسلیم و تنش جریان را مشاهده نمودند. این پدیده اغلب به عنوان اثر بلاها یا اثر اکستو پلاستیک [۱۶] شناخته شده است. اثر اکستو پلاستیک، کاهش تنش جریان در طول تغییر

به همراه مقدار کار سختی قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود. همچنین تحت بارگذاری خستگی، بخشی از تنش پسماند فشاری و کار سختی در سطح نمونه آزاد می‌شود [۲۶].

فرآیند نورد سطحی به همراه ارتعاشات فراصوت، فناوری جدیدی است و کاربرد وسیعی در صنایع مختلف می‌تواند داشته باشد. در سال‌های اخیر، توجه به فرآیند UASR بیشتر شده و نیاز به تحقیقات کامل‌تر احساس می‌شود. در این پژوهش بررسی بهبود خواص مکانیکی با اعمال ارتعاشات مکانیکی در فرآیند نورد سطحی مورد توجه قرار می‌گیرد. مهم‌ترین ویژگی این روش ایجاد تغییر شکل شدید مواد بدون تغییر سطح مقطع آن است. ثبات سطح مقطع این اجازه را به ما می‌دهد که با اعمال فرآیند UASR با دامنه‌های مختلف و حتی تغییر فشار استاتیک برای دستیابی به ساختاری به اندازه کافی ریز را داشته باشیم، بدون آن که شکل قطعه ساخته شده دستخوش تغییر گردد. این تحقیق، مکانیزم فرآیند UASR طراحی و ساخته شده و به بررسی تغییر خواص مکانیکی پس از اعمال ارتعاشات، پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از انجام فرآیند UASR برای جنس‌های پرکاربرد در صنعت با درصد کربن‌های متفاوت (سه نمونه فولادی کم کربن CK15، متوسط کربن CK45 و پر کربن CK60) استخراج و ارائه می‌شود تا تأثیر فرآیند UASR بر بهبود میکرو سختی سطحی، عمر نسبی خستگی و ریز ساختار، این آلیاژها به دست آید.

## ۲- طراحی سامانه فراصوت

در این بخش به طراحی، ساخت و مونتاژ سامانه UASR پرداخته می‌شود. هدف، اعمال ارتعاشات فراصوت به هورن و سپس انتقال به قطعه کار می‌باشد. توسعه و به‌کارگیری ارتعاشات فراصوت با فرکانس بالا در فرآیند شکل‌دهی نیاز به استفاده از اجزا مافوق صوت و طراحی درست جهت انتقال ارتعاشات از مبدل به هورن و نهایتاً به قطعه کار می‌باشد. در این مجموعه هورن باعث تقویت دامنه مورد نظر می‌شود که در این پژوهش به همان ابزار فرآیند UASR می‌باشد. طراحی باید به‌گونه‌ای باشد که کل مجموعه و هر کدام از اجزاء ارتعاشی در فرکانس  $20\text{ kHz}$ ، به صورت نیم موج (تحریک در فرکانس طبیعی مود اول طولی) نوسان کنند. جنس هورن، فولاد Mo40 با نوک سخت‌کاری شده است. با توجه به اصول طراحی هورن، مکانیزم موردنظر با ۵ المان با استفاده از

شکل با نرخ کرنش ثابت است. این مکانیزم می‌تواند به‌غیر از حجم به سطح فلزات هم نسبت داده شود [۱۷].

تحقیقات بسیاری توسط محققان بر روی اعمال ارتعاشات فراصوت انجام شده که اثرات مفیدی مانند کاهش نیروی فرآیند، کاهش تعداد مراحل فرآیند و بهبود سطح گزارش شده است [۲۳-۱۸]. هاباشی و همکارانش به مدل‌سازی المان محدود پرداختند که روند شبیه‌سازی آنها هم‌خوانی کامل با نتایج تجربی داشت. در شبیه‌سازی از یک مدل متقارن محوری استفاده شد و ارتعاشات شعاعی و محوری به قالب اعمال گردید که کاهش شکستگی سیم، بهبود وضع روانکاری و مقاومت بهتر از نتایج آنها بود. مورا کاوا و همکارانش اثر ارتعاشات شعاعی و محوری را بررسی کردند. آنها اثبات کردند سرعت بحرانی به‌طور قابل توجهی با اعمال ارتعاشات فراصوت افزایش می‌یابد و اثر ارتعاشات شعاعی بسیار موثرتر از ارتعاشات محوری است [۲۴].

فرآیند UASR با ایجاد یک لایه نانو ساختار و تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی سطح فلز باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شوند. سو و همکارانش اولین افرادی بودند که نام این فرآیند را UCF نهادند. وی نتایجی از جمله افزایش تنش پسماند فشاری، بهبود خواص سایش و کاهش ضریب اصطکاک پس از اعمال فرآیند UCF را به دست آورد. همچنین نشان داد که دانه‌های سطحی با اندازه‌ای در حد  $50\text{ nm}$  ایجاد شده و افزایش سختی تا عمق خاصی از مقطع پس از فرآیند UCF ادامه خواهد داشت که ناشی از ریز شدن دانه‌بندی در سطح و مقدار کمی کار سختی می‌باشد. همچنین نتایج ایجاد شده بر روی یک کاربرد صنعتی پیاده‌سازی گردید که بهبود خواص مکانیکی در آن اثبات شد [۱۰].

گروه ژاپنی به سرپرستی کائو نتایج مشابهی تحت نام UNSM ارائه کردند که ارتعاشات مافوق صوت بر روی فولاد S45C طی این تحقیق اعمال شد. نتایج نشان داد که هر چه تعداد ضربه بر واحد سطح بیشتر باشد، استحکام و کیفیت سطح بیشتر و زبری سطح کمتر می‌شود. تنش پسماند پس از انجام فرآیند افزایش بیشتری یافت [۲۵].

اثر فرآیند UNSM توسط شریف و همکارانش بر میکرو ساختار نزدیک سطح، تنش پسماند و استحکام خستگی فولاد آستنیتی AISI304 بررسی شد. نتایج نشان داد که با اعمال این فرآیند، تنش پسماند فشاری زیادی روی سطح نمونه

انتخاب گردید. بخش تجربی در این مقاله به دو قسمت تقسیم‌بندی می‌شود: ریزسختی‌سنجی و مقایسه نسبی عمر خستگی؛ البته تصاویری با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر توسط میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌های دوار نیز گرفته شد. در آماده‌سازی نمونه‌ها، استانداردهای موردنظر رعایت گردید. نمونه‌های شفت دوار و نمونه‌های آزمون خستگی جهت انجام فرآیند UASR، تراشکاری شد تا هرگونه ناهمواری دیگر از سطح قطعه‌کار برطرف گردد. نمونه‌هایی دوار با توجه به ابعاد موردنظر همچنین نمونه‌های تست خستگی با توجه به استاندارد ISO1143 تهیه گردید. بعد از آماده‌سازی ظاهری نمونه‌ها طبق استاندارد (از نظر ابعادی)، نمونه‌ها سنگ زده شده و پرداخت سطح عالی با سطح کاملاً براق را ارائه داد. دلیل انجام عملیات سنگ‌زنی این بود که کلیه شیارها، زبری‌ها و ترک‌های ناشی از تراشکاری که محل مناسبی برای تمرکز تنش و رشد ترک می‌باشد، به‌نحو شایسته‌ای حذف شود. سپس نمونه‌ها تحت عملیات نرماله قرار گرفته تا در حین عملیات UASR دارای ساختار یکنواخت، همگن و عاری از هرگونه تمرکز تنش باشد. مطابق نظام‌نامه ASM، دمای نرماله برای سه نمونه CK15، CK45 و CK60 و مدت آن ارائه شده است [۲۷]، که در انجام فرآیند مذکور، پروسه علمی آن کاملاً رعایت گردید. سپس نمونه‌های مورد نظر بعد از صیقلی کردن (حذف لایه اکسید)، آماده برای انجام تست‌های اصلی فرآیند می‌باشند. نمونه‌های آماده شده نهایی، به‌همراه سامانه ارتعاش ساخته شده جهت انجام تست تجربی در شکل ۲ نشان داده شده است.

نرم‌افزار ABAQUS طراحی و ساخته شد. سوار کردن هورن بر روی سامانه تراش از اهمیت خاصی برخوردار است، به‌دلیل این‌که مبدل ارتعاشات به ابتدای هورن متصل شده و در حین فرآیند نباید هیچ قید جابجایی بر مبدل اعمال شود. همچنین سطحی که برای مونتاژ هورن و مبدل در نظر گرفته می‌شود از لحاظ ارتعاشی بایستی نقطه‌ای خنثی باشد، به‌عبارتی امواج رفت و برگشت باید در این سطح همدیگر را خنثی کرده و تشکیل گره ارتعاشی بدهند. از این‌رو موقع ثابت کردن هورن/بوستر، پله‌ای در محل گره ارتعاشی تعبیه شده است که بتوان به‌کمک یک فلنج، جهت نصب بر روی میز دستگاه تراش، استفاده نمود. در نهایت استفاده از فلنج در نقاط گره، امکان گیره‌بندی در مونتاژ را می‌دهد و اختلالی در انرژی امواج و نیز مود ارتعاشی ایجاد نخواهد کرد. بالاتر از نقطه مونتاژ، مبدل و بخشی از بوستر قرار گرفته است. فلنج دو وظیفه اساسی را بر عهده دارد، نخست اینکه نقطه گره سامانه ارتعاشی را گیره‌بندی کند و سپس بتواند نیروی استاتیک موردنظر و دلخواه را به ابزار و قطعه‌کار انتقال دهد. بنابراین در حین فرآیند، امواج به خوبی از داخل بوستر و هورن عبور کرده و باعث ایجاد ضربات مکانیکی به‌همراه نیروی استاتیکی به سطح قطعه‌کار می‌گردد.

### ۳- آماده‌سازی نمونه

جهت انجام آزمون تجربی و بررسی اثر ارتعاشات فراصوت در فرآیند UASR، فولادهایی با درصد کربن‌های مختلف از جنس CK15، CK45 و CK60 به‌عنوان مواد مورد نظر



شکل (۲): نمونه‌های تست خستگی و ریزسختی‌سنجی، به‌همراه سامانه ارتعاشی UASR.

## ۴- طراحی آزمایش

براساس پارامترها و فاکتورهای ذکرشده در دو جدول بالا، عملیات نورد سرد به کمک ارتعاشات فراصوت مطابق با جدول طراحی آزمایش ۳ و ۴ (طبق استاندارد فاکتوریل کامل)، برای دو تست خستگی و تست ریزسختی سنجی انجام گردید.

**جدول (۳):** طراحی آزمایش برای تست میکرو سختی سنجی.

شماره آزمایش	جنس قطعه کار	دامنه ارتعاش (A) ( $\mu\text{m}$ )	فشار استاتیک (P) (bar)
۱	CK15	نمونه خام (بدون عملیات)	
۲	CK15	نورد سطحی معمولی	۰/۶
۳	CK15	۱۰	۰/۶
۴	CK15	۲۰	۰/۶
۵	CK15	۳۰	۰/۶
۶	CK15	نورد سطحی معمولی	۱/۲
۷	CK15	۱۰	۱/۲
۸	CK15	۲۰	۱/۲
۹	CK15	۳۰	۱/۲
۱۰	CK45	نمونه خام (بدون عملیات)	
۱۱	CK45	نورد سطحی معمولی	۰/۶
۱۲	CK45	۱۰	۰/۶
۱۳	CK45	۲۰	۰/۶
۱۴	CK45	۳۰	۰/۶
۱۵	CK45	نورد سطحی معمولی	۱/۲
۱۶	CK45	۱۰	۱/۲
۱۷	CK45	۲۰	۱/۲
۱۸	CK45	۳۰	۱/۲
۱۹	CK60	نمونه خام (بدون عملیات)	
۲۰	CK60	نورد سطحی معمولی	۰/۶
۲۱	CK60	۱۰	۰/۶
۲۲	CK60	۲۰	۰/۶
۲۳	CK60	۳۰	۰/۶
۲۴	CK60	نورد سطحی معمولی	۱/۲
۲۵	CK60	۱۰	۱/۲
۲۶	CK60	۲۰	۱/۲
۲۷	CK60	۳۰	۱/۲

در این پژوهش، از دستگاه تراش به همراه سامانه ارتعاشی UASR، برای انجام نورد سطحی استفاده شد. برای این منظور هورن در فرکانس طبیعی خود یعنی  $20\text{ kHz}$  ارتعاش می‌کند و با همزمان فشار استاتیک به قطعه در حال دوران اعمال می‌شود. جنس هورن، فولاد آلیاژی Mo40 است که نوک کروی آن  $55\text{ HRC}$  سخت شده است. در ادامه دو سری آزمایش تست ریزسختی سنجی و تخمین نسبی عمر خستگی انجام می‌شود که هدف از آن، بررسی میزان تأثیر گذاری فرآیند UASR در نمونه‌هایی با درصد کربن متفاوت می‌باشد. از این‌رو، جهت دستیابی به نتایج مناسب، ابتدا عوامل و پارامترهای موثر معرفی می‌گردد. پارامترهای فراوانی بر انجام فرآیند و نیز کیفیت نمونه پس از عملیات موثر است. در جدول‌های ۱ و ۲ خلاصه‌ای از پارامترهای ثابت و متغیر و مقادیر انتخابی آنها در انجام فرآیند UASR ارائه شده است که انتخاب این مقادیر پس از انجام تعداد زیادی عملیات روی نمونه‌های مختلف فولادی، همچنین در نظر گرفتن نیازهای مطرح شده در بالا و نیز مقالات مرجع به دست آمده است.

**جدول (۱):** پارامترهای ثابت در انجام فرآیند UASR.

مقدار	فاکتورهای ثابت
۹۰ rpm	سرعت دوران نمونه تست سختی سنجی
۳۵۵ rpm	سرعت دوران نمونه تست خستگی
۰/۱۱ mm/rev	نرخ پیشروی
۴۴ mm	قطر نمونه تست سختی سنجی
۲۰ mm	قطر ساچمه
Mo40	جنس ابزار (هورن)
۲۰ kHz	فرکانس مبدل
۰/۸ bar	فشار استاتیک تست خستگی

**جدول (۲):** پارامترهای متغیر در انجام فرآیند UASR.

فاکتورهای آزمایش	سطوح فاکتورها
جنس نمونه‌ها	CK15, CK45, CK60
دامنه ارتعاشات فراصوت	$10, 20, 30\ \mu\text{m}$
فشار استاتیک تست سختی سنجی	۰/۶, ۱/۲ bar

## ۵- نتایج و بحث

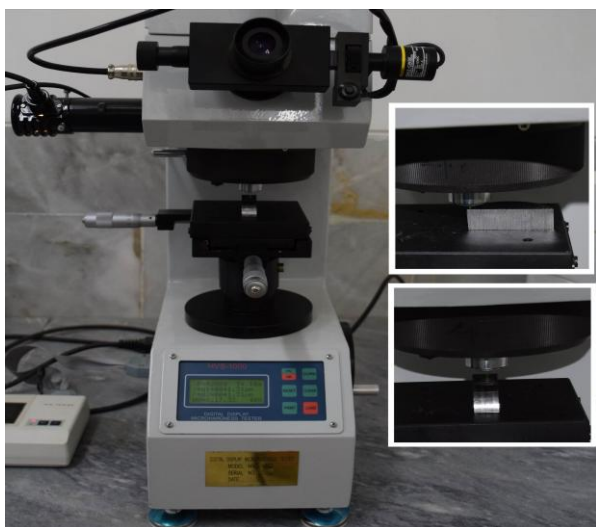
در این بخش به ارائه نتایج ریزسختی ویکرز، تصاویر میکروسکوپی و آزمون‌های خستگی پرداخته می‌شود.

### ۵-۱- آزمون ریزسختی سنجی ویکرز

در این پژوهش به‌منظور تعیین اثرات پارامترهای مختلف UASR روی کیفیت مکانیکی سطوح، سطح نمونه‌های به‌دست‌آمده، تحت آزمون ریزسختی سنجی ویکرز قرار گرفت. از آنجا که اثرات تغییر شکل پلاستیک شدید در سطح قطعات پس از عملیات UASR، به چند میکرون محدود می‌شود، لذا برای رعایت دقت بیشتر، به‌جای ماکروسختی از ریزسختی سنجی استفاده شد. به این ترتیب این امکان فراهم گردید تا سختی سنجی در نقاط بیشتری در سطح انجام گردد و دقت نتایج بهتر شود.

شکل ۴، نمونه‌ای از فرآیند آماده‌سازی و اندازه‌گیری ریزسختی توسط دستگاه ریزسختی سنجی ویکرز دیجیتال با مدل HVS-۱۰۰۰ را نشان می‌دهد.

تنظیمات دستگاه سختی سنجی ویکرز طبق استاندارد به نحوی تنظیم گردید که بار فرو رفتن ایندنتور (هرم مخروطی فرو رونده)،  $200\text{ gf}$  و زمان تثبیت  $10\text{ sec}$  باشد. ابعاد گودال به‌کمک میکرومتر تعبیه شده بر روی دستگاه ریزسختی و نشانگرهای موجود در میکروسکوپ، اندازه‌گیری شده و درنهایت با استفاده از کاتالوگ دستگاه، میزان سختی ویکرز، به‌دست آمد.

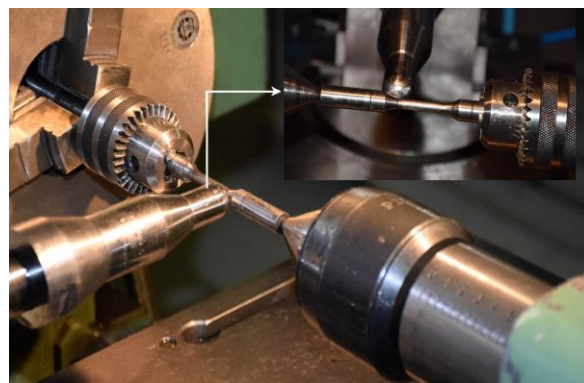


شکل (۴): دستگاه ریزسختی سنجی دیجیتالی ویکرز.

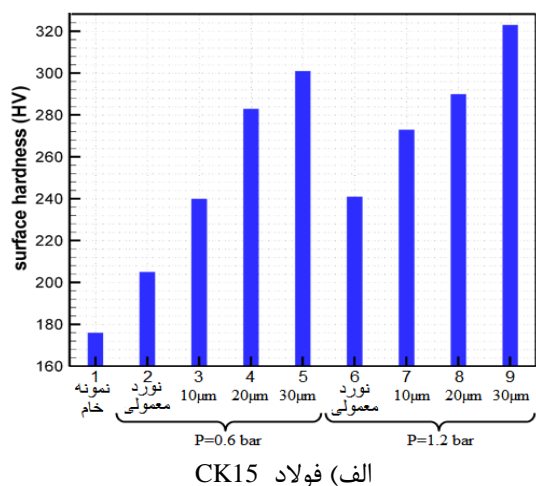
### جدول (۴): طراحی آزمایش برای تست خستگی.

شماره آزمایش	جنس قطعه‌کار	دامنه ارتعاش (A) ( $\mu\text{m}$ )	فشار استاتیک (P) (bar)
۱	CK15	نمونه خام (بدون عملیات)	
۲	CK15	نورد سطحی معمولی	۰/۸
۳	CK15	۱۰	۰/۸
۴	CK15	۲۰	۰/۸
۵	CK15	۳۰	۰/۸
۶	CK45	نمونه خام (بدون عملیات)	
۷	CK45	نورد سطحی معمولی	۰/۸
۸	CK45	۱۰	۰/۸
۹	CK45	۲۰	۰/۸
۱۰	CK45	۳۰	۰/۸
۱۱	CK60	نمونه خام (بدون عملیات)	
۱۲	CK60	نورد سطحی معمولی	۰/۸
۱۳	CK60	۱۰	۰/۸
۱۴	CK60	۲۰	۰/۸
۱۵	CK60	۳۰	۰/۸

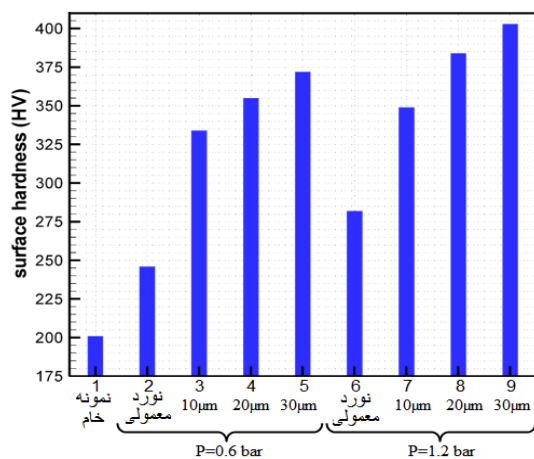
روش انجام عملیات UASR روی نمونه‌های تست خستگی در شکل ۳ نشان داده شده است. بعد از انجام عملیات، قطاعی از نمونه‌های سختی سنجی در طول قطعه با اره به آرامی بریده شده و به‌منظور پرهیز از افزایش دما و تغییرات ساختاری نمونه در حین برش از روان کار استفاده گردید. سپس قطاع بریده شده یک‌بار دیگر به‌صورت برش در سطح مقطع، به قطعات متعددی برش خورده و پس از صیقلی کردن بسیار نازک (در حقیقت پاک‌سازی سطح)، نمونه‌ها تحت ریزسختی سنجی در سطح خارجی قرار گرفتند و به‌دلیل مشکلات و هزینه بالا، از سختی سنجی در عمق قطعه صرف‌نظر گردید.



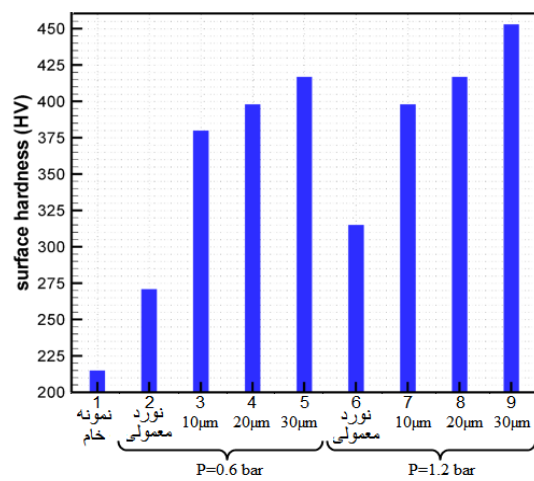
شکل (۳): انجام فرآیند UASR روی سطح نمونه تست خستگی.



الف) فولاد CK15



ب) فولاد CK45



ج) فولاد CK60

شکل (۵): نتایج ریزسختی‌سنجی نمونه‌ها (طبق جدول ۳)، برای فشارهای استاتیک و دامنه‌های ارتعاشی مختلف:

الف) CK15، ب) CK45 و ج) CK60.

نخستین نتایجی که در این جا ارائه می‌شود، مربوط به آزمون ریزسختی‌سنجی نمونه‌های فولادی می‌باشد. به این منظور سختی به دفعات متعدد در سطح نمونه اندازه‌گیری شد و پس از میانگین‌گیری نتایج آن در شکل ۵ ارائه گردیده است. همچنین در جدول ۵ نیز مقایسه نتایج مجدداً ارائه شده است.

با توجه به فاکتورهای آزمایش ذکر شده در بخش قبل، نتایج آزمایش وابسته به پارامترهایی همچون فشار استاتیک، دامنه نوسانات و جنس نمونه‌ها می‌باشد. مطابق شکل ۵، مشاهده می‌شود که با افزایش فشار استاتیک، سختی سطحی در نورد سطحی بدون ارتعاشات فراصوت (نورد معمولی) و همچنین در نورد سطحی با ارتعاشات فراصوت روند افزایشی قابل توجهی نسبت به نمونه خام به همراه داشته است. همچنین با افزایش دامنه نوسانات در فرآیند نورد سطحی به همراه ارتعاشات فراصوت، سختی سطحی نمونه‌ها، روند افزایشی در پی دارد.

لازم به ذکر است مطابق با جدول ۵، با افزایش درصد کربن در نمونه‌ها نیز درصد افزایش سختی سطحی یا به عبارت بهتر، اثرگذاری ارتعاشات فراصوت افزایش یافته است.

افزایش سختی نشان داده شده در جدول ۵، ناشی از دو موضوع است: یکی ریزدانه شدن سطح نمونه تا مقیاس چند نانو [۱۰] که خود مهمترین عامل افزایش سختی طبق قانون هال-پچ<sup>۱</sup> محسوب می‌شود. دوم، کار سختی ناشی از تغییر شکل شدید پلاستیک (لهیدگی سطح توسط بار استاتیک و نوسانات مافوق صوت) می‌باشد. در حقیقت افزایش سختی در سطح بر اثر ریزدانه شدن سطح و نیز افزایش سختی به دلیل پدیده کار سختی اتفاق می‌افتد.

سو و همکاران مشاهده نمود که سختی نمونه از ۵۰۰ ویکرز به ۷۰۰ ویکرز در فرآیند UASR افزایش یافته است [۱۰]. همچنین بیشترین افزایش سختی در سطح برای نمونه S45C توسط کائو به میزان ۱۰۰ درصد گزارش گردیده است [۲۵].

جدول (۵): مقایسه نتایج میکرو سختی سطحی نمونه‌ها.

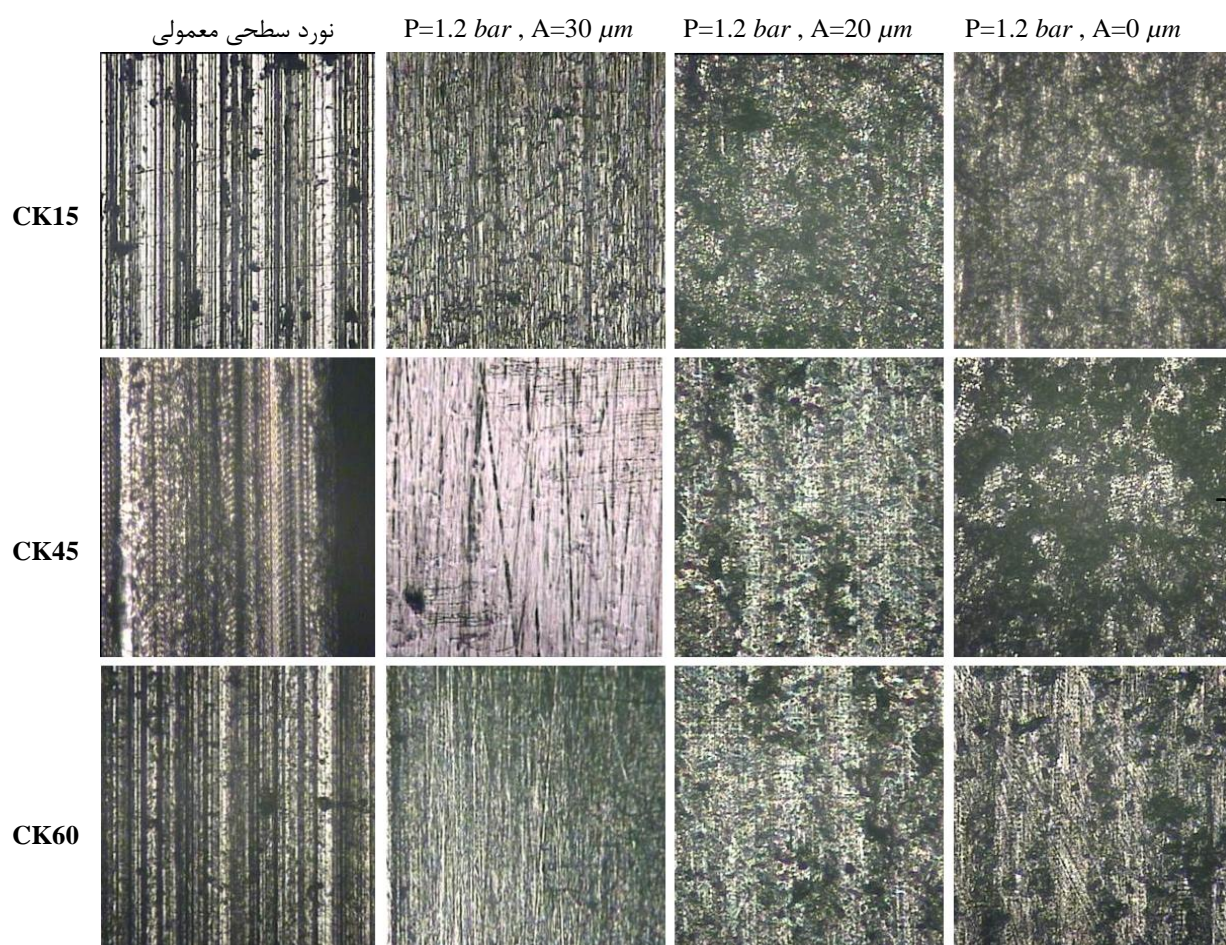
نمونه	سختی نمونه خام (HV)	فشار استاتیک (bar)	بدون اعمال ارتعاشات فراصوت		با اعمال ارتعاشات فراصوت*	
			درصد افزایش سختی سطحی (HV)	درصد افزایش سختی سطحی	درصد افزایش سختی سطحی (HV)	درصد افزایش سختی سطحی
CK15	۱۷۸	۰٫۶	۲۰۵	٪۱۵	۳۰۱	٪۶۹
			۲۴۱	٪۳۵	۳۲۳	٪۸۱
CK45	۲۰۰	۰٫۶	۲۴۶	٪۲۳	۳۷۲	٪۸۶
			۲۸۳	٪۴۲	۴۰۲	٪۱۰۱
CK60	۲۱۵	۰٫۶	۲۷۱	٪۲۶	۴۱۷	٪۹۳
			۳۱۵	٪۴۷	۴۵۳	٪۱۱۰

\* (ماکزیمم) مقدار ریزسختی سطحی در اعمال ارتعاشات با دامنه (ماکزیمم)  $A=20 \mu m$ ، گزارش شده است.

## ۲-۵- مشاهدات تصاویر میکروسکوپی

در این بخش به بررسی سطح کار شده نمونه‌های آزمایش به کمک تصاویر میکروسکوپ نوری پرداخته می‌شود. همه مراحل مطابق با روش ارائه شده در قسمت آماده‌سازی نمونه انجام شد. این تصاویر توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 100X گرفته شده است. مطابق شکل ۶، اثر فشار و دامنه نوسان

ارتعاشات فراصوت در توپوگرافی سطح نشان می‌دهد که با افزایش فشار استاتیک و دامنه ارتعاش، نمونه از لحاظ ظاهری سطحی صاف‌تر خواهد داشت، زبری سطح کمتر شده و کیفیت آن بهبود می‌یابد. البته توصیه نویسندگان، انجام متالوگرافی سطح و مشاهده اندازه دانه در نمونه‌ها تحت اثر فرآیند UASR می‌باشد.



شکل (۶): ساختار سطح نمونه‌ها بعد از عملیات UASR با بزرگنمایی 100X.

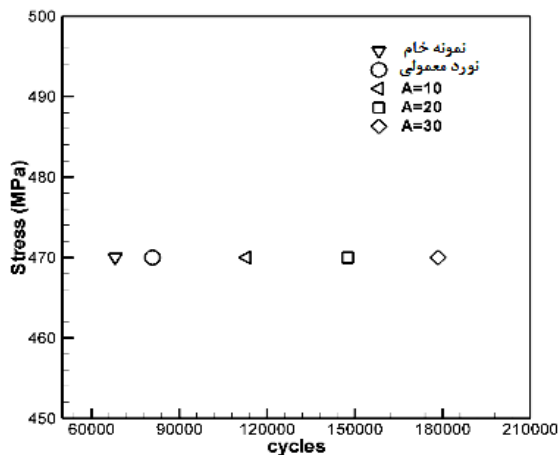


## ۵-۳- آزمون خستگی

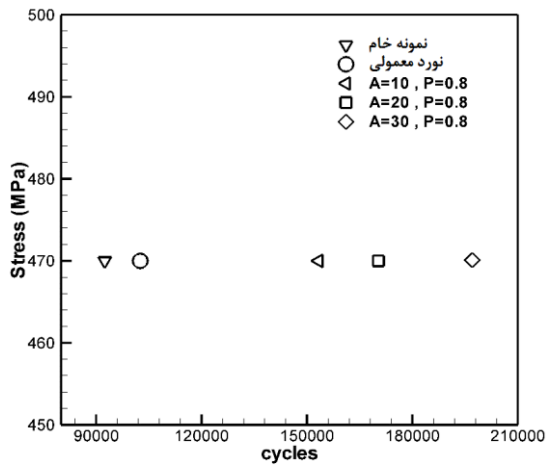
خستگی از جمله مهم‌ترین عوامل تخریب مواد مهندسی و به خصوص فلزات است. اصطلاح خستگی به این خاطر استفاده می‌شود که در این حالت تخریب بعد از تعداد نوسانات طولانی صورت می‌گیرد و بنابراین ممکن است مدت زمانی طول بکشد تا قطعه بشکند. شکست از طریق پدیده خستگی مانند شکست ترد است و قطعه قبل از شکست، تغییر شکل زیاد و قابل مشاهده‌ای نشان نمی‌دهد. شکست با جوانه‌زنی و رشد ترک همراه است و سطح مقطع شکست براساس نوع تنش متغیر خواهد بود. تنش اعمالی می‌تواند به صورت کشش، فشار، خمش یا پیچش باشد. به هر حال تنش اعمالی به صورت دوره‌های تکرار شونده بر جسم، به مرور زمان باعث شکست خستگی قطعه می‌گردد.

در انجام تست خستگی، نوع تنش اعمالی و مقادیر آن طوری انتخاب می‌شود که بتوان شرایط آزمایشگاهی را با شرایط کاری تطبیق داد و از داده‌های آزمایشگاهی به منظور استفاده در شرایط عملی استفاده نمود.

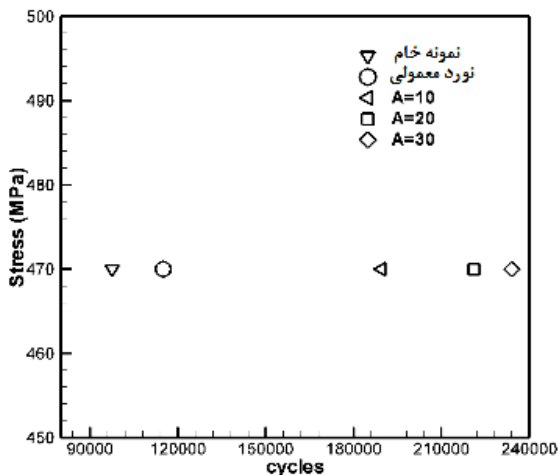
در این بخش تأثیر ارتعاشات فراصوت بر روی عمر خستگی (نسبی) نمونه‌های UASR شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این رو در ابتدا عملیات UASR روی نمونه‌های موردنظر با درصد کربن‌های مختلف و دامنه‌های ارتعاشی مختلف، انجام گردید. سپس نمونه‌ها در مقایسه با یکدیگر و در شرایط یکسان تحت شکست خستگی قرار گرفتند و عمر خستگی به طور نسبی تعیین و گزارش گردید. جهت انجام تست خستگی از دستگاه خستگی چهار نقطه سنتام<sup>۱</sup> استفاده شد. در تمام آزمایشات، بار  $13\text{kg}$  به عنوان بار متمرکز خمشی ثابت و یکسان به دستگاه تست خستگی جهت ایجاد تنش  $470\text{MPa}$  اعمال گردید تا شکست نمونه‌ها در شرایط آزمون یکسان و البته در محدوده میان چرخه اتفاق بیفتد. همچنین فرکانس  $50$  هرتز برای بارگذاری دورانی دستگاه انتخاب شد. در شکل ۷، نتایج به دست آمده روی قطعات با دامنه‌های مختلف ارتعاشات فراصوت، نشان داده شده است.



الف) فولاد CK15



ب) فولاد CK45



ج) فولاد CK60

شکل (۷): نتایج عمر خستگی نسبی نمونه‌ها (طبق جدول ۴)، تحت فشار استاتیک ثابت  $P=0.8\text{ bar}$  و دامنه‌های ارتعاشی A مختلف، (الف) CK15، (ب) CK45 و (ج) CK60.

۳- همچنین بررسی‌های میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌ها انجام شد که اثرات ظاهری حرکت ابزار نورد و ضربات مکانیکی ناشی از ارتعاشات فراصوت به خوبی مشاهده می‌شود.

۴- آزمون عمر نسبی خستگی روی سطح نمونه‌های مذکور تحت تنش  $470\text{ MPa}$  با فشار ثابت و دامنه‌های ارتعاشی مختلف انجام شد. نتایج نشان داد اعمال ارتعاشات فراصوت باعث بهبود چشم‌گیر عمر نسبی نمونه‌های خستگی شده است.

## ۷- مراجع

1. Valiev, R.Z. and Langdon, T.G. "Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement", *Progress in Materials Science*, Vol. 51, No. 7, pp. 881-981, 2006.
2. Cabibbo, M., Scalabroni, C., and Evangelista, E. "Effects of Severe plastic Deformation Induced by Equal Channel Angular Pressing in the AA1200, AA5754, AA6082 and AA6106 Modified with ZR and ZR+ SC", *Metallurgical Science and Technology*, Vol. 24, No. 12, pp. 166-171, 2013.
3. Kozlov, R.E., Ivanov, Y.F., Lian, J., Nazarov, A., and Baudelet, B. "Deformation Behaviour of Ultra-Fine-Grained Copper", *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 42, No. 7, pp. 2467-2475, 1994.
4. Wang, Z., Tao, N., Li, S., Wang, W., Liu, G., and Lu, J. "Effect of Surface Nanocrystallization on Friction and Wear Properties in Low Carbon Steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 352, No's. 1-2, pp.144-149, 2003.
5. Roland, T., Reirant, D., Lu, K., and Lu, J. "Fatigue Life Improvement through Surface Nanostructuring of Stainless Steel by Means of Surface Mechanical Attrition Treatment", *Scripta Materialia*, Vol. 54, No 11, pp.1949-1954, 2006.
6. Raja, K., Namjoshi, S., and Misra, M. "Improved Corrosion Resistance of Ni-22Cr-13Mo-4W Alloy by Surface Nanocrystallization", *Materials Letters*, Vol. 59, No. 5, pp. 570-574, 2005.
7. Valiev, R.Z. "Structure and Mechanical Properties of Ultra-Fine-Grained Metals", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 234, No. 97, pp. 59-66, 1997.
8. Lee, J.C., Seok, H.-K., and Suh, J.-Y. "Microstructural Evolutions of the Al Strip Prepared by Cold Rolling and Continuous Equal Channel Angular Pressing", *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 16, pp. 4005-4019, 2002.

نتایج نشان می‌دهد که در تمام نمونه‌ها با افزایش دامنه ارتعاشات، عمر نسبی خستگی بهبود یافته است. البته با توجه به این‌که نتایج شکل ۷، در یک تنش ثابت به دست آمده‌اند، لذا تعیین دقیق عمر خستگی طبق روال استاندارد و نیز تعیین استحکام حد دوام قابل انجام نشده است، بلکه تنها بهبود نسبی عمر خستگی مشاهده می‌شود و در این پژوهش نیز برای نشان دادن اثر ارتعاشات فراصوت در بهبود فرآیند نورد سطحی، گزارش گردیده است. علت افزایش عمر خستگی نسبی، افزایش تنش پسماند فشاری در سطح و بسته شدن ترک‌های سطحی و نیز احتمالاً ریز شدن دانه‌بندی در سطح می‌باشد. این دو عامل باعث جلوگیری از ایجاد، رشد و گسترش ترک‌ها در سطح و بهبود عمر خستگی شده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر ضربات مکانیکی ناشی از ارتعاشات فراصوت مود طولی در فرآیند UASR بررسی شده است. در این خصوص، در ابتدا سامانه UASR طراحی و ساخته شد. سپس عملیات نورد سطحی با همراهی ارتعاشات با دامنه‌های نوسان مختلف و بدون ارتعاشات بر روی سه جنس CK15، CK45، CK60 (کم کربن، متوسط کربن و پر کربن) انجام گردید. نتایج حاصل از مطالعات تجربی به صورت زیر می‌باشد:

۱- نتایج نشان داد که آزمایش، وابسته به فشار استاتیکی، دامنه نوسانات و جنس نمونه می‌باشد.

۲- در نمونه‌های CK15، CK45 و CK60، انجام عملیات نورد سطحی معمولی (بدون اعمال ارتعاشات فراصوت) و با فشار استاتیکی (۰، ۲ و ۱)، منجر به افزایش میکرو سختی سطحی به ترتیب (۱۵ و ۳۵)، (۲۳ و ۴۲) و (۲۶ و ۴۷) درصد شد. همچنین برای حالت نورد سطحی با اعمال ارتعاشات فراصوت (و بیشترین دامنه ارتعاشی)، افزایش میکرو سختی سطحی به ترتیب (۶۹ و ۸۱)، (۸۶ و ۱۰۱) و (۹۳ و ۱۱۰) درصد به دست آمد. لذا مشاهده می‌شود که با افزایش فشار استاتیکی، سختی سطحی افزایش یافته است و مهم‌تر از آن می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد کربن در نمونه‌های آزمایش، اثر گذاری ارتعاشات فراصوت در فرآیند UASR بهبود یافته است می‌یابد.

19. Pohlman, R., and Lehfeldt, E., "Influence of Ultrasonic Vibration on Metallic Friction", *Ultrasonics*, Vol. 4, pp. 178-185, 1966.
20. Bai, Y., and Yang, M. "Influence of Ultrasonic Vibration on Metal Foils Surface Finishing with Micro-Forging", *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 1475-1480, 2014.
21. Cheers, C.F. "Design and Optimisation of an Ultrasonic Die System for Forming Metal Cans", Loughborough University, 1995.
22. Kumar, V., and Hutchings, I. "Reduction of the Sliding Friction of Metals by the Application of Longitudinal or Transverse Ultrasonic Vibration", *Tribology International*, Vol. 37, pp. 833-840, 2004.
23. Izumi, O., Oyama, K., and Suzuki, Y. "Effects of Superimposed Ultrasonic Vibration on Compressive Deformation of Metals", *Transactions of the Japan Institute of Metals*, Vol. 7, pp. 162-167, 1966.
24. Hayashi, M., Jin, M., Thipprakmas, S., Murakawa, M., Hung, J.-C., and Tsai, Y.-C. "Simulation of Ultrasonic-Vibration Drawing using the Finite Element Method (FEM)", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 30-35, 2003.
25. Cao, X., Pyoun, Y., and Murakami, R. "Fatigue Properties of a S45C Steel Subjected to Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification", *Applied Surface Science*, Vol. 256, pp. 6297-6303, 2010.
26. Cherif, A., Pyoun, Y., and Scholtes, B. "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, pp. 282-286, 2010.
27. Vander Voort, G.F. "ASM Handbook Vol. 9", *Asm International Materials Park, Ohio*, 2004.
9. Varyukhin, V., Beygelzimer, Y., Synkov, S., and Orlov, D. "Application of Twist Extrusion", *Materials Science Forum*, Vol. 503, pp. 335-340, 2006.
10. Suh, C.-M., Song, G.-H., Suh, M.-S., and Pyoun, Y.-S. "Fatigue and Mechanical Characteristics of Nano-Structured Tool Steel by Ultrasonic Cold Forging Technology", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 443, No 1-2, pp. 101-106, 2007.
11. Villegas, J.C., Dai, K., Shaw, L.L., and Liaw, P.K. "Nanocrystallization of a Ni CKel Alloy Subjected to Surface Severe Plastic Deformation", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 410, pp. 257-260, 2005.
12. Valiev, R., Mulyukov, R., Ovchinnikov, V., and Shabashov, V. "Mössbauer Analysis of Submicrometer Grained Iron", *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 25, No. 12, pp. 2717-2722, 1991.
13. Valiev, R.Z., Krasilnikov, N., and Tsenev, N. "Plastic Deformation of Alloys with Submicron-Grained Structure", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 137, pp. 35-40, 1991.
14. Salishchev, G.A., Imayev, R.M., Imayev, V., and Gabdullin, N. "Dynamic Recrystallization in TiAl and Ti3Al Intermetallic Compounds", *Materials Science Forum*, Vol. 113, pp. 613-618, 1993.
15. Ting, W., Dongpo, W., Gang, L., Baoming, G., and Ningxia, S. "Investigations on the Nanocrystallization of 40Cr using Ultrasonic Surface Rolling Processing", *Applied Surface Science*, Vol. 255, No. 5, pp.1824-1829, 2008.
16. Blaha, F., and Langene CKer, B. "Tensile Deformation of Zinc Crystal Under Ultrasonic Vibration", *Naturwissenschaften*, Vol. 42, 1955.
17. Fridman, H.D., and Levesque, P. "Reduction of Static Friction by Sonic Vibrations", *Journal of Applied Physics*, Vol. 30, pp. 1572-1575, 1959.
18. Winsper, C., and Sansome, D. "Study of the Mechanics of Wire Drawing with a Superimposed Ultrasonic Stress", *Proc 10th MTDR Conf, Advan in Mach Tool Des and Res, Manchester, England*, pp. 553-565, 1969.

