



Mechanical and Fine-Grain Structure Properties to Improve Ultrasonic-Assisted Surface Ball Deep Rolling of Aluminum Sheets AA6061-T6

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Bagheri-Bami A.¹ MSc,

Amini S.^{*2} PhD,

Teymouri R.² PhD

How to cite this article

Bagheri-Bami A, Amini S, Teymouri R. Mechanical and Fine-Grain Structure Properties to Improve Ultrasonic-Assisted Surface Ball Deep Rolling of Aluminum Sheets AA6061-T6. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(2):483-496.

¹Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

²Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, Kashan University, Kashan, Iran

*Correspondence

Address: Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran. Postal Code. 8731753153

Phone: +98 (31) 55912497

Fax: +98 (31) 55511121

amini.s@kashanu.ac.ir

Article History

Received: August 19, 2018

Accepted: May 30, 2019

ePublished: February 01, 2020

ABSTRACT

The ball deep rolling process is used to improve the surface properties of the workpiece. In this research, the optimum state was determined using the design of the experiment to improve the properties including optimum hardness and roughness. It was determined 3 passes and the type of traditionally and ultrasonic process and proposed regression model at the speed of 1000mm/min. In this case, it showed the hardness of 131 micro vickers and also determined minimum roughness in the mean roughness of 0.179 microns and the maximum roughness of 1.01 microns. The microstructure and tensile tests have been investigated in the optimal sample, compared to the surface topographic reference sample. The microstructure has been shown the decreases from about 30-50 microns to about 300 nanometers in thickness at about 50 microns below the surface by scanning electron microscopy. The tensile stress and percentage increase in length were determined by 10% and 29% increase, respectively by the tensile strength test. Topography has also shown the reduction of roughness by 40%. The hardness of the subsurface was studied in the thickness of the workpiece and it was compared to the same traditional and modern optimum specimen. The result showed the effect of increasing the hardness due to the of the structure fracture and strain rate.

Keywords Ultrasonic; Tensile Test; Topography; Roughness; Hardness

CITATION LINKS

[1] Surface modification by machine hammer peening ... [2] An investigation of ultrasonic nanocrystal surface modification ... [3] Analytical contact pressure model for predicting roughness of ball ... [4] Nanostructuring burnishing and subsurface shear ... [5] Grey-based fuzzy algorithm for the optimization of the ball ... [6] Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball ... [7] Development of an innovative small ball-burnishing tool embedded ... [8] Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic ... [9] Gradient nanostructure and residual stresses induced by Ultrasonic ... [10] Comparative experimental study on effects of conventional and ultrasonic deep ... [11] Deep cold rolling with ultrasonic vibrations—a new mechanical surface ... [12] Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball ... [13] Effect of surface nanocrystallization induced by fast multiple rotation rolling on ... [14] Effect of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on residual ... [15] Ductility improvement of aluminum 1050A rolled sheet by a newly designed ... [16] Experimental investigation of the effect of burnishing force on service ... [17] Improvement of the tribological properties of Al6061-T6 alloy under dry ... [18] Study on surface modification of aluminum 6061 by multiple ultrasonic ... [19] Ultrasonic-assisted ball burnishing of aluminum 6061 and AISI 1045 ... [20] Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing ... [21] The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface ... [22] Response surface methodology based desirability approach for optimization of ... [23] Experimental study on comparing intensities of burnishing and machine hammer ... [24] Wear behavior in micro and Nanostructured WC-9Co-0.7 VC cemented ... [25] The effects of ultrasonic peening on chemical corrosion behavior ... [26] Investigation of experimental and numerical simulation of residual ... [27] Steel 7225 surface ultrafine structure and improvement ... [28] Investigation of ultrasonic peening technology on the ... [29] Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface ... [30] An investigation of surface roughness of burnished ... [31] 3D analysis of surface topography in ... [32] Surface improvement of shafts by the deep ... [33] The influence of surface enhancement by ... [34] Modeling of grain refinement in aluminum ... [35] Statistical study of the effect of various machining ... [36] Minimization of the hole overcut and cylindricity ... [37] Effects of residual stress on the mechanical properties ...

خواص مکانیکی و ریزساختاری در بهبود فرآیند غلطک‌کاری ساچمه‌ای به کمک فراصوت ورق‌های آلومینیوم AA6061-T6

علیرضا باقری‌بمی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه
نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

سعید امینی* PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

رضا تیموری PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

فرآیند غلطک‌کاری ساچمه‌ای با قابلیت دورانی برای بهبود خواص سطحی قطعه کار استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از طراحی آزمایش تجربی و برای بهبود خواصی شامل سختی و زبری حالت بهینه مشخص شد. در سرعت ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، ۳ پاس و نوع فرآیند سنتی و التراسونیک و مدل پیشنهادی رگرسیون را معین کرد. در این حالت سختی ۱۳۱ میکروویکرز را نشان داده و نیز زبری کمینه را در زبری میانگین به ۰/۱۷۹ میکرون و زبری بیشینه ۰/۱ میکرون را مشخص نموده است. از نمونه بهینه و نسبت به نمونه مرجع توپوگرافی سطح، ریزساختار و آزمون کشش را مورد بررسی قرار داده است. ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از حدود ۳۰ تا ۵۰ میکرون به حدود ۳۰۰ نانومتر کاهش در ضخامت حدود ۵۰ میکرون زیر سطح را نشان داده است. آزمون کشش استحکام، تنش تسلیم و درصد افزایش طول را به ترتیب حدود ۱۰ و ۲۹٪ افزایش را مشخص کرد. توپوگرافی نیز کاهش زبری را ۴۰٪ کاهش نشان داده است. سختی زیر سطح در ضخامت قطعه مورد بررسی قرار گرفت و نسبت به نمونه مشابه بهینه سنتی و نوین نشان از تاثیر افزایش سختی متاثر از ریزشدن ساختار و نرخ کرنش داشته است.

کلیدواژه‌ها: التراسونیک، آزمون کشش، توپوگرافی، زبری، سختی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۸

*نویسنده مسئول: amini.s@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

با کمک افزایش سختی سطح در روش عملیات حرارتی نظیر نیتريددهی، کربن‌دهی یا مخلوطی از این روش‌ها می‌توان خواص سطحی مواد را بهبود بخشید. ولی با کمک روش‌های کم‌هزینه‌تر و موثرتری مثل کار مکانیکی به‌وسیله غلطک‌کاری سنتی یا روش‌های نوین مانند غلطک‌کاری التراسونیک می‌توان از خواصی به مراتب بالاتر و کنترل‌شده نیز بهره برد. علاوه بر بالابردن سختی سطحی، این روش‌ها باعث بهبود زبری سطح و پرداخت‌کاری سطوح قطعه‌کار خواهند شد [1].

روش غلطک‌کاری التراسونیک با ساچمه دورانی، روش جدیدی برای ایجاد تغییر شکل شدید پلاستیک در لایه‌های نازک زیرسطحی است. تاثیر این فرآیند را در خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد می‌توان مطالعه نمود. روش عملیات صیقل‌کاری سطح یک عملیات فورج

سرد با اعمال کارسرد و کارسختی به کمک نیروی استاتیک و دینامیکی وارده از ابزار ساچمه‌ای است. این فرآیند، باعث ایجاد ریزساختار زیرمیکرونی و حتی نانوساختار در قطعه شده و سبب بهبود خواص در مواد مختلف خواهد شد. در بررسی‌های صورت‌گرفته فرآیند، این روش را به‌صورت نانوساختارسازی سطح (Ultrasonic Nano Crystallization Surface Modification; UNSM) نام‌گذاری کرده‌اند. تاثیرات این روش بر کاهش زبری سطح، سختی در سطح و زیر سطح قطعه‌کار، به‌دست‌آوردن ابعاد نانوذرات و لایه‌های تغییر ساختار با استفاده از نرم‌افزارهای علم مواد این تغییر شکل شدید پلاستیک را نشان می‌دهد [2-4]. علاوه بر این خواص، می‌توان به بهبود خواص دیگر ماده مانند استحکام و تنش‌های ایجادشده در ماده نیز اشاره کرد. حفظ چقرمگی (Toughness) ماده و در عین حال افزایش مقاومت سایشی، سختی سطح و توزیع مناسب آن از نکات بسیار مهم قطعه‌ها است. با استفاده از آزمون کشش می‌توان تغییرات چقرمگی ماده را مشخص نمود. استحکام ماده، متاثر از عیوب سطحی، تغییرات مقطع قطعه‌کار، خواص ساختاری متفاوت و سختی مکانیکی حاصل که از کار سرد اعمالی به قطعه‌کار وارد می‌شود، است. پیدا کردن یک حالت برای سختی و زبری را می‌توان توصیفی از بهترین حالت برای این فرآیند دانست.

با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و سایر روش‌های مدل‌سازی به‌صورت کلاسیک یا هدفمند و ابتکاری، می‌توان فرآیند غلطک‌کاری را بهینه‌سازی کرد و پارامترهای مهم و موثر که نسبت به هم دارای برهمکنش هستند را مشخص کرد. برای درک این ارتباط نیاز به طراحی آزمایش‌های مختلف است. بهینه‌کردن و به‌دست‌آوردن نقطه کمینه و بیشینه هر پارامتر و بررسی رفتار مدل آماری (مثل همبستگی و آنالیز واریانس)، رفتار یک پدیده را نشان خواهد داد [5-8]. تغییر شکل شدید پلاستیک با استفاده از اندازه‌گیری کرنش‌های ایجادشده، می‌تواند راه‌گشای این مساله باشد. اندازه‌گیری ریزساختار در زیرسطح و مشخص‌نمودن لایه‌های ایجاد تغییر شکل شدید پلاستیک نیز از موارد با اهمیت برای تاثیرات ساختاری در این فرآیند است [9]. با استفاده از نرم‌افزار المان محدود می‌توان تغییرات کرنش را مشخص کرد [8, 10, 11].

غلطک‌کاری التراسونیک ساچمه‌ای با قطر ۶ میلی‌متر و غلطک‌کاری با فشار هیدرولیک مقایسه، توسط *بورانا* و گیندی صورت گرفت. روی قطعه تیتانیومی با استفاده از تغییر نیروها، سرعت‌های پیشروی و فواصل حرکتی متفاوت، آزمایش‌هایی صورت گرفت. تاثیر این فرآیند را در سختی، زبری و تنش پسماند مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان از حالتی بهینه برای این موارد ذکر شد [10]. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۰۵، نشان داده شد که در این ماده، زبری حالت التراسونیک بیشتر از حالت سنتی است. همچنین سختی در حالت التراسونیک بیشتر از حالت سنتی را نشان داده است [11].

جزر *مسا* و همکاران ابزار فرکانس بالای التراسونیک ساچمه‌ای را طراحی و همچنین بهینه‌سازی با آنالیز واریانس را برای طراحی آزمایش صورت دادند. در این آزمایش از فرکانس ۳۸/۰۹ کیلوهرتز

آمانوف و همکاران روی آلومینیوم AA6061-T6 فرآیند نانو ساختارسازی را بررسی کردند. آنها لایه‌نازک تغییر شکل شدید پلاستیک را حدود ۸۵ میکرون تخمین زدند و خواص سایشی سطح را مورد بررسی قرار دادند [17]. لی و همکاران فرآیند غلطک‌کاری التراسونیک ساچمه‌ای را روی آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از تعداد پاس بررسی کردند. آنها اعوجاج سطحی و توپوگرافی سطح را تعیین کردند و نشان دادند افزایش پاس بعد از ۴ پاس، باعث شده است تا سختی ثابت شود و دلیل این امر را اشباع نابجایی‌ها تشخیص دادند [18].

تیموری و همکاران فرآیند غلطک‌کاری التراسونیک ساچمه‌ای را بررسی کردند و با استفاده از عوامل نیرو، دامنه و پیشروی از بهینه‌سازی پاسخ سطح، حالت بهینه‌ای را برای سختی و زبری سطح آلومینیوم AA6061-T6 با ارایه مدل رگرسیون مشخص نمودند. تنش پسماند، ریزساختار، تغییرات کرنش و سختی زیرسطح را نیز مشخص نمودند. این روش با امان محدود سه‌بعدی مقایسه شد و تنش‌های پسماند را برای این ماده به دست آوردند. همچنین نرخ کرنش موثر را نشان دادند و تنش پسماند فشاری و افزایش کرنش موثر ناشی از افزایش سختی و ریزساختار را مشخص کردند [8]. امینی و همکاران در مطالعه دیگری طراحی آزمایش با تعداد پاس، سرعت و نوع فرآیند را مشخص کردند [19].

وو و همکاران شبیه‌سازی امان محدود روی فولاد S45C را برای نیروی استاتیکی و سرعت‌های متفاوت مورد بررسی قرار دادند. همچنین تاثیر این پارامترها در تنش پسماند وارد شده در نرم‌افزار و جابجایی سطحی در اثر اعمال بار را مورد تحلیل قرار دادند. با افزایش نیرو، تنش پسماند افزایش خواهد یافت و همچنین، افزایش و توزیع کرنش موثر از سطح تا زیرسطح را مشخص کردند.

آلکسیرو و همکاران بهینه‌سازی روش سنتی غلطک‌کاری ساچمه‌ای را روی آلومینیوم با استفاده از سرعت پیشروی، تعداد پاس، عمق بار و سرعت دروانی، ارزیابی کردند و حالت بهینه‌ای را با استفاده از مدل رگرسیون نشان دادند. نتایج آنها نشان داد که افزایش پیشروی باعث افزایش زبری و افزایش سرعت دورانی باعث کاهش زبری سطح شد و با افزایش پاس در سرعت‌های پیشروی و دورانی می‌توان حالت بهینه‌ای را پیشنهاد داد [6].

اسمه و همکاران روش سنتی را با استفاده از روش فازی مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار دادند. با استفاده از تعداد پاس، نیرو، پیشروی و سرعت طراحی آزمایش تاگوچی L16 مشخص شد که افزایش پاس، سختی را افزایش و زبری را کاهش داده است. در عین حال با ۳ پاس، زبری کمتری حاصل شده و مدلی برای پیش‌بینی سختی و زبری سطح در وضعیت بهینه ارایه کردند [15].

سگباس روش غلطک‌کاری سنتی ساچمه‌ای را روی آلومینیوم ۷۱۷۸ با استفاده از بهینه‌سازی پاسخ سطح مورد ارزیابی قرار داد و تاثیر پارامترهای نیرو، پیشروی، سرعت و تعداد پاس را بهینه کرد [20].

استفاده شد که سبب افزایش تعداد ضربات در فرآیند است. آنها نتیجه روی زبری سطح ماده تیتانیوم و برای آماده‌سازی روی ماده فولاد ۱۰۳۸ AISI بررسی کردند. همچنین پارامترهای تعداد پاس، دامنه و نیروی استاتیکی را بررسی کردند. آزمایش‌ها در حالت سنتی متداول و فراصوتی، صورت پذیرفت. نتایج حاکی از کاهش زبری بود که موثر از دامنه (Amplitude) التراسونیک بوده است و تعداد پاس نیز افزایش سختی را نشان داده است. برای افزایش سختی و کاهش زبری باید حالت بهینه‌ای در نظر گرفته شود بنابراین آنها نیروی حالت بهینه زبری و سختی تعداد پاس و دامنه را مشخص کردند [12].

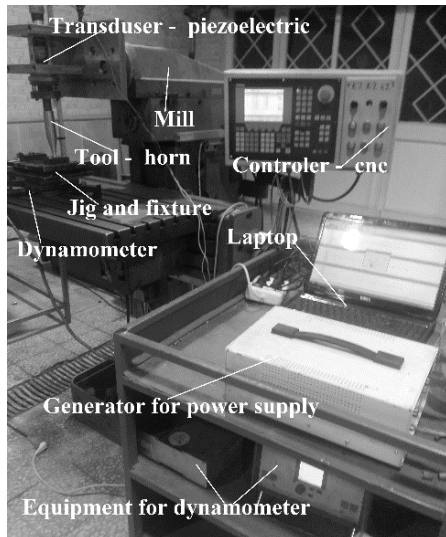
چوی و همکاران فرآیند نانو ساختارسازی ساچمه‌ای را روی فولاد کم‌کربن انجام دادند. افزایش سختی از ۱۲۰ به ۳۲۰ میکرو ویکرز در لایه‌ای نازک زیر سطح به دست آمد. آزمون کشش نیز نشان از افزایش استحکام نمونه کوبیده شده نسبت به نمونه بدون عملیات داشته است. افزایش مقاومت سایشی سطح و بهبود آن نیز بررسی شده است [13].

کاتور و همکاران بررسی روش نانو ساختارسازی سطح را بررسی کردند و آزمون کشش نشان از افزایش استحکام و کاهش درصد رشد طول یا الانگیشن (Elongation) داشته است. همچنین توپوگرافی سطح و کاهش زبری بررسی شده است. ریزساختار و نانو ساختار سطح در ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر مشخص شد و آزمون خستگی، مقاومت به سایش سطح، سختی زیرسطح و تنش پسماند فشاری ایجاد شده زیرسطح مورد بررسی قرار داده شد [14].

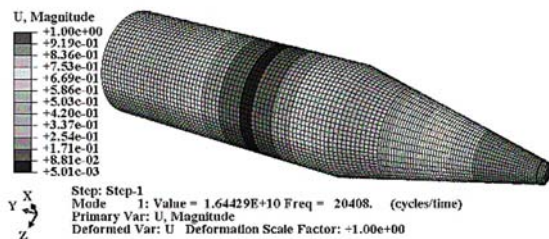
عربی و همکاران، روی آلومینیوم ۱۰۵۰ نمونه‌هایی از آزمون کشش را توسط کوبش سنتی مورد عملیات قرار دادند. تست کشش نشان از افزایش نسبی استحکام و نیز افزایش طول الانگیشن داشته است. طراحی آزمایشی به صورت بهینه‌سازی پاسخ سطح صورت گرفت و بررسی زبری سطح را نیز بهینه کردند. با استفاده از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی، تصاویر سطحی را بررسی کردند و کاهش زبری را در کمترین حالت ۰/۶۸ میکرون مشخص نمودند. آنها تنش پسماند فشاری و معادله رگرسیون بهینه‌سازی را ارایه دادند [15]. همچنین در مطالعه دیگری روی فولاد ۱۰۱۰ AISI نیز آزمون کشش را بررسی کردند و افزایش استحکام ماده را نشان دادند. تاثیر افزایش نیرو در ۳۰۰ نیوتن کمترین زبری و در ۶۰۰ نیوتن بیشترین سختی را نیز بررسی کردند و عمر خستگی و تنش پسماند را مشخص نمودند [16].

بی و همکاران روی فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۰۴ فرآیند را اعمال کردند و آزمون کشش نشان از افزایش استحکام ماده بوده است. نانو ساختار با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری مشاهده شد. با استفاده از ابزار میکروسکوپ الکترونی متفرق‌کننده، لایه‌های ریز شده را بررسی نمودند و سختی سطح و مقاومت به سایش، عمر خستگی و نیز افزایش چگالی نابجایی‌ها (Dislocation) را نشان دادند [9].

مورد استفاده، مود طولی ابزار است که برای اعمال جابجایی میکرونی و اعمال نیروی دینامیکی که توسط ارتعاشات فراصوتی مورد نظر است، باید به سطح قطعه کار وارد شد. خواص ماده فولاد در نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل مودال (Modal)، در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱) تنظیمات و تجهیزات مورد استفاده برای اعمال فرآیند



شکل ۲) آنالیز مودال برای طراحی مود طولی در فرکانس مورد نظر

جدول ۱) خواص ماده فولاد مورد استفاده در آباکوس^[2]

واحد	مقادیر	خواص
Gpa	۲۱۰	مدول یانگ (E)
Kg/m ³	۷۸۳۰	چگالی (ρ)
-	۰/۳	ضریب پواسون (ν)

در نوک ابزار، ساچمه‌ای از جنس تنگستن کارباید (Tungsten Carbide) جاسازی شده است. ساچمه از جنس سرامیکی تنگستن کارباید با سختی بالا است تا کمترین تاثیر را روی خود ساچمه ایجاد کند. برای ایجاد نیروی استاتیکی مورد نیاز در فرآیند از دینامومتر در زیر تنظیمات قید و بند استفاده شد. برای ایجاد نیروی ثابت در این فرآیند، باید ابزار به میزان ۰/۲ میلی‌متر وارد قطعه شود که معادل میانگین نیروی ۱۰۰ نیوتن است. این نیرو توسط دینامومتر ثبت شد. نمونه‌ها به صورت تک خطی هستند و نمونه‌های با اعمال برنامه چندخطی در فواصل مشخص روی قطعات آزمون کشش و روی قطعات با سطح تخت اعمال می‌شوند.

سلمی و همکاران روش التراسونیک را در سرعت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. سرعت بهینه را با استفاده از طراحی آزمایش و مدل پارتنو نشان دادند. آنها سرعت ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه را برای تاثیر فرآیند مناسب دانستند و برای کاهش زمان فرآیند سرعت ۵۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه را پیشنهاد دادند^[21].

پاتل و برهمبات با روش بهینه‌سازی روی آلومینیوم ۶۰۶۱، تاثیر پارامترهای سرعت، تعداد پاس، پیشروی و فواصل تداخلی را مورد ارزیابی قرار دادند و حالت بهینه پاسخ سطح را برای زبری سطح مشخص نمودند. نتایج نشان داد افزایش پاس زبری را کاهش داده است و پاس سوم زبری از پاس پنجم مقدار کمتری را معین کرده است و همچنین عوامل موثر و سطح پاسخ را مشخص کردند^[22]. در این پژوهش سعی شد مقایسه‌ای بین عملیات غلطکاری التراسونیک و سنتی ساچمه‌ای روی ورق ۲ میلی‌متری آلومینیوم AA6061-T6 صورت پذیرد و تاثیر تعداد پاس و سرعت پیشروی در سرعت‌هایی که پیش‌تر مورد ارزیابی نبوده، سنجیده شود. همچنین ابعاد نانوساختار با استفاده از نرم‌افزارهای متالورژیکی با دقت مناسب، ارزیابی لایه تغییر شکل، سختی و زبری، توپوگرافی سطح و تاثیر این فرآیند روی استحکام ماده، مورد ارزیابی قرار گیرد و مدل رگرسیون برای پیش‌بینی و تطبیق حالت تجربی بررسی شده و حالتی بهینه، نشان داده شود.

۲- آماده‌سازی فرآیند

۲-۱- آزمایش تجربی

دستگاه با کمک خط‌کش‌ها، عملگرها و شیرهای کنترلر هیدرولیک (که در آن تعبیه شده و امکان حرکت به صورت خودکار را داده) و کلگی دستگاه با یک سری تنظیمات برای اتصال به تراگذار (Transducer) ساخته شده و روی آن نصب شده است. با نرم‌افزار پاورمیل (Power Mill)، برنامه‌هایی برای اجرای حرکت ابزاری گرفته شده است. علاوه بر این توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس (ABAQUS) ابزار شیبوره فراصوتی طراحی و مود طولی آن مشخص شد. ابزار توسط پیچ مغزی روی کلگی دستگاه که تراگذار التراسونیک روی آن مونتاژ شده، نصب شد. توسط دستگاه ژنراتور سیگما ساخت ایران با توان ۱۰۰۰ کیلووات که قابلیت انتقال انرژی به ترانس دیوسر پیزوالکتریکی را دارد، انرژی از طریق بوستر به ابزار یا هورن (Horn) انتقال داده می‌شود و حرکت ابزار باعث ایجاد تغییرات در سطح قطعه کار خواهد شد. برای ساخت ابزار التراسونیک باید در نرم‌افزار تحلیلی از روش آنالیز مودال فرکانسی در بازه‌ای که دستگاه ژنراتور موجود است و می‌تواند ارتعاش تولید کند، بررسی شود. ابزار از جنس فولاد ضدزنگ فریتی با چقرمگی مناسب انتخاب شد. در این بررسی بسامد دستگاه بین ۱۷۰۰۰ تا ۲۱۰۰۰ هرتز قابل فراهم کردن است که این بازه در نرم‌افزار اعمال شد و با روش لانکوز (Lanczos) و اعمال مش‌بندی، در نهایت ابعاد به فرکانس ۲۰۴۰۰ هرتز رسانده شد.

ابزار با حالت مخروطی برای ایجاد دامنه مناسب تعبیه شد (شکل ۲). این مخروط باعث ایجاد تمرکز و افزایش دامنه خواهد شد. مود

فلوریک اسید محلول در آب به نسبت ۲۰ به ۸۰ (نسبت حجمی اسید به آب) به مدت ۴ ثانیه قرار گرفت. در مرحله بعد قطعه با آب شست‌شو داده و اچینگ در چهار مرحله برای آلومینیوم AA6061-T6 انجام شد. سپس با کمک نرم‌افزارهای متالورژیکی مثل کلمکس ویژن (Clemex Vision) می‌توان ابعاد ذرات را مشخص کرد و این نرم‌افزارها با توجه به استفاده از علم فیزیک بسیار دقیق هستند [24]. قطعه مورد استفاده از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ تحت عملیات حرارتی پیرسختی قرار داده شده است. این آلومینیوم دارای عناصر سیلیسیم و منیزیم است. این قطعات خواص بهبودیافته و کاربردی در صنایع دریایی و هوایی به دلیل مقاومت به خوردگی، سبکی و استحکام مناسب را دارند. خواص اندازه‌گیری شده برای این ماده در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲) خواص ماده دریافتی آلومینیوم AA6061-T6

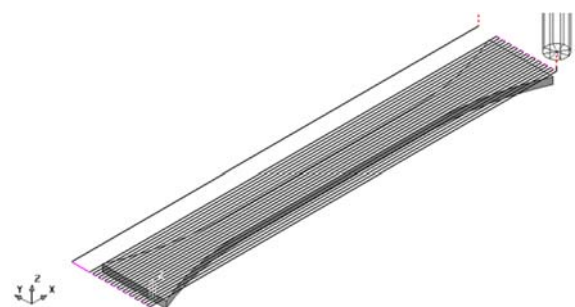
واحد	مقدار	خواص
μm	۳/۷	زبری بیشینه (Rz)
μm	۰/۴۵	زبری میانگین (Ra)
Hv0.1	۵±۱۰۵	سختی
درصد	۶/۸	افزایش طول
Mpa	۳۰۵	تنش نهایی
Mpa	۲۹۰	تنش تسلیم

برای اینکه بتوان از یک فرآیند، استفاده مناسبی در صنعت کرد، نیاز به آن است تا یک سری شرایط را به‌صورت ایده‌آل یا بهینه به‌دست آورد. روش‌های زیادی برای بهینه‌کردن وجود دارد؛ برای اینکه بتوان از یک فرآیند، استفاده مناسبی در صنعت کرد که نیاز به آن است تا یک سری شرایط را به‌صورت ایده‌آل یا بهینه به‌دست آورد. روش‌های زیادی برای بهینه‌کردن وجود دارد که در این آزمایش از روش فاکتوریال عمومی با یک پارامتر دو سطحی و دو پارامتر سه سطحی استفاده شده است. از پارامترهای پیشروی، تعداد پاس و روش سنتی و التراسونیک نوین نیز استفاده شده است که دو سطح به‌عنوان حالت سنتی و نوین و سه سطح برای پاس و پیشروی در آزمایش تعبیه شد [5-7].

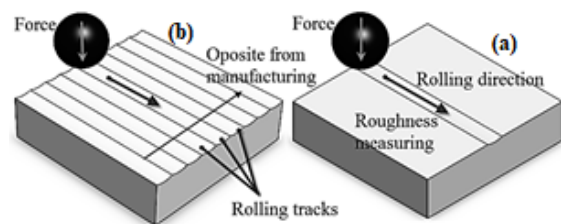
۲-۲- تئوری آزمایش

از نرم‌افزار مینی‌تیب برای تحلیل همبستگی استفاده شد و مقادیر سختی، زبری‌های میانگین حسابی و زبری ماکزیمم به نرم‌افزار داده شد. طراحی آزمایش با استفاده از پارامترهای پیشروی، تعداد پاس و حالت سنتی و نوین، صورت گرفته است. افزایش پاس باعث ایجاد کار سرد افزوده به قطعه است. پیشروی از مهم‌ترین عوامل روی زبری سطح است و با مقایسه حالت‌های سنتی و نوین نیز می‌توان از مزایا و معایب هر روش پرده برداشت. بنابراین از تعداد ۱، ۳ و ۵ پاس و پیشروی ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. سرعت‌های مورد استفاده پیش‌تر در تحقیقاتی که مطالعه شده بود، مورد ارزیابی قرار نگرفته بود. غلطک‌کاری توسط ارتعاشات التراسونیک با استفاده از نیروی پیش‌بار استاتیکی برای جلوگیری

با استفاده از نرم‌افزار پاورمیل، برنامه‌ای برای اعمال حرکت ابزار روی سطح کامل قطعات آزمون کشش مشخص شد. مسیر مورد استفاده روی قطعه آزمون کشش که تمام سطح آن را پوشش داده، در شکل ۳ و نمایش حرکت ابزار روی قطعه تک پاس و برای سطوح تخت نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. برای ایجاد سختی و خواص بالاتر در ماده باید جهت حرکت ابزار روی سطح، در خلاف جهت تولید باشد. ناحیه مورد اعمال صیقل‌کاری در نمونه تحت آزمون کشش، منطقه‌ای است که نمونه تحت آزمون کشش در آن محل شکسته خواهد شد. پاس‌های بعدی روی همان مسیر و بدون اعمال بار اضافی اعمال شد. برای حرکت روی کل سطح فواصل حرکتی در نظر گرفته شد که این فواصل ۳/۰ میلی‌متر (با توجه به قطر ابزار و توانایی دستگاه) انتخاب شد [23].



شکل ۳) مسیر حرکت ابزار در نرم‌افزار پاورمیل



شکل ۴) مدل برای نمونه تک خطی (a) و سطح منطقه فرآیند (b) [3]

نمونه‌های آزمون کشش با استفاده از دستگاه آزمون کشش گانت کشور آلمان مورد بررسی قرار گرفتند. از دستگاه سختی‌سنج Hvs-1000b کشور چین برای میکروسختی‌سنجی ویکرز در سطح و لایه‌های زیرسطح در حالتی که مقطع برش خورده استفاده شد. شرایط سختی با اعمال بار ۱ گرم و زمان تاخیر ۱۰ ثانیه لحاظ شد. از زبری‌سنج (ماهر سورف؛ آلمان) برای محاسبه زبری بیشینه و میانگین حسابی سطح تخت قطعات استفاده شد. طبق استاندارد و راهنمای دستگاه، اگر زبری بین ۰/۱ تا ۱ میکرون باشد، باید از طول کات آف (Cut of Length) ۲۵/۰ میلی‌متر در تنظیمات استفاده نمود. دستگاه توپوگراف نیز برای کیفیت سطوح قطعات استفاده شد. این نمونه با نمونه‌ای که عملیاتی روی آن انجام نشد، مقایسه شد. در این حالت، نمونه از مقطع بریده در مانت سرد قرار گرفت و پولیش‌کاری و سمباده‌کاری آن با کاغذ سمباده زیر آب انجام گرفت. سپس با استفاده از اچینگ (Etching) تحت حمله شیمیایی با

$$H = H_0 + k d^{-\frac{1}{2}} \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، H سختی ماده و H_0 سختی ماده اولیه است و افزایش سختی را با ابعاد دانه ربط داده است. با کاهش اندازه دانه، سختی ماده تحت عملیات افزایش پیدا خواهد کرد. البته باید توجه شود که این تئوری برای مواد خیلی درشت‌دانه و خیلی ریزدانه در حد چند نانومتر این کاربرد را نخواهد داشت. اندازه‌گیری دامنه ابزار هورن با استفاده از دستگاه AEC-5502A-17 اندازه‌گیری شد. ابزار در فاصله ۵/۰ میلی‌متری زیر دستگاه قرار گرفت. دستگاه با کمک اسیلیسکوپ و تجهیزات آمپلی‌فایر بر حسب ولتاژ وارد شده، مقدار دامنه را اندازه‌گیری نمود و مقدار جابجایی و دامنه، ۸ میکرون معین شد. با کاهش سرعت، تعداد ضربات به قطعه‌کار افزایش پیدا می‌کند و زبری کاهش می‌یابد این ضربات و زبری تئوری از رابطه‌های (۴) و (۵) پیروی می‌کنند [30, 31]. تعداد ضربات از رابطه (۶) مشخص شد [28, 29].

$$Ra = \frac{s^2}{32 \times r} \quad (۴)$$

$$Rz = \frac{s^2}{8 \times r} \quad (۵)$$

$$Z = \frac{60 \times v}{s} \quad (۶)$$

Ra را زبری میانگین حسابی و Rz را زبری ماکزیمم بر حسب میکرون می‌نامند. S سرعت پیشروی ابزار بر حسب میلی‌متر بر دقیقه است. r شعاع ابزار کوبش سطح است که در ماشین‌کاری نیز شعاع ابزار برش محسوب می‌شود. Z تعداد ضربات است که با کمک v (بسامد بر حسب هرتز) و پیشروی می‌توان مقادیر آن را برای هر آزمایش به دست آورد (رابطه ۶). مشخصاً با افزایش سرعت، تعداد ضربات کاهش خواهد یافت و دلیلی بر کاهش کار مکانیکی است. طبق رابطه‌های (۴) و (۵)، با افزایش پیشروی نیز زبری افزایش خواهد یافت.

جدول (۳) پارامترهای طراحی آزمایش‌ها

سطوح	نوع فرآیند	سرعت پیشروی (mm/min)	تعداد پاس
۱	سنتی	۱۰۰۰	۱
۲	التراسونیک	۳۰۰۰	۳
۳	-----	۵۰۰۰	۵

۲-۳- شبیه‌سازی المان محدود

توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس، شبیه‌سازی دوبعدی با روش حل صریح برای این فرآیند طراحی شد و مورد تحلیل قرار گرفت [32]. ابزار، قابلیت دوران حول محور خود به صورت آزادانه را دارد. به قطعه‌کار مانند حرکت میز در حالت تجربی فرز، سرعت خطی داده شد. طبق رابطه (۷) که از فرمول بسط فوریه تبعیت می‌کند، رفتار دوره‌ای ایجاد می‌شود. دسته‌بندی و مقادیر این رابطه را طبق جدول ۴ می‌توان بررسی کرد [26, 33].

$$a = A_0 + \sum [A_n \cos(L\omega(t - t_0)) + B_n \sin(L\omega(t - t_0))] \quad (۷)$$

از جداسدن ابزار از سطح قطعه‌کار و نیروی دینامیکی التراسونیک که باعث تغییر شکل شدید پلاستیک می‌شود، انجام شد که کرنش‌های شدید و تاثیر آن در ریزساختار و سختی را می‌توان نشان داد.

از روش کوبش سطح ضمن ایجاد بستری برای افزایش مقاومت به خوردگی، سایش و عمر قطعات که خواص ماده را بهبود می‌بخشد [25]، استفاده شد. در هر صورت حفظ چقرمگی و افزایش استحکام ماده از شرایط با اهمیت در صنایع است. تئوری هال-پچ (Hall-Petch) به این موضوع اشاره داشته که با کاهش اندازه دانه‌ها، استحکام و سختی ماده افزایش خواهد یافت [26, 27] و دلیل این امر، تداخل نابجایی‌ها و همچنین ایجاد فازهایی سخت در این بین است. مثل مارتنزیت مکانیکی یا دوقلویی‌ها که به دلیل خاص بودن این ساختار و عدم نیاز به نفوذ در شرایط کار سرد نیز به وجود می‌آید. نابجایی‌ها با حرکت به سمت فضاهای با انرژی کمتر باعث ایجاد تداخل و افزایش یا حتی باعث ازبین‌رفتن یکدیگر خواهند شد و به طور کلی کار سرد باعث افزایش نابجایی‌ها خواهد شد که در این بین با ریزشدن دانه‌ها، مناطق مرزدانه‌ای افزایش داشته که سبب جلوگیری از حرکت این عیوب خواهد شد و با این حالت می‌توان افزایش استحکام ماده را مشخص نمود [9, 13, 14].

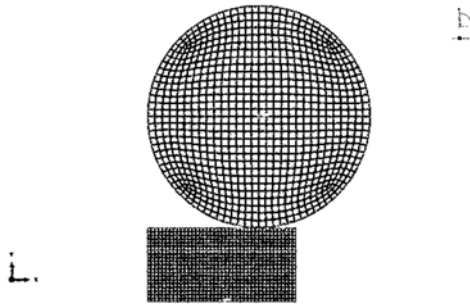
در این آزمایش نمونه‌های تک خطی برای بررسی زبری، سختی و توپوگرافی استفاده شد. در ادامه نمونه‌ها با بررسی در نرم‌افزار مینی‌تب به حالت بهینه‌ای برای فرآیند، رسیدند. این حالت را برای نمونه‌های آزمون کشش از استاندارد DIN EN 50125 برای قطعات تخت با ضخامت ۲ میلی‌متر مشخص شد. دو سمت نمونه آزمون کشش برای مقایسه با استفاده از ابزار، مورد اعمال فرآیند قرار گرفت و با استفاده از دستگاه آزمون کشش این نمونه ارزیابی شد. نیروی وارده با ابزار (توسط فرکانس ۲۰ کیلوهرتز) ارتعاش را به سطح قطعه‌کار اعمال می‌کند، این فرآیند شامل نیروی استاتیکی و نیروی دینامیکی است که از معادله (۱) پیروی کرده و نیروی کلی را تشکیل خواهد داد [26].

$$F_t = F_{st} + F_{dy} = F_{st} + q \times \sin\left(\frac{2\pi t}{\omega}\right) \quad (۱)$$

F نیروی کلی بر حسب نیوتن، F_{st} و q به ترتیب نیروی استاتیکی و دینامیکی با اندیس مشخص شده‌اند. F_{dy} نیروی دینامیکی از حالت فرکانسی (ω) حرکت دروای بر حسب دور بر دقیقه، استفاده می‌کند و در واقع از سری فوریه پیروی می‌کند که در آن ضریب کسینوسی صفر است [28, 29]. تغییر شکل پلاستیک ماده نیز از تئوری هال-پچ تبعیت می‌کند؛ در این حالت برای استحکام و سختی ماده هر کدام روابطی به صورت روابط (۲) و (۳) مشخص شده است [26].

$$\sigma = \sigma_0 + k d^{-\frac{1}{2}} \quad (۲)$$

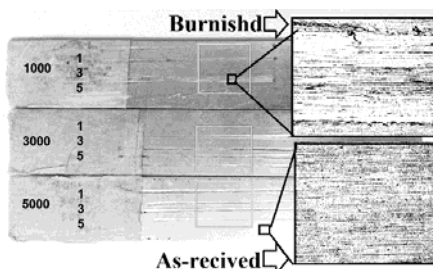
که در این رابطه σ تنش تسلیم ماده و k ضریب ثابت و d اندازه قطر دانه ماده است که افزایش استحکام با اندازه دانه رابطه عکس دارد.



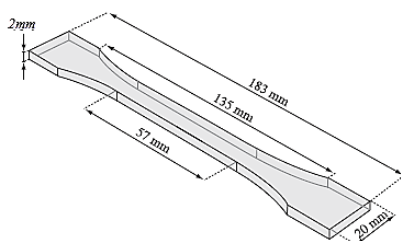
شکل ۵) مدل المان محدود با مش

۳- نتایج و بحث

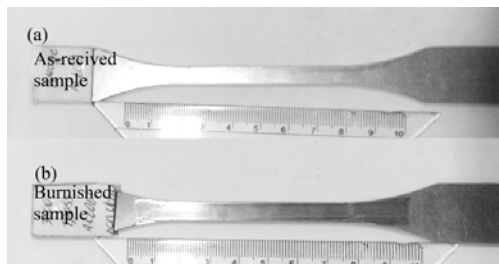
نمونه‌ها توسط ابزار ساچمه‌ای به صورت تک خطی و در تمام سطح قطعات آزمون کشش مورد عملیات قرار گرفت. در شکل ۶ تصاویر نمونه‌های تک خطی برای بررسی سختی، زبری و توپوگرافی سطح مشخص شدند و شکل‌های ۷ و ۸، نمونه‌ها و ابعاد آزمون کشش را مشخص کرده است. در شکل ۸، نمونه آزمون کشش برای کوبش کل ناحیه مورد نظر مشخص شده است. نمونه‌های آزمون کشش توسط دستگاه ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی وایرکات بریده شدند و دو سمت آن توسط کوبش سطح ساچمه‌ای مورد عملیات قرار گرفت. آزمون کشش با نرخ کرنش ۲۰ میکرو ثانیه انجام شد.



شکل ۶) نمونه‌های تک خطی روی ورق تخت



شکل ۷) ابعاد نمونه آزمون کشش



شکل ۸) نمونه آزمون کشش برای عملیات کل ناحیه (a) نمونه بدون عملیات و (b) نمونه کوبش شده

A0 را دامنه اولیه می‌نامند. Bn دامنه منحنی و ω فرکانس دایروی است. مقادیر خاصیت‌های پلاستیک ماده در نرم‌افزار با استفاده از مدل جانسون- کوک تعریف شده است [33]. در جدول ۵، خواص الاستیک ماده آلومینیوم و در جدول ۶، مشخصه‌های جانسون- کوک (خواص پلاستیک) این ماده قرار داده شده است [34]. در این شبیه‌سازی برای ساده‌سازی از حالت عدم وجود اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار استفاده شده است.

جدول ۴) پارامترهای حرکت ارتعاشی دوره‌ای [33]

°	t ₀ (s)
۱۲۵۶۶۴	ω (rev/min)
۱	L
۱	B _n
°	A ₀
°	A _n

جدول ۵) خواص الاستیک آلومینیوم [35]

۲۷۰۰	چگالی (Kg/m ²)
۶۸/۹	مدول یانگ (GPa)
۰/۳۳	ضریب پواسون

جدول ۶) خواص مواد جانسون- کوک [8]

۱	ε
۰/۰۰۲	C
۳۲۴	A (MPa)
۱۱۴	B (MPa)
۰/۴۲	n
۱/۳۴	m

پارامترهای A، B، C، m و n در رابطه (۸) ثابت‌های مواد هستند که از جداول مهندسی مواد استخراج شده‌اند [8]. T₀، T_m و T به ترتیب نقطه ذوب مواد، دمای محیط و دمای مواد هستند [34].

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right) \quad (8)$$

σ تنش سیلان ماده است، مقادیر ε کرنش سیلان و ε₀ نرخ تغییرات کرنش است. رابطه (۹) نشان‌دهنده ارتباط بین کرنش‌ها در نرم‌افزار با این مقدار است که معرف کرنش موثر است [2].

$$\overline{\varepsilon^p} = \left(\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \times \varepsilon_{ij}^p\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

ε^p همان کرنش موثر معادل (Equivalent Plastic Strain; PEEQ) در نرم‌افزار آباکوس است. ε_{ij}^p کرنش پلاستیک به دست آمده از کرنش الاستیک و کرنش تغییرات است. کرنش موثر در نرم‌افزار از قراردادن کرنش‌ها در هر راستا که در فرمول وارد شده است، به دست می‌آید. مش‌بندی دوبعدی با حالت کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده است (شکل ۵). جنس ابزار، صلب در نظر گرفته شد و مش‌بندی چهاروجهی CPE4R استفاده شده است. این مدل با تعداد ۲۴۵۶ المان‌بندی، طراحی شد.

۳-۱- نتایج‌های آماری

با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب، طراحی آزمایشی با پارامترهای دو سطحی و سه سطحی انجام شد و نتایج تجربی آزمایش‌ها در جدول ۷، نشان داده شده است که پارامتر سرعت خطی با S و پارامتر تعداد پاس با N مشخص شده است. زبری‌های سطحی نیز اندازه‌گیری شدند و طبق استاندارد برای هر نمونه ۵ بار تکرار شد و میانگین این مقادیر در جدول ۷ نشان شده است. نمونه‌های کوبش سطح سنتی (Conventional) با c و نمونه‌های التراسونیک (Ultrasonically) با u مشخص شده‌اند. نتایج رگرسیون در نرم‌افزار مینی‌تب تحلیل شده است. مقادیر رگرسیون، درصد مشارکت، جذر مجموع مربعات و مقادیر ارزشی درجه آزادی، p و f در جدول‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شد. این مقادیر با ارزش تعلق می‌شوند و تاثیر سایر عوامل موثر با هم را نیز مشخص می‌کنند.

جدول ۹) آنالیز واریانس و رگرسیون برای زبری ماکزیمم

پارامترها	p	f	درصد مشارکت	جذر مجموع مربعات	درجه آزادی
رگرسیون	۰/۰۰۲	۸/۱۸	۸۷/۹۱	۱/۵۸۸۳	۸
S	۰/۰۴۲	۵/۶۳	۳۹/۴۱	۰/۷۱۱۹۹	۱
N	۰/۰۰۲	۱۹/۸۲	۵/۶۶	۰/۱۰۲۳۱	۱
U	۰/۰۱۰	۱۰/۶۰	۳/۰۳	۰/۰۵۴۷۸	۱
S×S	۰/۱۶۵	۲/۲۸	۳/۰۶	۰/۰۵۵۳	۱
N×N	۰/۰۳۴	۶/۲۸	۸/۴۳	۰/۱۵۲۳۶	۱
S×N	۰/۸۰۳	۷/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۰۱۶	۱
S×U	۰/۶۶۶	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۰۰۴۸۴	۱
N×U	۰/۰۰۱	۰/۸۱	۲۷/۹۶	۰/۵۰۵۱۲	۱
خطا	-	-	۱۲/۰۹	۰/۲۱۸۴۳	۹

جدول ۱۰) آنالیز واریانس و رگرسیون برای سختی سطحی

پارامترها	p	f	درصد مشارکت	جذر مجموع مربعات	درجه آزادی
رگرسیون	۰/۰۰۰	۳۳/۲۳	۹۶/۷۳	۲۴۵۴/۵۱	۸
S	۰/۲۱۰	۱/۸۲	۱/۳۱	۳۳/۳۳	۱
N	۰/۰۴۹	۵/۱۵	۳۹/۷۴	۱۰۰۳/۳۳	۱
U	۰/۰۰۰	۳/۰۹	۳۳/۱۲	۸۴۰/۵	۱
S×S	۰/۰۹۵	۳/۴۸	۱/۲۷	۳۲/۱۱۱	۱
N×N	۰/۰۰۷	۱۲/۳۲	۴/۴۸	۱۱۳/۷۸	۱
S×N	۰/۳۲۲	۱/۱	۰/۴۰	۱۰/۱۳	۱
S×U	۰/۰۰۰	۶/۹۷	۱۳/۴۵	۳۴۱/۳۳	۱
N×U	۰/۰۱۹	۸/۱۲	۲/۹۶	۷۵	۱
خطا	-	-	۳/۲۷	۸۳/۱	۹

جدول ۷) نتایج تجربی به‌دست‌آمده و طراحی آزمایش فاکتوریال عمومی

ردیف	نوع فرآیند (U)	تعداد پاس (N)	سرعت پیشروی (S) (mm/min)	سختی (HV)	زبری میانگین (μm)	زبری ماکزیمم (μm)
۱	c(۱)	۱	۱۰۰۰	۱۰۶	۰/۲۶۴	۱/۷۰۳
۲	c	۱	۳۰۰۰	۱۰۹	۰/۳۱۴	۱/۹۱۳
۳	c	۱	۵۰۰۰	۱۱۳	۰/۳۴۰	۲/۱۲۴
۴	c	۳	۱۰۰۰	۱۰۹	۰/۲۳۳	۱/۱۶۱
۵	c	۳	۳۰۰۰	۱۱۳	۰/۲۸۵	۱/۷۳۴
۶	c	۳	۵۰۰۰	۱۱۶	۰/۲۹۷	۱/۹۳۴
۷	c	۵	۱۰۰۰	۱۱۹	۰/۱۹۵	۱/۱۰۴
۸	c	۵	۳۰۰۰	۱۲۲	۰/۲۴۲	۱/۳۶۸
۹	c	۵	۵۰۰۰	۱۲۷	۰/۲۴۳	۱/۴۸۳
۱۰	u(۲)	۱	۱۰۰۰	۱۲۵	۰/۲۱۰	۱/۲۰۵
۱۱	u	۱	۳۰۰۰	۱۱۸	۰/۲۵۷	۱/۶۲۵
۱۲	u	۱	۵۰۰۰	۱۱۵	۰/۲۶۷	۱/۷۳۲
۱۳	u	۳	۱۰۰۰	۱۳۱	۰/۱۷۶	۱/۰۱۰
۱۴	u	۳	۳۰۰۰	۱۲۱	۰/۲۱۸	۱/۳۶۱
۱۵	u	۳	۵۰۰۰	۱۱۹	۰/۲۱۹	۱/۳۶۸
۱۶	u	۵	۱۰۰۰	۱۵۶	۰/۲۳۸	۱/۴۷۸
۱۷	u	۵	۳۰۰۰	۱۳۶	۰/۲۸۳	۱/۸۲۷
۱۸	u	۵	۵۰۰۰	۱۳۶	۰/۳۰۷	۱/۹۳۴

مدل همبستگی، تاثیر عوامل اصلی را بیشتر نشان می‌دهد. سطح اهمیت بالای ۱۰٪ بررسی شد و در تحلیل‌ها مقدار p زیر ۰/۱ مورد قبول است [36]. جدول ۱۰ نتایج آنالیز همبستگی سختی‌ها را نشان می‌دهد که مقادیر درصد مشارکت برای نوع فرآیند (U) و تعداد پاس (N) به‌ترتیب برابر با ۳۹ و ۳۲٪ بودند؛ هرچند درصد مشارکت معیار مناسبی برای تاثیر نیست، ولی می‌توان از این معیار در مواردی که با p و f نتوان نتیجه گرفت، استفاده نمود.

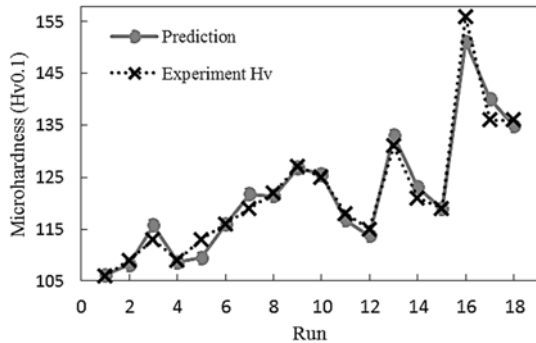
هرچند درصد مشارکت، معیار مناسبی برای تاثیر نیست، ولی می‌توان از این معیار در مواردی استفاده نمود. بنابراین با افزایش پاس و اعمال التراسونیک در فرآیند، مقدار سختی رو به افزایش است. مقدار ارزشی p نیز اگر کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد، نشان از ایجاد بزرگنمایی در فرآیند است. این شرط صفر بودن را رد کرده (یعنی بالای ۹۵٪ موثر) و عامل موثر در فرآیند است. در صورت بزرگ‌تری بودن مقدار، عامل در اطلاعات مورد نظر تاثیر کمتری برای محدود کردن فرآیند دارد. این عنصر با p بزرگتر از ۰/۰۵، عامل بی‌تاثیر در آنالیز واریانس است و می‌توان از مدل رگرسیون کنار گذاشت. همان‌طور که در معادلات رگرسیون مشخص شده، ضرایب این عوامل بسیار کوچک و قابل حذف است [18]. در جداول ۸ و ۹، مقادیر زبری نیز عامل سرعت پیشروی خود را بزرگنمایی کرده و با درصد مشارکت ۳۲٪ و در زبری ماکزیمم با ۳۹٪، عددی بسیار قابل ملاحظه را نشان داده است. رابطه (۱۰)، مدل رگرسیون پیش‌بینی زبری میانگین است که از

جدول ۸) آنالیز واریانس و رگرسیون برای زبری میانگین

پارامترها	p	f	درصد مشارکت	جذر مجموع مربعات	درجه آزادی
رگرسیون	۰/۰۰۳	۷/۶۸	۸۷/۲۲	۰/۲۸۵۲۴	۸
S	۰/۰۴۹	۵/۱۵	۳۲/۴۸	۰/۱۶۲۱	۱
N	۰/۰۰۲	۱۸/۰۶	۵/۲۸	۰/۰۱۷۲۸	۱
U	۰/۰۰۵	۱۳/۷	۹/۶۲	۰/۰۰۳۱۴۷	۱
S×S	۰/۱۴۰	۲/۶۱	۳/۷۱	۰/۰۱۲۱۳	۱
N×N	۰/۰۴۳	۵/۵۳	۷/۸۵	۰/۰۰۲۵۶۷	۱
S×N	۰/۷۹۹	۰/۰۷	۰/۱۰	۰/۰۰۰۰۳۲	۱
S×U	۰/۸۰۵	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۰۰۰۳	۱
N×U	۰/۰۰۲	۱۹/۷۸	۲۸/۰۹	۰/۰۰۹۵۸۱	۱
خطا	-	-	۱۲/۷۸	۰/۰۰۴۱۸	۹

که بر عامل اصلی پوشش دارد و تداخل‌ها برای مهم‌بودن عامل‌ها از اهمیت بالاتری برخوردارند.

$$Hv = 87.62 + 0.00376 S - 6.32 N + 22.17 U + 1 \times 10^{-6} S \times S + 1.333 N \times N - 2.81 \times 10^{-4} S \times N - 0.005333 S \times U + 2.500 N \times U \quad (12)$$



نمودار ۳) مدل پیشنهادی برای سختی سطحی

در نمودار ۳ مشاهده می‌شود که نزدیکی بالایی در مقادیر وجود دارد و روند افزایشی و بدون نویز است. مقادیر جذر میانگین مربعات نیز به‌عنوان پارامتر R^2 در نرم‌افزار مشخص شده است. R^2 در زبری متوسط، ماکزیمم و برای سختی به‌ترتیب برابر ۸۹/۹۱، ۸۷/۲۲ و ۹۶/۷۳٪ مشخص شده است. هر چه این مقدار به ۱۰۰٪ نزدیک‌تر باشد، نشان از خطای کمتر و پیش‌بینی بهتر مدل رگرسیونی است. مدل پیشنهادی با توجه به مقادیر سختی با خطای حدود ۳/۲۷٪ مقدار پایینی دارد؛ بنابراین به‌صورت دقیق، می‌تواند این مقادیر را پیش‌بینی کند. در مدل‌های زبری با خطای ۱۲/۰۹ و ۱۲/۷۸ درصدی، پیش‌بینی نسبت به سختی خطای بالایی دارد و این نشان‌دهنده توزیع غیرنرمال‌تر نسبت به سختی است که در زبری‌سنجی مقادیر با خطای بالاتری روبرو است.

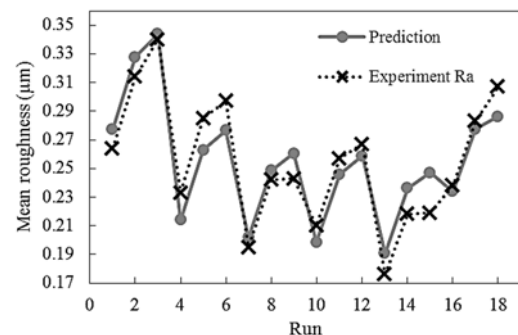
با استفاده از نرم‌افزار آماری مینی‌تب و مدل رگرسیون، قابلیت پیش‌بینی مقدار بهینه برای این مدل‌ها را می‌توان مشاهده نمود. در نمودار ۴ این پیش‌بینی و پارامترهای بهینه‌شده و بهترین عملکرد از نظر بیشترین سختی توأم با زبری کمینه را مورد ارزیابی قرار داده است. سرعت ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و تعداد ۳ پاس و نوع فرآیند التراسونیک را بهینه‌ترین حالت تعیین کرده است. نمودار ۴ نشان‌دهنده سطح پاسخ کمینه و بیشینه برای مقادیر است. مقادیر حالت بهینه و حالت تجربی آن مقایسه شده و میزان خطای موجود در جدول ۱۱ نشان داده شده است. خطا برای سختی مانند مدل پیش‌بینی، میزان پایینی حدود ۱/۴۵٪ را نشان داده و زبری‌ها حدود ۱/۴۸٪ برای زبری میانگین و تا ۱۰٪ برای زبری بیشینه، درصد خطا را معرفی کرده است. در واقع برای حالت بهینه فرآیند، حدود ۳/۶ پاس در نرم‌افزار مینی‌تب مشخص شد که در آزمایش تجربی این حالت وجود نخواهد داشت. بنابراین باید نزدیک‌ترین حالت تجربی موجود در نظر گرفته شود. نزدیکترین حالت به حالت بهینه در

طریق نتایج تجربی به‌دست آمده است. نمودارهای ۱، ۲ و ۳ نیز رابطه مقادیر تجربی و پیش‌بینی را نسبت به هم مشخص نموده‌اند.

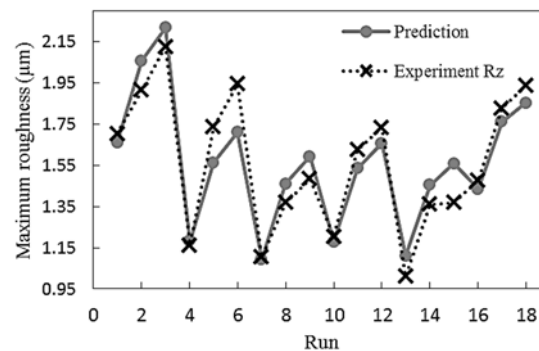
برای مقایسه بهتر داده‌های تجربی و داده‌های مدل پیش‌بینی از چنین نمودارهایی که در تحقیق نصر و همکاران، بهره برده است [36]، استفاده می‌شود. با توجه به خطای ۱۲ درصدی که پیش‌تر مشخص شد، در این مقادیر نیز می‌توان تفاوت را مشاهده نمود. در هر صورت با وجود این خطا در نمودارهای مذکور، مدل‌های مناسبی برای این مقادیر توسط نرم‌افزار در روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. رابطه (۱۱)، مدل زبری ماکزیمم را نشان داده است و در شکل ۱۰، مقادیر تجربی با مقادیر پیش‌بینی مدل مقایسه شده است.

$$Ra = 0.3933 + 4.5 \times 10^{-4} S - 0.0840 P - 0.1047 U - 0 S \times S + 0.00633 N \times N - 1 \times 10^{-6} S \times N - 2 \times 10^{-5} S \times U + 0.02767 N \times U \quad (10)$$

$$Rz = 2.422 + 3.39 \times 10^{-4} S - 0.636 N - 0.666 U - 0 S \times S + 0.0488 N \times N - 4 \times 10^{-6} S \times N - 2 \times 10^{-5} S \times U + 0.2052 N \times U \quad (11)$$



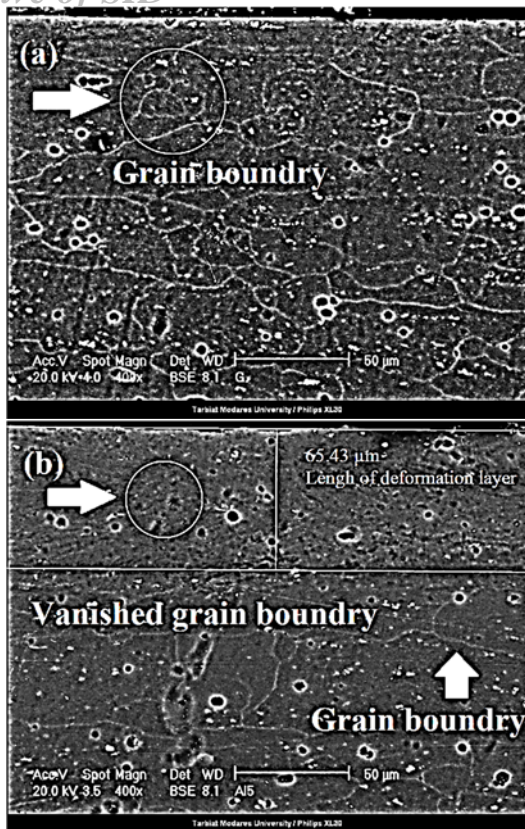
نمودار ۱) مدل پیش‌بینی زبری میانگین



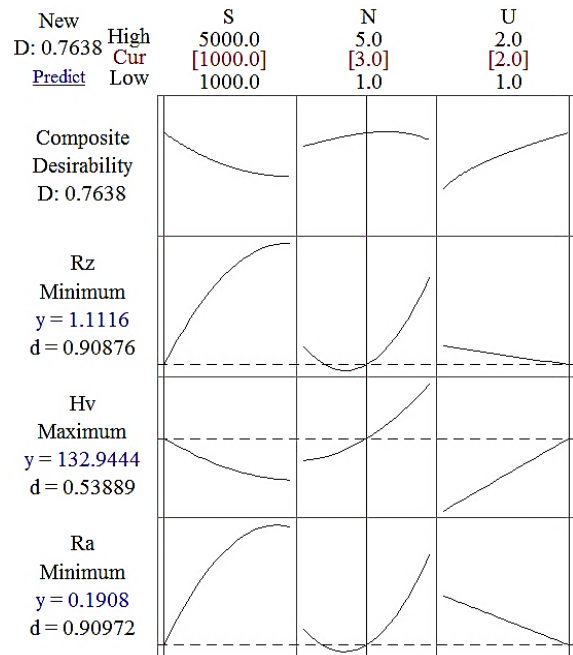
نمودار ۲) مدل پیش‌بینی زبری ماکزیمم

رابطه (۱۲) بیانگر مدل همبستگی برای نتایج سختی‌سنجی و نمودار ۳ این مدل را نمایش داده است. این مقدارهای پیش‌بینی و تجربی اندازه‌گیری‌شده، درصد خطای بسیار ناچیز ۳ درصدی را نشان داده است و دلیل آن منطبق‌بودن و نزدیکی مقدارهای تجربی و پیش‌بینی در مدل تعریف‌شده است. اثر عوامل اصلی مهم است و نشان‌دهنده این است که کدام عامل آزمایش، تاثیر روی فرآیند دارد یا ندارد. عامل‌های تداخلی نقش مهم‌تری برای تشکیل مدل رگرسیون ایفا می‌کنند؛ زیرا اثر انباشتگی عوامل اصلی روی هم را نشان می‌دهند

نرم‌افزار مینی‌تب، ۳ پاس و سرعت ۱۰۰۰ روی حالت فراصوتی مشخص خواهد شد.



شکل ۱۰) ساختار قطعات (a) بدون عملیات و (b) عملیات‌شده



نمودار ۴) شرایط بهینه فرآیند با ۳ پاس و سرعت ۱۰۰۰ و در حالت فراصوتی

جدول ۱۱) مقادیر حالت بهینه و درصد خطاها

پارامترها	سختی میکروویکرز	زبری میانگین	زبری بیشینه
مقدار پیش‌بینی	۱۳۲/۹	۰/۱۹۰۸	۱/۱۱۱۶
مقدار تجربی	۱۳۱	۰/۱۷۶	۱/۰۱
درصد خطا	۱/۴۵	۱/۴۸	۱۰/۰۵

لایه نازک تغییر شکل پلاستیک که دچار کرنش شده را ناحیه بیلبی (Bielby) گویند و حدود ۵۰ تا ۷۰ میکرون تخمین زده شد که در لبه مقطع قطعه‌کار مرز دانه‌ها، در نمونه عملیات‌شده از بین رفته و مرزی مانند نمونه بدون عملیات مشاهده نمی‌شود و کاهش ریزساختار و افزایش سختی در این ناحیه است.

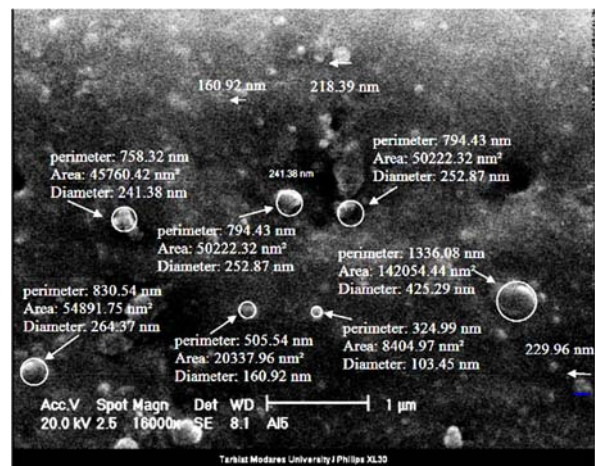
در نمودار ۵، ذره‌های واقع در شکل ۹ با نرم‌افزار کلمکس و MIP اندازه‌گیری و با تعداد ۷۱ نمونه ریزذره مشخص شده است. در نهایت، اندازه ذرات مورد ارزیابی و در قسمت آماری مشخص شد (نمودار ۵). بزرگ‌ترین ابعاد مشاهده‌شده ۳/۰ میکرون و کمترین آن حدود ۰/۱۷۶ نانومتر را نشان داده است و میانگین این ابعاد ۱۱۷±۹ نانومتر را در برداشته است که در نمودار ۵، توزیع نرمال این مقادیر نشان داده می‌شود. یک دانه مشخص‌شده در مرکز قطعه‌کار که تحت عملیات نبوده، حدود ۳۰ تا ۶۰ میکرون ابعاد داشته است. ریزشدن ساختار در حالت حجیم (Bulk) و از بالا به پایین را تغییر زیرمیکرونی (Sub-micron) می‌نامند و اصولاً دانه‌های بسیار ریز (Fine-grain) را در برخی منابع، مافوق ریزدانه (Ultra fine-grain) نیز می‌نامند که به نزدیک ساختار نانو تمایل می‌یابد. لایه تغییر شکل به این صورت برای آلومینیوم AA6061-T6 در نتایج آمانوف و همکاران مشخص شده است [17].

۳-۳- نتیجه‌های آزمون کشش

در مقایسه نمودار ۶، نمونه آزمون کشش عملیات‌شده و نمونه ماده دریافتی مشخص شد. استحکام نهایی از ۳۰۵ به ۳۳۵ مگاپاسکال رسیده و افزایش حدود ۹/۸ درصدی در استحکام نهایی داشته است.

۳-۲- نتیجه‌های ریزساختار

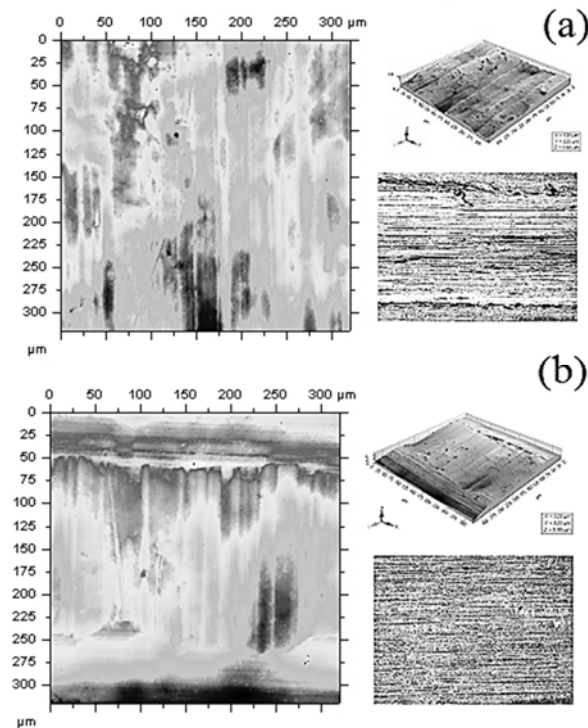
تصویر لبه قطعه‌کار عملیات‌شده با بزرگنمایی ۱۶۰۰۰X بررسی شده است (شکل ۹). ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۴۰۰X نیز در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود و مقایسه‌ای بین نمونه بهینه و نمونه بدون عملیات است.



شکل ۹) لبه قطعه عملیات‌شده با بزرگنمایی ۱۶۰۰۰X

۴-۴- نتیجه‌های کیفیت سطح

کیفیت سطح و بررسی آن برای ایجاد سطوح پرداخت از اهمیت بالایی در صنایع برخوردار است. در اینجا با استفاده از دستگاه توپوگراف نانو فوکوس نوری، ناهمواری‌های سطح مشخص شده است. نمونه بدون عملیات در شکل ۱۱ نشان داده است و کاهش زبری در نمونه‌های کوبش‌شده نسبت به نمونه بدون عملیات قابل تشخیص است. زبری بیشینه برای نمونه بدون عملیات که در شکل نشان داده شده، حدود ۵/۸ میکرون و برای نمونه کوبش‌شده ۳/۷ میکرون است. زبری کمتر، کیفیت سطح را افزایش می‌دهد که این مربوط به کاهش پستی و بلندی‌های سطحی است و به کاهش نقاط تمرکز تنش کمک می‌کند. کاهش زبری در توپوگرافی، حدود ۳۵٪ است که نسبت به نمونه اندازه‌گیری‌شده در آزمون دستگاه زبری‌سنج، اختلاف دیده می‌شود و این تفاوت از میزان طول اندازه‌گیری و کات‌آف دستگاه است و اینکه مقادیر داده‌شده، میانگین چند مقدار در اندازه‌گیری است.

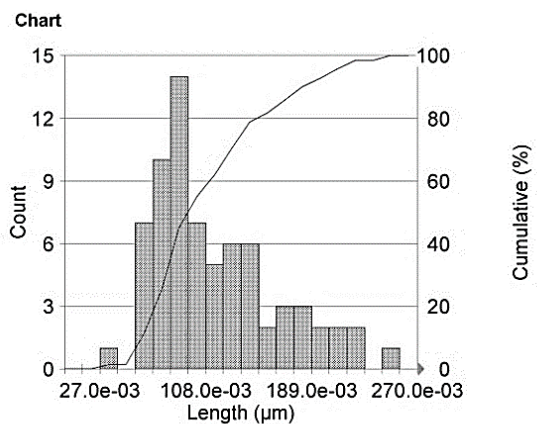


شکل ۱۱) کیفیت سطح ماده دریافتی (a) کیفیت سطح بعد از عملیات (b)

۳-۵- نتیجه‌های سختی مقطع

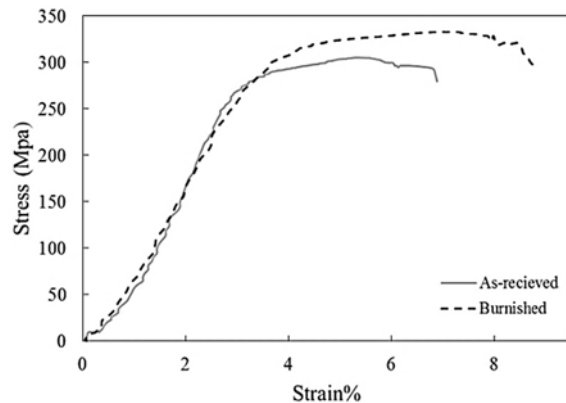
سختی برای مقایسه نمونه عملیات‌شده سنتی و التراسونیک مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به افزایش نرخ کرنش در زیر سطح افزایش سختی با کاهش ابعاد اندازه دانه مشخص شده است. افزایش کار سرد در نمونه کوبش با التراسونیک سبب افزایش سختی و نشان‌دهنده کاهش ریزساختار است. نسبت به نمونه التراسونیک در نمونه سنتی، این تغییر کرنش به دلیل کاهش کار سرد مکانیکی، سختی کمتری مشاهده شده است. در نمونه‌های پهنه و سنتی،

استحکام شکست نیز از مقدار ۲۰۹ به ۳۲۰ مگاپاسکال رسید که حدود ۱۰٪ افزایش داشته است. افزایش طول نیز از ۶/۸ به ۸/۸٪، افزایش ۲۹ درصدی داشته است. این روند افزایش در تحقیق غربی و همکاران برای ماده آلومینیوم نیز مشاهده شده است [15]. دلیل افزایش استحکام را می‌توان به تئوری هال-پچ و ابعاد اندازه دانه مربوط دانست زیرا افزایش استحکام با کاهش اندازه دانه رابطه دارد. دلیل ۱۰٪ افزایش، این است که لایه بسیار نازک و سطحی است و در واقع از ۲ میلی‌متر مقطع، حدود ۱/۸ تا ۱۲ میلی‌متر از سطح مقطع را به ساختار فوق ریزتر تبدیل کرده است. مورد دیگر، رفع عیوب سطحی در ایجاد سطوحی پرداخت، کاهش نقاط تمرکز تنش برای شروع رشد ترک و عیوب سطحی است. افزایش مقدار تنش‌ها از تنش پسماند واقع در ماده ایجاد می‌شود [37].

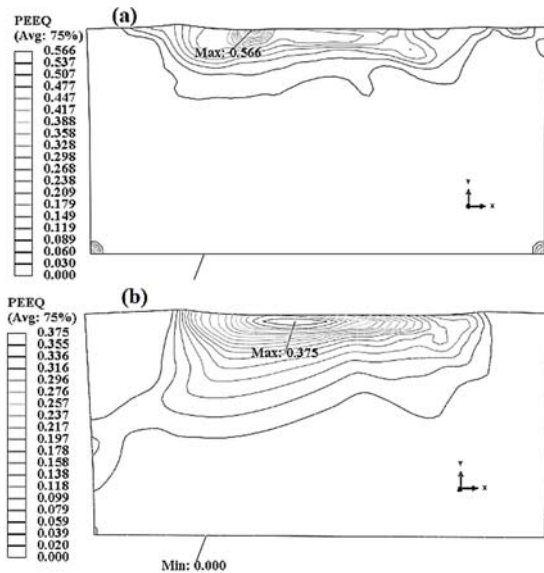


Statistics		
Minimum:	34.5e-03 (34.5e-03)	μm
Maximum:	0.3 (0.3)	μm
Mean:	0.116 (0.118)	μm
Std Dev.:	0.049 (0.052)	μm
Sum:	8.2 (8.5)	μm
Count:	71 (72)	
Under:	0	
Over:	1	
Accepted:	98.61	%
Field Count:	1	
Field Area:	26.5	μm ²
Total Area:	26.5	μm ²

نمودار ۵) نمودار و آماره‌های ابعادی برای ذره‌های نانوسایز در لبه

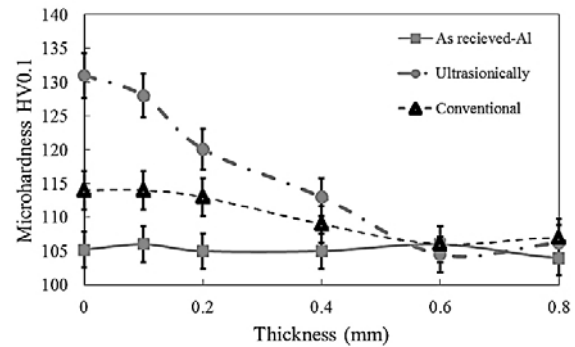


نمودار ۶) مقایسه بین نمونه‌های آزمون کشش ماده بدون عملیات و عملیات‌شده التراسونیک

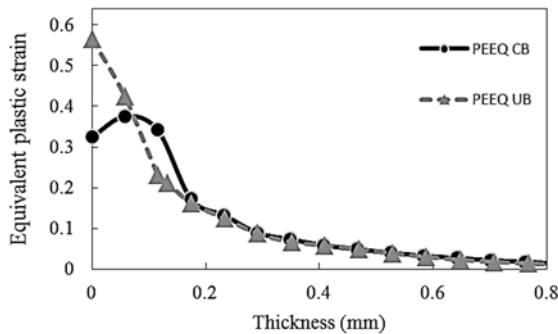


شکل ۱۲) توزیع کرنش موثر برای نمونه سنتی (a) و نمونه التراسونیک (b)

سرعت و تعداد پاس مورد ارزیابی قرار گرفت و سختی که در مقدار سطح سنجیده شده، برای قسمت لبه در نمودار ۷ مشخص است. این مقدار برای نمونه التراسونیک حدود 132 ± 5 ویکرز و برای نمونه سنتی 112 ± 5 محاسبه شد. افزایش کرنش پلاستیک متناسب با افزایش سختی نمونه است و با ابعاد دانه در قطعه رابطه دارد.



نمودار ۷) سختی میکروویکرز در عمق ضخامت قطعه



نمودار ۸) تغییرات کرنش موثر در فرآیند کوبش سنتی (CB) و التراسونیک (UB)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از طراحی آزمایش تجربی روی مقادیر سختی و زبری، حالت بهینه‌ای در روش غلطک‌زنی التراسونیک تعیین شده است. نتایج حاصل از نمودارهای پیش‌بینی توسط رگرسیون با قابلیت تطبیق مناسب و درصد خطای پایین (حداکثر ۱۲٪) مشخص شده است. بهینه‌ترین حالت با سرعت 1000 میلی‌متر بر دقیقه و تعداد ۳ پاس با حالت التراسونیک مشخص شد. پارامترهای اثرگذار در فرآیند با استفاده از آنالیز واریانس مشخص شد. برای کاهش زبری نیاز به سرعت پایین و همچنین نوع فرآیند التراسونیک با توجه به مقادیر ارزشی p و f است. برای داشتن سختی بالا نیاز به تعداد پاس بیشتر است و نوع فرآیند التراسونیک باید بیشترین سختی را داشته باشد. ریزساختار با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی، در تحت عملیات سطحی قرار گرفت و نسبت به حالت بدون عملیات ریزساختار از 60 میکرون به ریزساختار زیرمیکرونی کاهش یافت. آزمون کشش نشان از افزایش نسبی خواص تنش‌های تسلیم و نهایی ماده داشته است. این افزایش، متاثر از ریزشدن لایه‌ای نازک در ماده است و نیز عیوب

می‌توان افزایش سختی را ناشی از کاهش ابعاد ریزساختار دانست؛ بنابراین طبق رابطه هال-پچ این توجیه می‌شود، اما در ریزدانه‌های در حد زیر 100 نانومتر و بالای 100 میکرون، این رابطه، قابلیت توجیه افزایش مقادیر را نخواهد داشت [28]. در حالت کوبش سنتی، سختی، کمتر از حالت التراسونیک است که از تاثیر افزایش کرنش سختی و تعداد ضربات وارد شده به سطح بوده است. در اثر افزایش کار، مکانیک ماده با افزایش چگالی نابجایی‌ها رو برو می‌شود؛ این حالت با افزایش نابجایی به حالت اشباع می‌رسد. در مواد نرم این اتفاق زودتر و در مواد تردتر نیاز به کار مکانیکی بیشتر است و در تحقیقات پیش‌تر این مورد دیده شده است. برای ماده آلومینیوم ۶۰۶۱ بعد از ۴ پاس، ماده اشباع شده است و در این مورد نیز تا حدودی سختی که موثر از کار مکانیکی و برخورد افزایش چگالی نابجایی‌هاست، در ۵ پاس به ثبات رسیده است؛ برای ماده آلومینیوم ۶۰۶۱ بعد از ۴ پاس ماده اشباع شده است. در این مورد نیز تا حدودی سختی که موثر از کار مکانیکی و برخورد افزایش چگالی نابجایی‌هاست، در ۵ پاس پنجم به ثبات حد اشباع رسیده است.

۳-۶ نتیجه‌های کرنش

توزیع نرخ کرنش در نمونه بعد از عملیات در شکل ۱۲ و نمودار ۸ نشان داده شده است. تغییرات نرخ کرنش موثر، متاثر از عملیات با کار سرد و تغییر در فواصل اتمی و نیز تفاوت چگالی نابجایی‌هاست؛ در این خصوص در فرآیند التراسونیک نزدیک به دو برابر، افزایش کرنش نسبت به روش سنتی دیده می‌شود (نمودار ۸). افزایش کرنش از مقدار 37% برای حالت سنتی به 56% برای حالت التراسونیک رسیده است و این تفاوت از افزایش نیروی دینامیکی التراسونیک است که سبب افزایش نرخ در کرنش بوده است. کار مکانیک سبب افزایش نرخ کرنش شده و این تا لایه‌های نازکی از زیر سطح خود را نشان داده است. تمرکز این ناحیه در حالات مختلف، متفاوت بوده است.

ضریب مواد جانسون کوک	m	سطحی کاهش داشته است. کم‌بودن اثر افزایش استحکام، از لایه نازک تغییر شکل پلاستیک حدود ۵۰ میکرونی در هر سمت قطعه نشأت می‌گیرد. توپوگرافی سطح، کاهش زبری را مشخص کرد که این کاهش را در زبری‌سنجی نیز مشخص نمود. میانگین کاهش زبری از ۳/۳ میکرون به ۱/۱ میکرون و زبری ماکزیمم از ۲ میکرون به ۱ میکرون کاهش یافته است. در توپوگرافی سطح نیز کاهش زبری از حدود ۶ میکرون به ۳ میکرون نشان داده شد. با استفاده از سختی‌سنجی در مقطع قطعه کار و توزیع آن در زیر سطح، مشخص شد که افزایش سختی ناشی از افزایش کرنش در زیر سطح است و سختی از ۱۰۰ میکروویکرز در بالاترین حالت به ۱۵۶ میکروویکرز رسیده است.
ضریب مواد جانسون کوک	n	
تعداد پاس	N	
مقدار پارامتر رد فرضیه نول	p	
نیروی وارده دینامیکی (N)	q	
شعاع ابزار (mm)	r	
پارامتر مدل رگرسیون	R	
زبری میانگین (micron)	Ra	
زبری بیشینه (micron)	Rz	
سرعت پیشروی (mm/min)	s	
زمان (s)	t	
زمان اولیه (s)	t ₀	
دما (°C)	T	
دمای اولیه محیط (°C)	T ₀	
دمای ذوب (°C)	T _m	
نوع فرآیند	U	
فرآیند التراسونیک	u	
ضریب پواسون	V	
تعداد ضربه	Z	
علایم یونانی		
کرنش	ε	
کرنش موثر	ε ^p	
نرخ کرنش	ε̇ _r	
سرعت دایروی (rev/min)	ω	
بسامد (s ⁻¹)	ν	
چگالی (Kg/mm ³)	ρ	
تنش (Mpa)	σ	

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: علیرضا باقری‌بمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۷۰٪)؛ سعید امینی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۰٪)؛ رضا تیموری (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Schulze V, Bleicher F, Groche P, Guo YB, Pyun YS. Surface modification by machine hammer peening and burnishing. *CIRP Annals*. 2016;65(2):809-832.
- Wu B, Zhang L, Zhang J, Murakami RI, Pyoun YS. An investigation of ultrasonic nanocrystal surface modification machining process by numerical simulation. *Advances in Engineering Software*. 2015;83:59-69.
- Hiegemann L, Weddeling C, Tekkaya AE. Analytical contact pressure model for predicting roughness of ball burnished surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;232:63-77.
- Kuznetsov VP, Tarasov SY, Dmitriev AI. Nanostructuring burnishing and subsurface shear instability. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;217:327-335.
- Esme U, Kulekci MK, Ustun D, Kahraman F, Kazancoglu Y. Grey-based fuzzy algorithm for the optimization of the ball burnishing process. *Materials Testing*. 2015;57(7-8):666-673.
- El-Axir MH, Othman OM, Abodierna AM. Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;202(1-3):435-442.
- Shiou FJ, Banh QN. Development of an innovative small ball-burnishing tool embedded with a load cell. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(1-4):31-41.
- Teimouri R, Amini S, Bagheri Bami A. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in

۵- پی‌نوشت

علایم اختصاری

A	ضریب مواد جانسون کوک
a	تابع فوریه
A ₀	ضریب اولیه فوریه
A _n	ضریب سینوسی فوریه
B _n	ضریب کسینوسی فوریه
C	ضریب مواد جانسون کوک
c	فرآیند سنتی
d	قطر اندازه دانه (mm)
E	مدول یانگ (Gpa)
F _t	نیروی کلی (N)
F _{st}	نیروی استاتیکی (N)
F _{dy}	نیروی دینامیکی (N)
f	پارامتر آنالیز واریانس
H	سختی
H ₀	سختی اولیه ماده
H _v	سختی ویکرز
k	ضریب سختی حال- پیچ
L	ضریب دوره فوریه

- 23- Lienert F, Gerstenmeyer M, Krall S, Lechner C, Trauth D, Bleicher F, et al. Experimental study on comparing intensities of burnishing and machine hammer peening processes. *Procedia CIRP*. 2016;45:371-374.
- 24- Sedaghati H, Tamizifar M. Wear behavior in micro and Nano-structured WC-9Co-0.7 VC cemented carbide produced by rapid hot press sintering. *Advanced Ceramics Progress (ACERP)*. 2015;1(2):34-39.
- 25- Amini S, Kariman SA, Teimouri R. The effects of ultrasonic peening on chemical corrosion behavior of aluminum 7075. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;91(1-4):1091-102.
- 26- Abbasi A, Amini S, Shikhzade G. Investigation of experimental and numerical simulation of residual stresses distribution of rolling mill rolls in ultrasonic peening technology. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(7):316-324. [Persian]
- 27- Karimi A, Amini S. 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*. 2016;83(5-8):1127-1134.
- 28- Amini S, Abbasi A, Shikhzadeh G. Investigation of ultrasonic peening technology on the GSH48 graphite steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(9):29-36. [Persian]
- 29- Amanov A, Cho IS, Pyoun YS, Lee CS, Park IG. Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects. *Wear*. 2012;286-287:136-144.
- 30- Bouzid W, Tsoumarev O, Sai K. An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2004;24(1-2):120-125.
- 31- Lotfi M, Amini S, Aghaei M. 3D analysis of surface topography in vibratory turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;95(1-4):197-204.
- 32- Rodríguez A, López de Lacalle LN, Celaya A, Lamikiz A, Albizuri J. Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface and Coatings Technology*. 2012;206(11-12):2817-2824.
- 33- Prevéy PS, Cammett JT. The influence of surface enhancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of AA7075-T6. *International Journal of Fatigue*. 2004;26(9):975-982.
- 34- Ding H, Shen N, Shin YC. Modeling of grain refinement in aluminum and copper subjected to cutting. *Computational Materials Science*. 2011;50(10):3016-3025.
- 35- Amini S, Baraheni M, Moeini Afzal M. Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2018;5(1):41-50. [Persian]
- 36- Nasr M, Anwar S, El-Tamimi A, Pervaiz S. Minimization of the hole overcut and cylindricity errors during rotary ultrasonic drilling of Ti-6Al-4V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;346:Article ID:012059.
- 37- Moon JH, Baek SM, Lee SG, Seong Y, Amanov A, Lee S, et al. Effects of residual stress on the mechanical properties of copper processed using ultrasonic-nanocrystalline surface modification. *Materials Research Letters*. 2019;7(3):97-102.
- ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6. *Measurement*. 2018;116:129-139.
- 9- Ye C, Telang A, Gill AS, Suslov S, Idell Y, Zwiack K, et al. Gradient nanostructure and residual stresses induced by Ultrasonic Nano-Crystal Surface Modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility. *Materials Science and Engineering: A*. 2014;613:274-288.
- 10- Bozdana AT, Gindy NNZ. Comparative experimental study on effects of conventional and ultrasonic deep cold rolling processes on Ti-6Al-4V. *Materials Science and Technology*. 2008;24(11):1378-1384.
- 11- Bozdana AT, Gindy NNZ, Li H. Deep cold rolling with ultrasonic vibrations—a new mechanical surface enhancement technique. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005;45(6):713-718.
- 12- Jerez-Mesa R, Travieso-Rodriguez JA, Gomez-Gras G, Lluma-Fuentes J. Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;257:203-212.
- 13- Chui P, Sun K, Sun C, Wu C, Wang H, Zhao Y. Effect of surface nanocrystallization induced by fast multiple rotation rolling on mechanical properties of a low carbon steel. *Materials & Design*. 2012;35:754-759.
- 14- Kattoura M, Telang A, Mannava SR, Qian D, Vasudevan VK. Effect of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;711:364-377.
- 15- Gharbi F, Sghaier S, Hamdi H, Benameur T. Ductility improvement of aluminum 1050A rolled sheet by a newly designed ball burnishing tool device. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;60(1-4):87-99.
- 16- Gharbi F, Sghaier S, Morel F, Benameur T. Experimental investigation of the effect of burnishing force on service properties of AISI 1010 steel plates. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015;24(2):721-725.
- 17- Amanov A, Sasaki S, Kim DE, Penkov OV, Pyun YS. Improvement of the tribological properties of Al6061-T6 alloy under dry sliding conditions. *Tribology International*. 2013;64:24-32.
- 18- Li L, Kim M, Lee S, Kim J, Kim H, Lee D. Study on surface modification of aluminum 6061 by multiple ultrasonic impact treatments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96(1-4):1255-1264.
- 19- Amini S, Bagheri A, Teimouri R. Ultrasonic-assisted ball burnishing of aluminum 6061 and AISI 1045 steel. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018;33(11):1250-1259.
- 20- Sagbas A. Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function. *Advances in Engineering Software*. 2011;42(11):992-998.
- 21- Salmi M, Huuki J, Ituarte IF. The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2017;2(1-2):31-41.
- 22- Patel KA, Brahmhatt PK. Response surface methodology based desirability approach for optimization of roller burnishing process parameter. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2018;99(6):729-736.