



Experimental Investigation of the Effects of Initial Surface Roughness on Ultrasonic Assisted Ball Burnishing of Al6061-T6

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Pak A.^{*1} PhD,
Mahmoodi M.² MSc,
Safari M.² PhD

How to cite this article

Pak A, Mahmoodi M, Safari M. Experimental Investigation of the Effects of Initial Surface Roughness on Ultrasonic Assisted Ball Burnishing of Al6061-T6. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):87-95.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

²Manufacturing Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Arak University of Technology, Arak, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Shahid Ahmadi Roshan Avenue
Phone: +98 (81) 38292630
Fax: +98 (81) 38292631
a.pak@basu.ac.ir

Article History

Received: November 8, 2018
Accepted: May 4, 2019
ePublished: January 01, 2020

ABSTRACT

In the process of manufacturing, the operation of improving the quality of the surfaces is important due to the different working conditions, the resistance to corrosion and fatigue life, friction, the type of contact between the surfaces and appearance. The purpose of this research is the experimental investigation of burnishing process on the flat surface by ultrasonic vibration in order to investigate the initial surface roughness as an input variable as well as its interaction effect on the final surface roughness of aluminum Al6061-T6 alloy. Response surface methodology (RSM) was utilized to correlate the empirical relationship between input and output variables and their interaction effects. Experimental tests with a constant frequency of 20 kHz were done to find the effect of the initial maximum surface roughness, ultrasonic vibration amplitude and static load on the surface roughness. The results show that the initial surface roughness has no direct effect on the output surface roughness, but the effect of vibration amplitude and static load on the final surface roughness depends on the initial surface roughness. The higher static load is needed for the high surface roughness, and the increase of static load has decreased the effect of initial surface roughness on the surface roughness. Also, in high vibration amplitude by increasing the initial surface roughness, the surface roughness is increased and at low vibration amplitude by increasing the initial surface roughness, the surface roughness is decreased. By increasing the vibration amplitude and the static load, the surface roughness is increased. Furthermore, the amplitude of vibration, the interaction effect of static load and the initial maximum surface roughness and static load have the highest effect on the final surface roughness, respectively.

Keywords Ball burnishing; Surface roughness; Ultrasonic vibrations; Response Surface Methodology (RSM); Al 6061-T6

CITATION LINKS

[1] Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals [2] A review of ultrasonic peening treatment [3] Ultrasonic head for strain hardening and relaxation treatment [4] Role of foreign-object damage on thresholds for high-cycle fatigue in Ti-6Al-4V [5] Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing [6] Integrity of surfaces finished with ultrasonic burnishing [7] Influence of ultrasonic burnishing technique on surface quality and change in the dimensions of metal shafts [8] Analysis and optimization of surface roughness in rotary ultrasonic burnishing of titanium alloy Ti-6Al-4V [9] Ultrasonic-assisted ball burnishing of aluminum 6061 and AISI 1045 steel [10] Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6 [11] Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061 [12] Survey the effect of forming speed on fld for Al 6061 sheets [13] Numerical modeling and experimental investigation of ultrasonic assisted burnishing process [14] Effects of ball burnishing parameters on surface finish-a literature survey and discussion [15] On the surface and tribological characteristics of burnished cylindrical Al-6061 [16] Advanced modeling and optimization of manufacturing processes: International research and development [17] Design and analysis of experiments [18] Study on surface characteristics of 7050-T7451 aluminum alloy by ultrasonic surface rolling process [19] A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts [20] Improving surface finish of 3D-printed metals by ultrasonic nanocrystal surface modification [21] Experimental study on the mechanical effects of the vibration-assisted ball-burnishing process

بررسی تجربی اثر زبری سطح اولیه در فرآیند صیقل کاری به کمک نوسانات فراصوتی روی آلومینیوم Al6061-T6

عباس پاک^۱ PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

مهران محمودی^۲ MSc

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

مهدی صفری^۳ PhD

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

در فرآیندهای ساخت قطعات، عملیات بهبود کیفیت سطوح با توجه به شرایط کاری مختلف قطعات از جهت مقاومت به خوردگی و خستگی، مقدار اصطکاک، نحوه تماس بین سطوح و شکل ظاهری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. هدف از این تحقیق، بررسی فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای روی سطوح تخت به کمک نوسانات فراصوتی برای بررسی اثر زبری سطح اولیه به عنوان یک متغیر ورودی و همچنین اثر تداخلی آن با سایر پارامترهای فرآیند شامل دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار روی زبری سطح نهایی قطعات از جنس آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 است. برای بررسی ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی و بررسی اثرات تداخلی آنها از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ استفاده و یک مدل ریاضی ارائه شده است. آزمون‌های عملی با فرکانس ثابت ۲۰ کیلوهرتز و سه متغیر زبری سطح بیشینه اولیه، دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار به عنوان متغیرهای ورودی انجام و زبری سطح خروجی اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که زبری سطح بیشینه اولیه اثر مستقل روی زبری سطح خروجی ندارد، لیکن اثر دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار روی مقدار زبری سطح نهایی بستگی به زبری سطح اولیه دارد. برای سطوح با زبری سطح اولیه بالا نیاز به نیروی پیش‌بار بیشتری وجود دارد و هر چقدر نیروی پیش‌بار افزایش یافته اثر تغییرات زبری سطح اولیه روی زبری سطح خروجی کاهش یافته است. همچنین در دامنه نوسانات بالا با افزایش زبری سطح اولیه، زبری سطح خروجی افزایش و در دامنه نوسان کم با افزایش زبری سطح اولیه، زبری سطح خروجی کاهش یافته است. با افزایش دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار زبری سطح خروجی افزایش و به ترتیب دامنه نوسان، اثر تداخلی نیرو و زبری سطح بیشینه اولیه و سپس مقدار نیروی پیش‌بار بیشترین تاثیر را روی زبری سطح خروجی دارند.

کلیدواژه‌ها: صیقل کاری ساچمه‌ای، زبری سطح، نوسانات فراصوتی، روش طراحی آزمایش پاسخ سطح، آلیاژ آلومینیوم Al 6061-T6

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۴

نویسنده مسئول: a.pak@basu.ac.ir

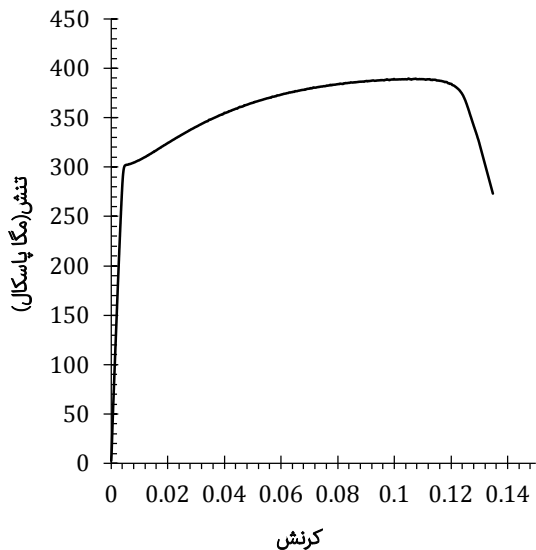
۱- مقدمه

عملیات بهبود کیفیت سطوح با هدف‌های متفاوتی با توجه به کاربرد قطعات و در نتیجه شرایط کاری مختلف از جهت مقاومت به خوردگی، نیروهای وارده، مقدار اصطکاک در سطح تماس و غیره انجام می‌گیرد که در سال‌های اخیر با به‌کارگیری فناوری‌های مختلف و اثرات متقابل آنها بر هم، روش‌های پیشرفته و بهینه‌ای برای رسیدن به اهداف مختلف بهبود کیفیت سطوح به‌دست آمده

است. در روش‌های سنتی ماشینکاری، تنش پسماند کششی و میکروتک در سطوح قطعات به‌وجود می‌آید که این ترک‌ها و تنش پسماند کششی مقاومت به خستگی مواد را به‌شدت پایین می‌آورد. عملیات صیقل کاری غلتکی و صیقل کاری ساچمه‌ای با انجام کار سرد و ایجاد نیروی فشاری در سطوح این قطعات باعث بسته‌شدن میکروتک‌ها، ایجاد تنش پسماند فشاری، کاهش زبری سطح، افزایش مقاومت به خستگی و در نتیجه بهبود خواص سطحی ماده می‌شوند^[1]. با توجه به اینکه در فرآیندهای مختلف ساخت زبری سطح به‌دست‌آمده متفاوت است، به‌طوری که حتی ممکن است در یک شرایط یکسان هم زبری سطح حاصل کاملاً برابر نباشد، لذا انتخاب شرایط بهینه در فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای به کمک نوسانات فراصوتی برای رسیدن به یک زبری سطح مشخص و یکسان برای تمام قطعات تولیدشده با شرایط و زبری سطح‌های مختلف، ضروری است.

در فرآیند چکش کاری توسط نوسانات فراصوتی، نوسانات تولیدشده توسط مبدل پیزوالکتریکی یا الکترومغناطیسی به ابزار ضربه‌زننده انتقال یافته و از طریق ابزار به قطعه کار ضربات متوالی با فرکانس بالا وارد می‌شود. ضربات وارده باعث تغییر شکل پلاستیک موضعی در سطح قطعه کار در نتیجه ایجاد تنش پسماند فشاری، بسته‌شدن ترک‌های سطحی و کاهش زبری سطح قطعه کار می‌شود. فرکانس نوسان، دامنه نوسان، نیروی فشاری اولیه، سرعت پیشروی، تعداد مراحل صیقل کاری، شکل و هندسه ابزار از عوامل مؤثر بر این فرآیند می‌باشند^[2].

پیشرفت‌های اخیر در فرآیند چکش کاری فراصوتی (Ultrasonic Peening) مدیون تلاش‌های *استانتینگ* بوده است. او در دهه ۱۹۷۰ به‌کارگیری ضربه‌زننده‌های سوزنی‌شکل، فرآیند چکش کاری فراصوتی را در ساخت و نگهداری سازه‌های جوشی و قطعات ماشینکاری شده به‌کار گرفت^[3]. پترز و همکاران با اعمال فرآیند چکش کاری فراصوتی روی آلیاژ تیتانیوم- آلومینیوم- وانادیوم نقش زبری سطح پایین ایجادشده را در سیکل‌های بالای خستگی و آستانه شروع شکست را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که این فرآیند باعث کاهش زبری سطح، بستن ترک‌ها بسته شده و در نتیجه مقاومت به خستگی قطعه کار بالا می‌رود^[4]. تیگ و همکاران فرآیند چکش کاری فراصوتی را با فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای ترکیب کرده و آن را روی شفتی از جنس فولاد اعمال و نتایج فرآیند را با قطعات پولیش شده مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که زبری سطح کاهش یافت، سختی سطحی افزایش و تنش پسماند فشاری در سطح به‌وجود آمده است^[5]. هاکی و لاکسو فرآیند صیقل کاری فراصوتی را روی شفت‌های فولادی از جنس 34CrNiMo6-M با فرکانس ۲۰ KHz توسط ابزار ساچمه‌ای با قطر ۳mm انجام دادند. در این تحقیق زبری سطح متوسط به اندازه ۹۰٪ کاهش یافته، سختی سطحی افزایش چشمگیری نداشته، تنش پسماند حدود ۴ برابر بیشتر شده و به سمت تنش پسماند فشاری رفته و تا عمق ۱ میلی‌متر از سطح نفوذ کرده است^[6]. هاکی و همکاران فرآیند



نمودار (۱) نمودار تنش و کرنش به دست آمده از آزمون کشش برای آلیاژ Al6061-T6

جدول (۱) خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 [12]

Al6061-T6	ماده
۶۹GPa	مدول الاستیک
۰/۳۳	ضریب پواسون
۲۸۵MPa	تنش تسلیم
۴۰۰MPa	استحکام نهایی

در آزمون‌های انجام شده، زبری سطح اولیه قطعه کار به صورت زبری سطح بیشینه (Rz) مختلف مطابق با مقادیر تعیین شده در طراحی آزمایش و با فاصله قله زبری ثابت به اندازه ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب زبری سطح بیشینه امکان ایجاد و کنترل زبری سطح مذکور در نمونه‌های مورد استفاده در آزمون‌های عملی بوده است. زبری سطح بیشینه برابر با ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میکرومتر روی قطعه کار (مطابق شکل ۱) به وسیله پیشانی تراشی با نرخ پیشروی ثابت ۰/۲ میلی‌متر بر دور و عمق‌های برش مناسب روی دستگاه تراش ایجاد شده است.



شکل (۱) نمونه‌های آزمایش قبل از اعمال فرآیند

۲-۲ شرایط انجام آزمون‌ها

۱-۲-۲ طراحی آزمایش

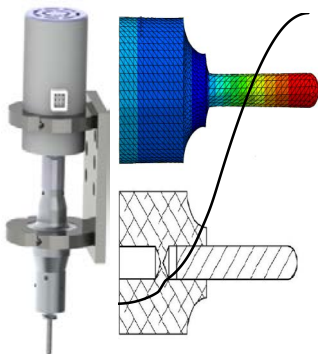
جهت بررسی ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی و بررسی اثرات تداخلی آنها از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی استفاده و تحلیل آماری توسط نرم‌افزار مینیتاب (Minitab V.16) صورت گرفته است. در روش باکس-بنکن هر فاکتور سه سطح

صیقل کاری فراصوتی را روی سه نوع جنس متفاوت آلومینیوم، 34 CrNiMo6 و S355J2 اعمال کردند و نشان دادند که میزان زبری سطح خروجی به جنس ماده وابسته نبوده و میانگین زبری سطح متوسط برای کلیه قطعات یکسان است. میزان خارج از گردی نیز به اندازه ۷/۱۸ میکرومتر بهبود یافته و این پارامتر به جنس و زبری سطح اولیه بستگی ندارد. مقدار قطر نیز به اندازه ۰/۳ میلی‌متر تا ۰/۵ میلی‌متر کمتر شده که این تغییرات به زبری سطح اولیه بستگی دارد [7]. ژئو و لیو تأثیر پارامترهای عمق صیقل کاری، سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و فرکانس ارتعاش در فرآیند صیقل کاری فراصوتی را بر زبری سطح نهایی قطعات تخت تهیه شده از آلیاژ Ti-6Al-4V بررسی کرده و با در نظر گرفتن سه سطح متفاوت از پارامترهای مذکور، توانستند مقادیر بهینه هر یک از پارامترها را ارائه دهند [8]. امینی و همکاران به بررسی اثر صیقل کاری به کمک نوسان فراصوتی برای دو ماده Al6061 و فولاد 1045 پرداخته و با صیقل کاری معمولی مقایسه نمودند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از نوسان باعث کاهش زبری سطح و افزایش سختی سطحی نسبت به حالت معمولی می‌شود [9]. تیموری و همکاران به بررسی اثر دامنه نوسان، نرخ پیشروی و بار استاتیک (پیش بار) روی فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای آلومینیوم Al6061-T6 پرداختند. نتایج به دست آمده، نشان داد که با افزایش دامنه نوسان ابتدا زبری سطح افزایش و سپس کاهش یافته و با افزایش نیرو و سرعت پیشروی زبری سطح افزایش می‌یابد [10]. تاکنون اثر زبری سطح اولیه به عنوان یکی از متغیرهای ورودی فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای به کمک نوسانات فراصوتی در تحقیق‌های پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا هدف از این تحقیق، بررسی تجربی فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای به کمک امواج فراصوتی روی سطوح تخت از جنس آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 جهت بررسی اثر زبری سطح اولیه به عنوان یک متغیر ورودی و همچنین اثر تداخلی آن با سایر پارامترهای فرآیند شامل دامنه نوسان و نیروی پیش بار روی زبری سطح نهایی است. این آلیاژ به دلیل استحکام به وزن بالا در صنایع مختلف از جمله صنایع هوا-فضا، خودروسازی و نفت و گاز کاربرد فراوانی دارد.

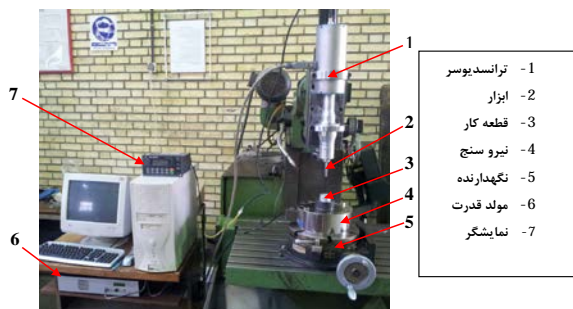
۲- انجام آزمون‌های عملی

۱-۲-۱-۲ جنس قطعه کار

جهت انجام آزمون‌های عملی فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای به کمک نوسانات فراصوتی قطعه کار از جنس آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 انتخاب شده است. این آلیاژ به دلیل استفاده در ساخت و تولید قطعات هواپیما، چرخ‌های واگن قطار، دیسک‌های ترمز، پین مفصل و لولها، کولپلینگ‌ها، پیستون‌های ترمز و قطعات مورد استفاده در سیستم‌های هیدرولیکی از اهمیت ویژه‌ای در صنایع برخوردار است [11]. نمودار تنش و کرنش حاصل از آزمون کشش آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 مورد استفاده در نمودار ۱ و سایر خواص مکانیکی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲) ابزار سر کروی، ترانسدیوسر و انتقال دهنده متصل شده به دستگاه فرز



شکل ۳) تجهیزات و تنظیمات مورد استفاده در آزمون عملی

جدول ۳) پارامترهای فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای به کمک نوسانات فراصوتی

مشخصات	پارامترهای فرآیند
Al6065-T6	جنس قطعه کار
۸	قطر ابزار (mm)
۲۰۰۰۰	فرکانس نوسان (Hz)
۵۰، ۴۰، ۳۰	دامنه نوسان (μm)
۲۸۰، ۲۲۰، ۱۶۰	نیروی پیش‌بار (N)
۵۰، ۴۰، ۳۰	زبری سطح اولیه (μm)
۰/۲	سرعت پیشروی (mm/min)

۳- نتایج آزمون‌ها

بر اساس روش طراحی آزمایش بیان شده در بخش گذشته و با توجه به متغیرهای مستقل زبری سطح اولیه، دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار شرایط هر آزمایش معلوم و خروجی هر آزمایش شامل زبری سطح اندازه‌گیری و استخراج گردید. نتایج حاصل شده از آزمون‌های عملی به صورت تک‌تکرار، در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول ۴) نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی صیقل کاری ساچمه‌ای معمولی

شماره آزمایش	زبری سطح اولیه (μm)	نیروی پیش‌بار (N)	زبری سطح به دست آمده (μm)
۱	۳۰	۱۶۰	۲۸
۲	۳۰	۲۲۰	۲۶
۳	۳۰	۲۸۰	۲۳
۴	۴۰	۱۶۰	۳۷
۵	۴۰	۲۲۰	۳۵
۶	۴۰	۲۸۰	۳۱
۷	۵۰	۱۶۰	۴۸
۸	۵۰	۲۲۰	۴۰
۹	۵۰	۲۸۰	۳۵

متفاوت دارد، شامل سه نقطه که در داخل محدوده مشخص شده برای هر عامل است و هیچ نقطه‌ای خارج از حدود مشخص شده بالا و پایین برای هر عامل را ارائه نمی‌کند. به عبارت دیگر تمام نقاط آزمایش شده در محدوده‌ای از پیش تعیین شده قرار دارند. با توجه به ثابت بودن فرکانس، سه متغیر بیشینه زبری سطح اولیه، دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار به عنوان متغیرهای ورودی آزمایش انتخاب شده و هر یک در سه سطح پایین (-۱)، میانه (۰) و بالا (+۱) کدگذاری و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سایر محدوده مناسب برای انتخاب مقدار متغیرهای ورودی با استفاده از نتایج مطالعات و آزمایش‌های اولیه انجام شده، تعیین شده است [13, 14]. محدوده مقدار پیش‌بار با توجه به مقدار بهینه حداقل برای صیقل کاری ساچمه‌ای روی آلایژ Al6061T6 که برابر با ۶۰ نیوتن است تعیین گردید [15]. سرعت پیشروی ابزار با توجه به نتایج تحقیقات مرجع [16] برابر ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه ثابت در نظر گرفته شده است.

متغیرهای ورودی و محدوده انتخابی آنها در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج طراحی آزمایش، ۹ حالت برای صیقل کاری ساچمه‌ای بدون نوسانات فراصوتی و ۱۷ حالت برای صیقل کاری ساچمه‌ای با نوسانات فراصوتی به دست آمده است.

جدول ۲) متغیرهای فرآیند و محدوده انتخابی آنها

متغیر	نماد	واحد	محدوده
بیشینه زبری اولیه	RZ _(in)	C	۱، ۰، -۱
دامنه نوسان	a	μm	۳۰، ۴۰، ۵۰
نیروی پیش‌بار	F	N	۱۶۰، ۲۲۰، ۲۸۰

۲-۲-۲ تجهیزات آزمایش

جهت انجام آزمون‌های تجربی، تجهیزات اعمال نوسانات فراصوتی به گونه‌ای طراحی شده است که بتوان این مجموعه شامل ترانسدیوسر، بوستر، هورن و ابزار سر کروی را به کلگی دستگاه فرز ان-سی، نصب و آزمایش‌های تجربی را با استفاده از آن در فرکانس نوسان ۲۰ کیلوهرتز انجام داد. ابزار مطابق شکل ۲ به صورت سر کروی و صلب با قطر ۸ میلی‌متر [14] و از جنس فولاد تندبر انتخاب شده است. برای رسیدن به دامنه نوسان‌های مورد نظر از بوسترهای مختلف با نسبت تبدیل دامنه متفاوت استفاده شده است. طراحی این قطعات با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام شد به طوری که طول آنها مضرب صحیحی از نصف طول موج با فرکانس تشدید ۲۰ کیلوهرتز باشد.

اندازه‌گیری و کنترل نیروی پیش‌بار اعمالی به قطعه کار توسط نیروسنج نوع فشاری مدل SEWHA-SL410 با ظرفیت ۵ تن و اندازه‌گیری زبری سطح توسط دستگاه زبری‌سنج نوع سوزنی مدل Surfscan200 با قابلیت تفکیک‌پذیری انتخابی ۱ میکرومتر انجام شده است. شکل ۳ دستگاه و تجهیزات استفاده شده در آزمون‌ها را نشان می‌دهد. همچنین شرایط کامل آزمایش و مقادیر پارامترهای فرآیند در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۵) نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی برای صیقل کاری ساچمه‌ای به کمک نوسانات فراصوتی

شماره آزمایش	زبری سطح اولیه (μm)	دامنه نوسان (μm)	نیروی پیش‌بار (N)	زبری سطح به دست آمده (μm)
۱	۳۰	۳۰	۱۶۰	۱۶
۲	۵۰	۳۰	۱۶۰	۱۴
۳	۳۰	۵۰	۱۶۰	۳۳
۴	۵۰	۵۰	۱۶۰	۴۷
۵	۳۰	۳۰	۲۸۰	۲۲
۶	۵۰	۳۰	۲۸۰	۱۰
۷	۳۰	۵۰	۲۸۰	۳۲
۸	۵۰	۵۰	۲۸۰	۲۶
۹	۳۰	۴۰	۲۲۰	۳۱
۱۰	۵۰	۴۰	۲۲۰	۳۸
۱۱	۴۰	۳۰	۲۲۰	۱۴
۱۲	۴۰	۵۰	۲۲۰	۳۵
۱۳	۴۰	۴۰	۱۶۰	۳۶
۱۴	۴۰	۴۰	۲۸۰	۲۷
۱۵	۴۰	۴۰	۲۲۰	۲۸
۱۶	۴۰	۴۰	۲۲۰	۳۰
۱۷	۴۰	۴۰	۲۲۰	۳۲

جدول ۶) نتایج آنالیز واریانس برای زبری سطح نهایی

ترمها	درجه آزادی (df)	جمع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار p
مدل	۷	۱۴۵۰/۰۸	۲۰۷/۱۵۵	۲۲/۴۹	۰
Rz (in)	۱	۰/۱۷	۰/۱۶۹	۰/۰۲	۰/۸۹۵
a	۱	۹۳۵/۰۹	۹۳۵/۰۸۹	۱۰۱/۵۱	۰
F	۱	۸۲/۳۷	۸۲/۳۶۹	۸/۹۴	۰/۰۱۵
a ²	۱	۱۸۹/۵۲	۱۸۹/۵۲۱	۲۰/۵۷	۰/۰۰۱
Rz (in).a	۱	۵۸/۸۶	۵۸/۸۶۱	۶/۳۹	۰/۰۳۲
Rz (in).F	۱	۱۱۰/۲۶	۱۱۰/۲۶۱	۱۱/۹۷	۰/۰۰۷
a.F	۱	۷۳/۸۱	۷۳/۸۱۱	۸/۰۱	۰/۰۲

با توجه به مقدار $p > ۰/۰۵$ برای متغیر زبری سطح بیشینه اولیه ($Rz_{(in)}$) نتیجه می‌شود که این متغیر اثر مستقل روی زبری سطح، خروجی ندارد [17]. لیکن اثر تداخلی دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار با این متغیر (به ترتیب $Rz_{(in).a}$ و $Rz_{(in).F}$) روی زبری سطح خروجی مؤثر بوده است. از طرفی دامنه نوسان (a) و نیروی پیش‌بار (F) نیز به تنهایی و اثر تداخلی آنها روی زبری سطح خروجی مؤثر می‌باشند. با توجه به مقدار F بیشترین متغیر مؤثر بر زبری سطح بیشینه خروجی دامنه نوسان و سپس اثر تداخلی نیرو و زبری سطح بیشینه اولیه ($Rz_{(in).F}$) است [17].

با حذف متغیر غیرمؤثر زبری سطح بیشینه اولیه، آنالیز واریانس اصلاح شده مطابق با نتایج جدول ۷ به دست آمده است. با توجه به نتایج این جدول مدل ریاضی براساس معادله رگرسیون مرتبه دوم

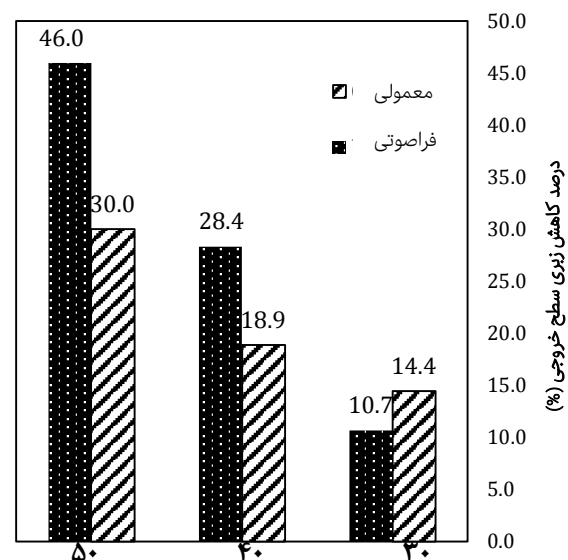
۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- مقایسه نتایج صیقل کاری ساچمه‌ای معمولی و به کمک نوسانات فراصوتی

مقدار میانگین درصد کاهش زبری سطح در دو حالت صیقل کاری ساچمه‌ای معمولی و به کمک نوسانات فراصوتی در نمودار ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از نوسانات فراصوتی به‌طور میانگین باعث کاهش بیشتر زبری سطح در زبری سطح‌های اولیه ۴۰ و ۵۰ میکرومتر گردیده است. ولی در زبری سطح اولیه ۳۰ میکرومتر، کاهش زبری سطح کمتر از حالت معمولی بوده است. دلیل این اثر را می‌توان چنین بیان کرد که با توجه به اینکه دامنه نوسانات اعمالی (۳۰، ۴۰ و ۵۰ میکرومتر) برابر یا از ارتفاع زبری سطح اولیه (۳۰ میکرومتر) بیشتر بوده، در نتیجه باعث افزایش ارتفاع زبری سطح گردیده است. با اعمال دامنه نوسان بیشتر از ارتفاع زبری سطح اولیه بلندی‌های زبری تحت ضربه ابزار تغییر شکل داده و به فرورفتگی‌های جدید پروفیل زبری تبدیل می‌شوند و فرورفتگی‌های پروفیل زبری در اثر فشار و نیروی ضربه‌ای ابزار به بلندی‌های جدید زبری تبدیل می‌شوند و در نتیجه زبری سطح افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج جدول ۵ نیز تایید می‌شود با بیشتر شدن دامنه نوسان نسبت به زبری سطح اولیه مقدار کاهش زبری سطح کاهش یافته است.

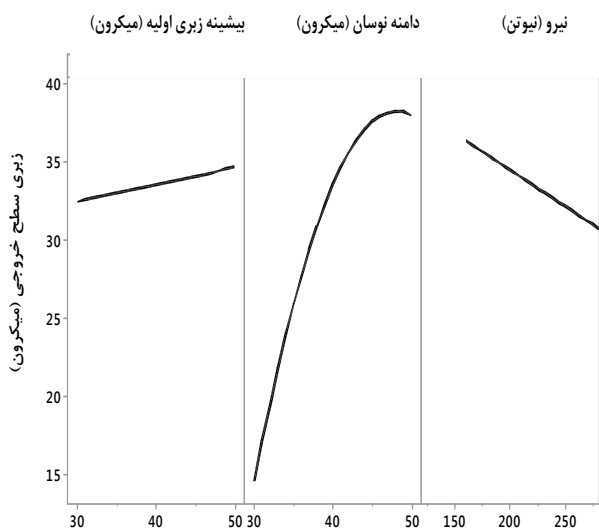
۴-۲- تحلیل و ارائه مدل ریاضی براساس طراحی آزمایش

جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای فراصوتی و ارائه مدل ریاضی، آنالیز واریانس براساس طراحی آزمایش انجام شده توسط نرم‌افزار مینی‌ت‌ب انجام و نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است.



پیشینه زبری سطح اولیه (میکرون)

نمودار ۲) مقایسه میانگین درصد کاهش ارتفاع زبری سطح در دو حالت صیقل کاری معمولی و به کمک نوسانات فراصوتی



نمودار ۳) نمودار اثر زبری سطح بیشینه اولیه، دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار روی زبری سطح خروجی

۲-۳-۴- بررسی اثر تداخلی متغیرهای ورودی

در نمودار ۴ اثر تداخلی زبری سطح بیشینه اولیه و نیروی پیش‌بار بر زبری سطح خروجی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نیروی پیش‌بار از ۱۶۰ به ۲۸۰ نیوتن در زبری سطح‌های بیشینه اولیه ثابت و زبری سطح خروجی به دلیل افزایش تغییر شکل کاهش یافته است. از طرفی در نیروهای پیش‌بار بالا به مقدار ۲۸۰ نیوتن با افزایش زبری سطح اولیه، کاهش زبری بیشتر شده است و با کاهش نیروی به ۲۲۰ نیوتن، زبری سطح اولیه تأثیر قابل توجه ندارد و در نیروهای پیش‌بار کم به مقدار ۱۶۰ نیوتن، با افزایش زبری سطح اولیه، زبری سطح خروجی به دلیل کاهش مقدار تغییر شکل، افزایش یافته است [21]. برای سطوح با زبری سطح اولیه بالا نیاز به نیروی پیش‌بار بالاتر وجود دارد و اگر نیروی پیش‌بار از یک مقدار کمتر باشد (به دلیل عدم ایجاد تغییر شکل کافی در کاهش ارتفاع برجستگی‌ها) تغییرات در زبری سطح اولیه و افزایش زبری اولیه باعث افزایش زبری سطح نهایی می‌شود. لذا در صورت انتخاب نیروی پیش‌بار مناسب می‌توان اثر تغییر زبری سطح اولیه در زبری سطح خروجی کاهش داد.

اثر همزمان زبری سطح اولیه و نیروی پیش‌بار روی زبری سطح خروجی به صورت نمودار در نمودار ۵ نشان داده شده است. با توجه توضیحات ارائه شده در بخش قبلی مشاهده می‌شود. هر چه نیروی پیش‌بار بیشتر می‌شود، اثر تغییرات زبری سطح اولیه بر زبری سطح خروجی به دلیل افزایش اثر نیروی پیش‌بار نسبت به اثر نوسانات فراصوتی کاهش یافته است.

در نمودار ۶ اثر تداخلی زبری سطح بیشینه اولیه و دامنه نوسان بر زبری سطح خروجی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زبری سطح‌های بیشینه اولیه ثابت، افزایش دامنه نوسان باعث افزایش زبری سطح خروجی در اثر افزایش انرژی ضربات وارد شده به سطح و نرخ کرنش و در نتیجه تنش تسلیم ماده گردیده است [21].

با در نظر گرفتن کمترین مقدار خطای مجموع مربعات برای زبری سطح بیشینه خروجی براساس متغیرهای مؤثر به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود.

(۱)

$$Rz_{(out)} = 31.71 + 9.670 - 2.870 - 6.78Rz_{(in)} + 2.71Rz_{(in)} - 3.71Rz_{(in)}F - 3.04aF$$

جدول ۷) نتایج آنالیز واریانس اصلاح شده برای زبری سطح نهایی

ترمها	درجه آزادی (df)	جمع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار p
مدل	۶	۱۴۴۹/۹۱	۲۴۱/۶۵۲	۲۹/۰۹	۰
a	۱	۹۳۵/۰۹	۹۳۵/۰۸۹	۱۱۲/۵۶	۰
F	۱	۸۲/۳۷	۸۲/۳۶۹	۹/۹۱	۰/۰۱
a ²	۱	۱۸۹/۵۲	۱۸۹/۵۲۱	۲۲/۸۱	۰/۰۰۱
Rz _(in) .a	۱	۵۸/۸۶	۵۸/۸۶۱	۷/۰۹	۰/۰۲۴
Rz _(in) .F	۱	۱۱۰/۲۶	۱۱۰/۲۶۱	۱۳/۲۷	۰/۰۰۵
a.F	۱	۷۳/۸۱	۷۳/۸۱۱	۸/۸۸	۰/۰۱۴

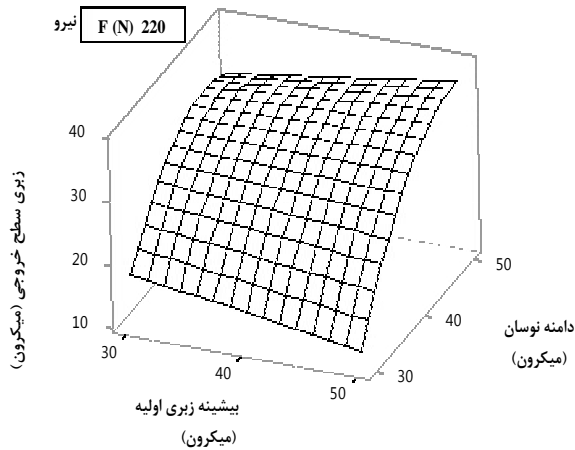
$$R^2 = ۰/۹۴۵۸, R^2_{adj} = ۰/۹۱۳۳, R^2_{pred} = ۰/۸۲۳۷$$

با توجه به نتیجه آنالیز انجام شده و نزدیک بودن مقدار $R^2 = ۰/۹۴۵۸$ به یک می‌توان مدل ریاضی ارائه شده را مناسب و قابل اطمینان در نظر گرفت [17].

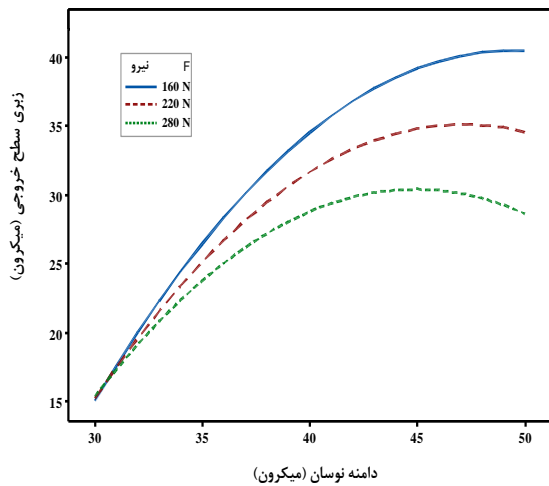
۳-۴- بررسی اثر پارامترهای فرآیند

۱-۳-۴- بررسی اثر متغیرهای ورودی مستقل

در نمودار ۳ اثر سه متغیر مستقل زبری سطح بیشینه اولیه، دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار روی زبری سطح بیشینه خروجی، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییرات زبری سطح، بیشینه اولیه زبری سطح، افزایش کمی داشته است. به عبارتی با افزایش ارتفاع زبری سطح اولیه مقدار کاهش ارتفاع زبری در شرایط یکسان کمتر خواهد شد. اگرچه مقدار این تغییرات قابل توجه نبوده است و حدود ۲ میکرومتر است. در فرآیند صیقل کاری ساچمه‌ای به کمک نوسانات فراصوتی با هندسه ابزار و سرعت پیشروی ثابت، بخشی از تغییر شکل ایجاد شده در سطح توسط نیروی پیش‌بار و بخشی توسط ضربات ابزار و متأثر از دامنه و فرکانس نوسان است [18]. با افزایش دامنه نوسان افزایش زبری سطح خروجی با شیب تندی افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع افزایش انرژی ضربات و نرخ کرنش و در نتیجه افزایش تنش تسلیم و همچنین افزایش پدیده کارسختی در ایجاد تغییر شکل پلاستیک است [19, 20]. همان‌طور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود با افزایش نیروی پیش‌بار از ۱۶۰ به ۲۸۰ نیوتن ارتفاعات زبری سطح خروجی به دلیل بیشتر شدن تغییر شکل برجستگی‌های سطح کمتر شده است [21].



نمودار ۶) اثر همزمان زبری سطح اولیه و دامنه نوسان بر زبری سطح



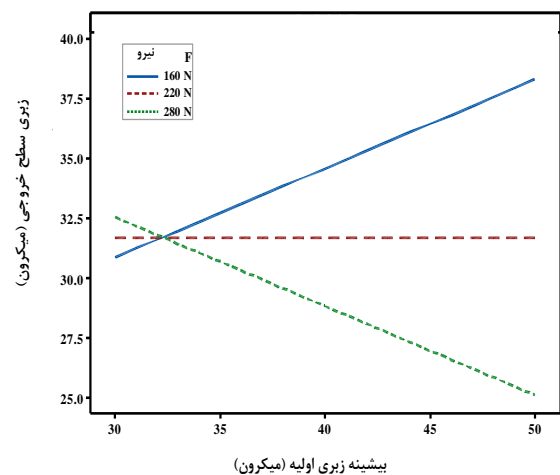
نمودار ۷) اثر تداخلی دامنه نوسان و نیروی پیش بار بر زبری سطح

در نمودار ۸، اثر تداخلی نیروی پیش بار و دامنه نوسان بر زبری سطح خروجی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در دامنه های نوسان یکسان، افزایش نیروی پیش بار باعث کاهش زبری سطح خروجی شده است. از طرفی با افزایش دامنه نوسان در تمام شرایط اعمال نیروی پیش بار به دلیل افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم و پدیده کارسختی و در نتیجه کاهش تغییر شکل ناشی از ضربات، مقدار زبری سطح خروجی افزایش یافته است.

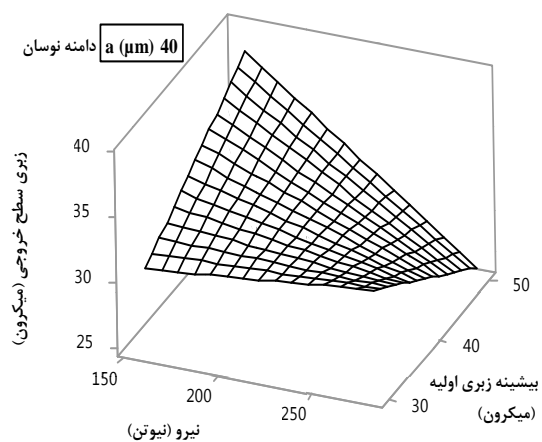
اثر همزمان نیرو و دامنه نوسان به صورت نمودار ۹ آورده شده است. همان طور که نشان داده شده است، حداقل زبری سطح خروجی در بیشترین نیروی پیش بار (۲۸۰ نیوتن) و کمترین دامنه نوسان (۳۰ میکرومتر)، حاصل شده است. کمترین زبری سطح ایجاد شده در شرایط زبری سطح اولیه ۵۰ میکرومتر، دامنه نوسان ۳۰ میکرومتر و نیروی پیش بار ۲۸۰ نیوتن، برابر ۱۰ میکرومتر به دست آمده است.

است [19]. از طرفی در اعمال نوسانات با دامنه بالا به مقدار ۵۰ میکرومتر علاوه بر نرخ کرنش بالاتر، با افزایش زبری سطح اولیه به دلیل نیاز به مقدار تغییر شکل بیشتر برجستگی ها و همچنین رخ دادن پدیده کارسختی بیشتر، زبری سطح خروجی افزایش یافته است. با کاهش دامنه نوسان به ۴۰ میکرومتر به دلیل کاهش نرخ کرنش و مقدار پدیده کارسختی تغییرات، زبری سطح اولیه تغییر قابل توجه بر زبری سطح خروجی نداشته است. در دامنه نوسان کم به مقدار ۳۰ میکرومتر با افزایش زبری سطح اولیه، زبری سطح خروجی کاهش یافته است. در دامنه نوسان کم، نرخ کرنش پایین تر و در نتیجه تنش تسلیم کمتر و مقاومت در برابر تغییر شکل ناشی از کارسختی کمتری ایجاد شده و در نتیجه تغییر شکل بیشتری در برجستگی ها رخ داده و آنها را به فرورفتگی زبری نزدیک تر می کند و بنابراین زبری سطح نهایی کاهش می یابد [19].

اثر همزمان زبری سطح اولیه و دامنه نوسان بر زبری سطح خروجی به صورت نمودار ۷ در نمودار ۷ نشان داده شده است. مشاهده می شود در دامنه نوسان کم و با انتخاب نیروی پیش بار مناسب، می توان اثر زبری سطح اولیه را روی زبری سطح خروجی کاهش داد.



نمودار ۴) اثر تداخلی زبری سطح اولیه و نیروی پیش بار بر زبری سطح



نمودار ۵) اثر همزمان زبری سطح اولیه و نیروی پیش بار بر زبری سطح

از مقایسه نتایج بهینه‌سازی و نتایج آزمایش مطابق با جدول ۸ مشاهده می‌شود که با خطای ۶٪، مدل‌سازی و بهینه‌سازی صورت گرفته از دقت مناسبی برخوردار بوده و نتایج به‌دست‌آمده از مدل منطبق شده بر نتایج آزمایش‌ها از قابلیت اطمینان قابل قبولی برخوردار است.

جدول ۸) مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی و نتایج آزمون‌های تجربی

Rz Out	A	F	Rz (in)	
۹/۴	۳۰	۲۸۰	۵۰	مدل‌سازی آماری
۱۰	۳۰	۲۸۰	۵۰	آزمایش تجربی
۶٪	-	-	-	خطا

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرآیند صیقل‌کاری ساچمه‌ای به کمک نوسانات فراصوتی بر سطوح تخت از جنس آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 با انجام آزمون‌های تجربی بررسی شده است. در این بررسی اثر زبری سطح بیشینه اولیه به‌عنوان یک متغیر ورودی انتخاب و اثر تداخلی آن با سایر پارامترهای فرآیند شامل دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار روی زبری سطح نهایی مورد مطالعه قرار گرفته است که خلاصه نتایج به‌دست‌آمده به شرح ذیل است.

۱- استفاده از نوسانات فراصوتی در فرآیند صیقل‌کاری ساچمه‌ای باعث کاهش بیشتر زبری سطح نسبت به حالت معمولی گردیده و مقدار این کاهش بستگی به پارامترهای فرآیند شامل دامنه نوسان، نیروی پیش‌بار، زبری سطح اولیه و اثر تداخلی آنها دارد.

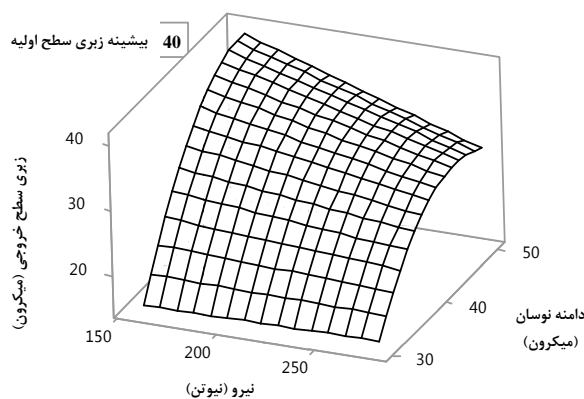
۲- زبری سطح بیشینه اولیه اثر مستقل بر زبری سطح خروجی ندارد، لیکن اثر تداخلی نیرو و زبری سطح بیشینه اولیه با دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار بر زبری سطح خروجی مؤثر بوده است.

۳- دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار هم به‌صورت مستقل و هم اثر تداخلی آنها بر زبری سطح خروجی مؤثر می‌باشند و با افزایش دامنه نوسان و نیروی پیش‌بار زبری سطح خروجی افزایش یافته است.

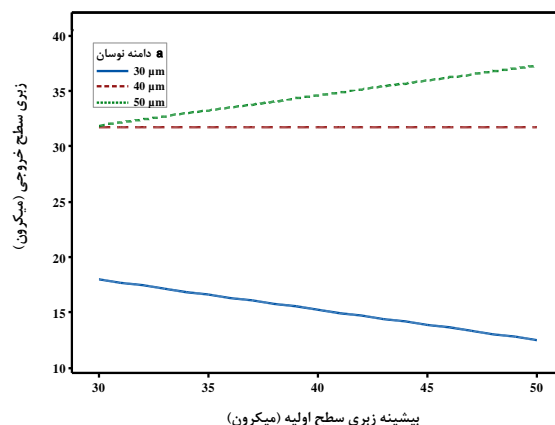
۴- به‌ترتیب دامنه نوسان، اثر تداخلی نیرو و زبری سطح بیشینه اولیه و سپس مقدار نیروی پیش‌بار بیشترین تأثیر را روی زبری سطح خروجی دارند.

۵- برای سطوح با زبری سطح اولیه بالا نیاز به نیروی پیش‌بار بیشتر وجود دارد و اگر نیروی پیش‌بار از یک مقدار کمتر باشد، به‌دلیل عدم ایجاد تغییر شکل کافی در کاهش ارتفاع برجستگی‌ها، تغییرات در زبری سطح اولیه و افزایش آن باعث افزایش زبری سطح می‌شود. به‌عبارتی هرچه نیروی پیش‌بار بیشتر باشد اثر تغییرات زبری سطح اولیه بر زبری سطح خروجی به‌دلیل افزایش اثر نیروی پیش‌بار نسبت به اثر ضریب فراصوتی کاهش یافته است.

۶- در دامنه نوسانات بالا به مقدار ۵۰ میکرومتر با افزایش زبری سطح اولیه، زبری سطح خروجی افزایش یافته است و در دامنه نوسان کم به مقدار ۳۰ میکرومتر با افزایش زبری سطح اولیه زبری سطح خروجی کاهش یافته است.



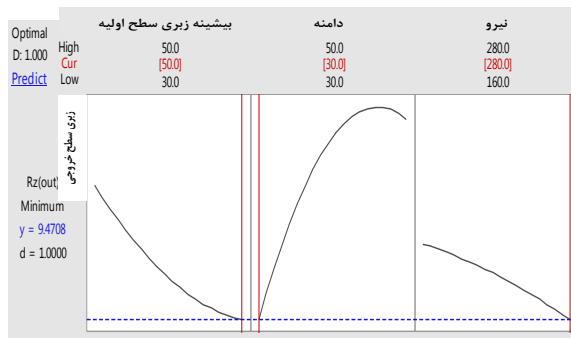
نمودار ۸) اثر همزمان نیروی پیش‌بار و دامنه نوسان بر زبری سطح



نمودار ۹) اثر تداخلی زبری سطح اولیه و دامنه نوسان بر زبری سطح

۵- ارزیابی و بهینه‌سازی نتایج فرآیند در محدوده انجام آزمایش‌ها

جهت بررسی صحت مدل ریاضی به‌دست‌آمده از روش آنالیز واریانس توسط روش پاسخ سطح و بررسی شرایط بهینه فرآیند صیقل‌کاری به کمک نوسانات فراصوتی، بهینه‌سازی آماری با استفاده از روش درینگر [18] و توسط نرم‌افزار مینی‌ت‌ب انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی آماری برای کمترین مقدار زبری سطح خروجی در نمودار ۱۰ نشان داده شده است. کمترین مقدار زبری سطح خروجی در کمترین دامنه نوسان (۳۰ میکرومتر) و بیشترین نیروی پیش‌بار (۲۸۰ نیوتن) و با زبری سطح اولیه ۵۰ میکرومتر حاصل شده است.



نمودار ۱۰) شرایط بهینه در صیقل‌کاری به کمک نوسانات فراصوتی

Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013;227(1):45-53.

7- Huuki J, Hornborg M, Juntunen J. Influence of ultrasonic burnishing technique on surface quality and change in the dimensions of metal shafts. Journal of Engineering. 2014;2014:124247.

8- Zhao J, Liu ZQ. Analysis and optimization of surface roughness in rotary ultrasonic burnishing of titanium alloy Ti-6Al-4V. Advanced Materials Research. 2016;1136:406-411.

9- 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.

10- Teimouri R, Amini S, Bagheri Bami A. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6. Measurement. 2018;116:129-139.

11- El-Tayeb NSM, Low KO, Brevern PV. Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061. Journal of Materials Processing Technology. 2007;186(1-3):272-278.

12- Shojaei Sh, Hashemi R, Rhmatabadi D. Survey the effect of forming speed on fld for Al 6061 sheets. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(10):333-340. [Persian]

13- Mahmoodi M. Numerical modeling and experimental investigation of ultrasonic assisted burnishing process [Dissertation]. Arak: Arak University of Technology; 2017. [Persian]

14- Loh NH, Tam SC. Effects of ball burnishing parameters on surface finish-a literature survey and discussion. Precision Engineering. 1988;10(4):215-220.

15- El-Tayeb NSM, Low KO, Brevern PV. On the surface and tribological characteristics of burnished cylindrical Al-6061. Tribology International. 2009;42(2):320-326.

16- Venkata Rao R. Advanced modeling and optimization of manufacturing processes: International research and development. London: Springer; 2011.

17- Montgomery DC. Design and analysis of experiments. 7th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2008.

18- Lu LX, Sun J, Li L, Xiong QC. Study on surface characteristics of 7050-T7451 aluminum alloy by ultrasonic surface rolling process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;87(9-12):2533-2539.

19- Majzoobi GH, Azizi R, Alavi Nia A. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts. Journal of Materials Processing Technology. 2005;164-165:1226-1234.

20- Ma Ch, Dong Y, Ye Ch. Improving surface finish of 3D-printed metals by ultrasonic nanocrystal surface modification. Procedia CIRP. 2016;45:319-322.

21- Travieso-Rodríguez JA, Gomez Gras G, Jorba Peiró J, Carrillo F, Dessein G, Alexis J, et al. Experimental study on the mechanical effects of the vibration-assisted ball-burnishing process. Materials and Manufacturing Processes. 2015;30(12):1490-1497.

۷- با افزایش دامنه نوسان در تمام شرایط اعمال نیروی پیش‌بار، زبری سطح خروجی افزایش یافته است. در دامنه نوسان کم و با انتخاب نیروی پیش‌بار مناسب می‌توان اثر زبری سطح اولیه را بر زبری سطح خروجی کاهش داد.

۸- کمترین زبری سطح ایجادشده در شرایط زبری سطح اولیه ۵۰ میکرومتر، دامنه نوسان ۳۰ میکرومتر و نیروی پیش‌بار ۲۸ نیوتن، برابر ۱۰ میکرومتر به دست آمده است.

۷- فهرست علائم

a	دامنه (μm)
F	نیروی (N)
Rz	زبری سطح بیشینه (μm)

تشکر و قدردانی: نویسندگان از همکاران محترم کارگاه ماشین‌ابزار دانشگاه صنعتی اراک و جناب آقای دکتر وحید طهماسبی عضو محترم هیات علمی دانشگاه صنعتی اراک که در بررسی و تحلیل نتایج همکاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان متعهد می‌شوند که نتایج این مقاله در مجله دیگری چاپ نشده است.

تعارض منافع: همه نویسندگان منافع یکسانی از این مقاله دارند.

سهم نویسندگان: عباس پاک (نویسنده اول)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ مهران محمودی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ مهدی صفری (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪)

منابع مالی: موردی بیان نشده است.

منابع

- Hassan AM, Al-Bsharat AS. Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals. Wear. 1996;199(1):1-8.
- Malaki M, Ding H. A review of ultrasonic peening treatment. Materials & Design. 2015;87:1072-1086.
- Statnikov ES, Zhuravlev LV, Alekseev AF, Inventors. Ultrasonic head for strain hardening and relaxation treatment. Russian patent, USSR Inventor's Certificate No. SU472782A1. 1972.
- Peters JO, Boyce BL, Thompson AW, Ritchie RO, Roder O. Role of foreign-object damage on thresholds for high-cycle fatigue in Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions A. 2000;31(6):1571-1583.
- Ting W, Dongpo W, Gang L, Baoming G, Ningxia S. Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing. Applied Surface Science. 2008;255(5):1824-1829.
- Huuki J, Laakso SV. Integrity of surfaces finished with ultrasonic burnishing. Proceedings of the Institution of