



## بررسی اثر فرآیند کوبش فراصوتی بر خواص سایشی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱

حامد صمیمی<sup>۱</sup>، عباس پاک<sup>\*۲</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: a.pak@basu.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۱ دی ۱۴۰۲  
پذیرش: ۷ بهمن ۱۴۰۲

## کلیدواژگان:

کوبش فراصوتی  
مقاومت به سایش  
سختی  
آلومینیم Al6061-T6

امروزه آلیاژهای آلومینیوم به دلیل خواص ویژه و مقاومت در برابر خوردگی بالا در کاربردهای مختلف صنعتی انتخاب می‌شوند. با بهینه‌سازی خواص سطحی آلیاژهای آلومینیوم، می‌توان عملکرد و قابلیت اطمینان استفاده از این مواد را به‌طور مؤثری بهبود بخشید. لذا بررسی عملیات مکانیکی سطحی مورد توجه محققین قرار گرفته و روش‌های مکانیکی مختلفی برای بهبود ویژگی‌های سطحی آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفته است. در بین این روش‌ها، روش کوبش فراصوتی یک فرآیند کار سرد است که در آن تعداد زیادی ضربه بر روی سطح نمونه در مدت‌زمان کوتاهی با فرکانس بالا وارد می‌شود. در این پژوهش به بررسی تأثیر فرآیند کوبش فراصوتی بر خواص سایشی آلیاژ آلومینیم Al6061-T6 پرداخته شده است. جهت انجام فرآیند کوبش فراصوتی سه پارامتر دامنه نوسان، سرعت دورانی قطعه کار و نرخ پیشروی ابزار انتخاب و تأثیر آن‌ها بر روی مقاومت به سایش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده شد که فرآیند کوبش فراصوتی باعث افزایش سختی سطحی در حدود ۱۴۱/۴ درصد گردیده و با افزایش دامنه نوسان و مقدار سرعت پیشروی مقاومت به سایش افزایش یافته و همچنین با افزایش سرعت دورانی مقاومت به سایش کاهش یافته است. بیشترین مقاومت به سایش در دامنه نوسان ۱۱ میکرون، سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۸ میلی‌متر بر دور به‌دست‌آمده است که در نتیجه در این شرایط مقاومت به سایش حدود ۴۶ درصد نسبت به ماده خام افزایش یافته است.

## Investigating the effect of the ultrasonic hammer peening on the wear properties of Aluminum alloy 6061

Hamed Samimi<sup>1</sup>, Abbas Pak<sup>\*2</sup>

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

\* Corresponding Author's Email: a.pak@basu.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 11 January 2024

Accepted: 27 January 2024

## Keywords:

Ultrasonic Hammer Peening

Wear Resistance

Hardness

Aluminum 6061-T6

## Abstract

Nowadays, Aluminum alloys are chosen for various industrial applications due to their special properties and high corrosion resistance. By optimizing the surface properties of Aluminum alloys, the performance and reliability of using these materials can be effectively improved. Therefore, investigating the surface mechanical treatment has been the focus of researchers and various mechanical methods have been used to improve the surface characteristics of Aluminum alloys. Among these methods, ultrasonic hammer peening is a cold work process in which many impacts are applied to the surface of the sample in a short period with high frequency. In this research, the effect of ultrasonic hammer peening on the wear properties of Aluminum alloy Al6061-T6 has been investigated. To carry out the process of ultrasonic hammering, three parameters of vibration amplitude, rotational speed of the work piece, and feed rate of the tool were selected and their effect on the wear resistance was investigated. The obtained results showed that the ultrasonic hammer peening increased the surface hardness by about 141.4%. With the increase of the vibration amplitude and the feed rate, the wear resistance increased and the increase of the rotational speed decreased the wear resistance. The highest wear resistance has been obtained in the vibration amplitude of 11  $\mu\text{m}$ , rotational speed of 500 rpm, and feed rate of 0.8 mm/rev. As a result, the wear resistance has increased by about 46% compared to the raw material in these conditions.

## Please cite this article using:

Samimi H, Pak A. Investigating the effect of the ultrasonic hammer peening on the wear properties of Aluminum alloy 6061. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 September 23;10(7):26-35. doi: 10.22034/IJME.2024.434954.1913 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

امروزه در بیشتر مواد مورد استفاده در صنایع پیشرفته با توجه به شرایط خاص کاربردی آنها معمولاً خواص ناحیه سطحی این مواد با خواص مواد پایه متفاوت است. برای بهبود خواص سطحی مواد از فناوری‌های مهندسی سطح استفاده می‌گردد. فرایندهای مختلف و گوناگونی جهت بهبود خواص سطحی آلیاژها مورد استفاده قرار می‌گیرند، یکی از این روش‌ها که امروزه مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از نوسانات فراصوتی است [۱].

فرآیند کوبش فراصوتی یک روش کار سرد است که با ایجاد یک‌لایه سخت در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید در مقایسه با روش‌های دیگر مانند ساچمه پاشی معمولی، ساچمه پاشی با فرکانس بالا، صیقل‌کاری سطحی و فرآیند سطحی لیزری کنترل‌پذیرتر است [۲، ۳]. در این فرایند ابزار ارتعاشی با حرکات رفت و برگشتی با فرکانس بالا، به سطح قطعه کار ضربه زده و موجب تغییر شکل پلاستیک شدید در سطح می‌شود. اعمال ضربات فراصوتی در سطح مواد باعث افزایش سختی سطح، ایجاد تنش پسماند فشاری، کاهش اندازه دانه‌ها (در حد نانو)، کاهش زبری سطح و تغییر الگوی سطح خواهد شد. سرعت انجام عملیات، تنوع در ابزار، ضخامت کم منطقه متأثر از عملیات سطحی و کنترل‌پذیری فرآیند از ویژگی‌های به‌کارگیری امواج فراصوتی در عملیات سطحی است [۴].

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل داشتن ویژگی‌های خاص همچون نسبت استحکام به وزن بالا و همچنین قابلیت شکل‌پذیری بالا در صنایع مختلف مانند صنایع دریایی، هوافضا و خودروسازی کاربرد فراوانی دارند. خواص سطحی این مواد مانند مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش و خستگی، اصطکاک و غیره تحت تأثیر ویژگی‌های سطحی آن است. در بیشتر موارد، شکست‌های مواد در اثر سایش، خوردگی و خستگی در سطح رخ می‌دهند. لذا با بهینه‌سازی عملکرد سطحی آلیاژهای آلومینیوم، می‌توان عملکرد و قابلیت اطمینان استفاده از این مواد را به‌طور مؤثری بهبود بخشید.

مطالعات اولیه در خصوص استفاده از فرآیند کوبش فراصوتی جهت تغییر خواص سطحی مواد در سال ۱۹۵۰ توسط موخانوف و موردوینتسوا<sup>۱</sup> صورت گرفت. بر اساس این تحقیقات با ایجاد ارتعاش مداوم فراصوت در نوک یک ترانسدیوسر فراصوتی ماده تحت مستقیم ضربه قرار گرفته است. در این فرآیند با اعمال ضربه ارتعاشی با فرکانس بیشتر از ۲۰ کیلوهرتز بر روی مواد، تنش‌های کششی حذف و فضاهای خالی بسته می‌شوند و همچنین تنش پسماند فشاری توسط یک تغییر شکل شدید پلاستیک ایجاد می‌شود [۵، ۶]. جانز گرام و همکاران به مطالعه تأثیرات فرآیند کوبش فراصوتی بر آلیاژ AA ۷۰۷۵ آلومینیوم پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست آمده با اعمال ضربات به سطح ماده و ایجاد تغییر شکل پلاستیک موجب یکنواختی سطح و افزایش سختی سطح شده است. از طرفی با افزایش توان ضربات به سطح زبری سطح در آلیاژ ۷۰۷۵ افزایش یافته است [۷]. یانگ به بررسی اثر کوبش فراصوتی بر مقاومت به خستگی خواص آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخت که در این فرایند فرکانس نوسان، ۱۹/۸ کیلوهرتز و مقدار دامنه ارتعاش فراصوتی ۳۰ میکرومتر انتخاب و همچنین سرعت ضربات وارد بر سطح ۱/۵ الی ۲ متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در این تحقیق اعمال ضربات بر سطح ماده و ایجاد تغییر شکل پلاستیک موجب تغییر ریزساختار و ریزدانه‌گی ماده در سطح و در نتیجه سختی سطح افزایش و عیوب سطحی کاهش یافته است [۸].

رسولی و همکاران با بررسی تأثیر فرآیند کوبش فراصوتی بر روی آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم نشان دادند که در این فرآیند در توان‌های پایین، زبری سطح کاهش یافته اگرچه در توان بالا زبری افزایش پیدا کرده است [۹]. رسولی و همکاران اثرات ارتعاش فراصوتی بر ریزساختار و سختی قطعات استوانه‌ای آلیاژ AA ۲۰۲۴ آلومینیوم را بررسی نمودند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از فرایند فراصوتی باعث یکنواختی سطح و ریزدانه‌گی شده و متوسط اندازه دانه ماده تا ۵۰ درصد کاهش یافته که باعث افزایش مقاومت به خستگی و سختی سطح شده است [۱۰]. ژانگ و همکاران به بررسی تأثیر ساچمه پاشی فراصوتی بر اصلاح اعوجاج کماتش آلیاژ آلومینیوم A۰۶۵ پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داده که ساچمه پاشی ناحیه نرم شده در اتصال جوش داده شده را سخت می‌کند و نمونه را تقویت می‌کند. سختی تقریباً ۱۰٪ در سطح جوش پس از این عملیات افزایش یافت [۱۱].

هادیزما و همکاران به موضوع تأثیر ساچمه پاشی فراصوتی بر بهبود پوشش آنودایزینگ بر آلیاژ آلومینیوم AW۶۰۸۲ پرداختند. در این تحقیق استفاده از ساچمه پاشی باعث افزایش مقاومت در برابر خستگی با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری و پالایش دانه‌های لایه سطحی شده است [۱۲].

<sup>1</sup> Mokhanov and Mordvintseva

پاندی و همکاران تأثیرات ساچمه پاشی فراصوتی بر آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بررسی نمودند. در این پژوهش با انجام عملیات در زمان‌های مختلف ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۳۰۰ ثانیه نشان داده شد که با افزایش زمان، زبری سطح و میزان تنش پسماند افزایش پیدا می‌کند و متوسط اندازه دانه‌ها با افزایش زمان فرآیند افزایش پیدا کرده است. عملیات ساچمه پاشی فراصوتی برای مدت طولانی ۳۰۰ ثانیه بزرگ‌ترین زبری سطح را ایجاد کرده و منجر به کاهش مقاومت در برابر خوردگی شده است. برای تنش پسماند فشاری بیشترین برای حالت ۳۰۰ ثانیه بوده و کمترین برای ۱۵ ثانیه بوده است [۱۳].

لی و همکاران به بررسی تأثیر فرآیند کوبش نوسانی بر بهبود خواص سطح آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداختند. در این طرح از آلومینیوم ۶۰۶۱ با ابعاد  $12 \times 12$  و ضخامت ۴ میلی‌متر انجام شد. در این تحقیق کوبش با فرکانس نوسان ۴۸۰۰ هرتز و دامنه ارتعاش ۱۲ میکرومتر انجام شده است. در این فرآیند پاس‌های اعمال شده در سه مرحله به ترتیب ۱، ۳ و ۵ پاس بوده است. متوسط سختی سطح به دست آمده به ترتیب HV ۹۸/۱۲۲، ۹۴/۱۲۷ و ۱۲/۱۲۸ بوده است. بیشترین افزایش سختی سطح پس از اولین پاس رخ داده است و در پاس‌های اول و سوم، افزایش بسیار کمتر بود [۱۴].

سون و همکاران در سال ۲۰۱۸ تأثیر کوبش فراصوتی بر آلیاژ AAY150 آلومینیوم پرداختند در این تحقیق با افزایش دامنه ارتعاشات ضخامت ناحیه تحت تأثیر به صورت قابل توجهی افزایش و زبری سطح کاهش یافته است [۱۵].

ژانگ و همکاران به مطالعه بر روی عملکرد خستگی اتصال جوش داده شده نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ با کوبش فراصوتی پرداختند. تجزیه و تحلیل شکست نمونه‌ها نشان داد که ترک خستگی نمونه‌ها از دانه‌های درشت منشأ شده است. استفاده از فرآیند چکش‌کاری فراصوتی و ضربه باعث بروز ترک‌های خستگی و در نتیجه کاهش استحکام خستگی مفصل AA۶۰۶۱ است [۱۶].

یوسفی و همکاران به بررسی اثر کوبش فراصوتی بر روی آلومینیوم آلیاژ AA۷۰۷۵ پرداختند. در این مطالعه مشاهده شد که خواص سطحی آلومینیوم همچون سختی و زبری سطح نسبت به نمونه اصلی بهبود یافته است. همچنین تغییر شکل پلاستیک شدید موجب ایجاد تنش‌های پسماند فشاری و کوچک شدن ریزساختار شده است [۱۷].

با توجه به بررسی پیشینه تحقیق تاکنون مطالعه کاملی در خصوص بررسی مقاومت به سایش آلیاژ آلومینیوم انجام نشده است. لذا هدف از این تحقیق بررسی پارامترهای فرآیند کوبش فراصوتی شامل دامنه نوسان، نرخ پیشروی ابزار و سرعت دورانی قطعه‌کار و تأثیر آن بر خواص سطحی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و بهبود ویژگی‌های سطحی آن شامل سختی و مقاومت به سایش است.

## ۲- مواد و روش

### ۲-۱- مواد و آماده‌سازی آن‌ها

جنس نمونه‌های انتخاب شده در این آزمون از آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 است. در جدول ۱ خواص مکانیکی این آلیاژ آورده شده است. نمونه‌ها از میلگرد آلومینیوم به قطر ۶۰ میلی‌متر تهیه و برای آماده‌سازی سطح هر یک از نمونه‌ها، عملیات پیشانی تراشی انجام شده است. این عملیات با سرعت دورانی ۳۵۵ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۶ میلی‌متر بر دور و عمق براده برداری برابر ۰/۲ میلی‌متر به صورت یکسان برای تمام نمونه‌ها انجام گردیده است.

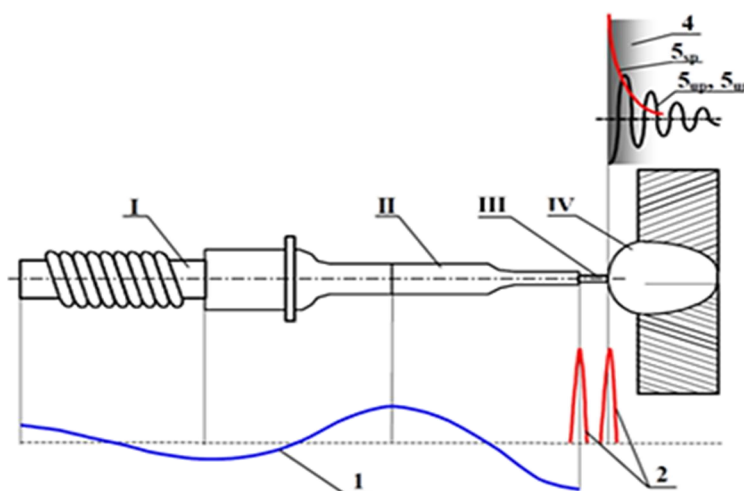
جدول ۱ خواص مکانیکی نمونه‌های استفاده شده

چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ )	مدول الاستیک (GPa)	سختی (V)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)
2.7	69	104	275	310

### ۲-۲- فرآیند کوبش فراصوتی

در فرآیند چکش‌کاری فراصوتی اعمال ضربات به سطح نمونه از طریق ابزار فراصوتی انجام می‌شود. یک ابزار چکش‌کاری فراصوتی معمولاً شامل یک منبع تغذیه است که برق AC را با توان ۵۰-۶۰ وات را به انرژی فراصوتی با فرکانس بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز و توان صد تا هزار وات تبدیل می‌کند. جریان الکتریکی که از منبع تغذیه تولید شده به واسطه یک مبدل یا ترانسدیوسر به نوسان با فرکانس بالا تبدیل می‌شود. شکل ۱ نحوه عملکرد فرآیند چکش‌کاری فراصوتی را نشان می‌دهد. در ابتدای فرآیند منبع تغذیه، انرژی الکتریکی

را به واسطه مبدل (I) تبدیل به انرژی مکانیکی نموده (تولید موج ۱) و نوسانات فراصوتی از طریق متمرکز کننده (II) به ابزار (III) انتقال داده می‌شود. متمرکز کننده می‌تواند دامنه ارتعاشی را افزایش دهد (تولید موج ۲). انرژی ضربات پالسی توسط ابزار (III) به سطح قطعه وارد و باعث ایجاد منطقه پلاستیک (IV) می‌شود. در نتیجه این تغییر شکل پلاستیک، تنش فشاری پسماند در قطعه ایجاد کرده که بانفوذ در عمق قطعه، مقدار آن کاهش می‌یابد. از طرفی در نتیجه این ارتعاشات حرکت لایه‌های سطحی و آزادسازی تنش پسماند رخ می‌دهد [۶].

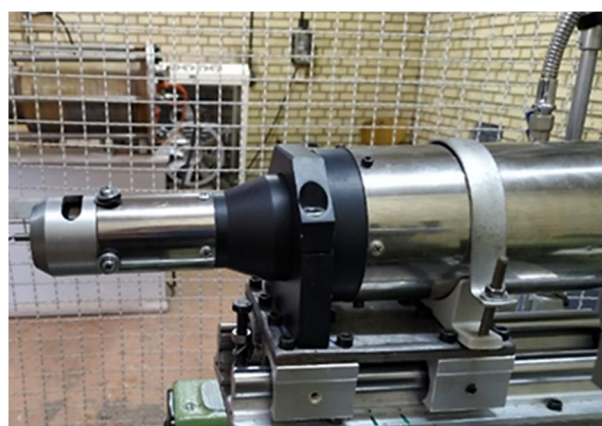


شکل ۱ نحوه کارکرد دستگاه کوبش فراصوتی [۶]

در این تحقیق جهت انجام عملیات چکش کاری فراصوتی از یک دستگاه چکش کاری قابل نصب بر روی دستگاه تراش (شکل ۲-الف) و یک مولد قدرت تولید امواج فراصوتی با قابلیت تغییر توان استفاده شده است. در جدول ۲ مشخصات دستگاه چکش کاری فراصوتی آورده و در شکل ۲-ب تجهیزات کامل دستگاه کوبش فراصوتی نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲ الف) دستگاه کوبش نصب شده بر روی دستگاه تراش ب) تجهیزات کامل فرآیند کوبش فراصوتی

جدول ۲ مشخصات دستگاه کوبش فراصوتی

200×200×600 mm	ابعاد دستگاه
20.7 kHz	فرکانس
PZT8	جنس پیزوالکتریک
1	تعداد پین
15 Kg	وزن
1200 W	توان مصرفی
VCN200	جنس هورن

## ۲-۳- طراحی آزمایش

جهت انجام آزمون چکش کاری با توجه به تعداد پارامترها از روش طراحی آزمایش پاسخ سطح<sup>۱</sup> از نوع مرکب مرکزی<sup>۲</sup> استفاده گردیده است. مقادیر انتخابی آزمون چکش کاری فراصوتی به همراه علامت اختصاری و محدوده آنها در جدول ۳ و شرایط و شماره نمونه‌های تحت عملیات کوبش فراصوتی در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳ متغیرهای انتخابی فرآیند کوبش فراصوتی

متغیر	واحد	علامت اختصاری	محدوده		
			-1	0	+1
دامنه نوسان	( $\mu\text{m}$ )	A	10	11.5	13
سرعت پیشروی	(mm/rev)	B	0.32	0.56	0.8
سرعت دورانی	(RPM)	C	500	750	1000

جدول ۴ شرایط کوبش فراصوتی نمونه‌ها

شماره نمونه	سرعت دورانی (RPM)	نرخ پیشروی (mm/rev)	دامنه نوسان ( $\mu\text{m}$ )	شماره نمونه	سرعت دورانی (RPM)	نرخ پیشروی (mm/rev)	دامنه نوسان ( $\mu\text{m}$ )
1	500	0.32	10	10	1000	0.32	10
2	750	0.56	11.5	11	750	0.56	13
3	1000	0.56	11.5	12	750	0.56	11.5
4	500	0.32	13	13	500	0.32	13
5	750	0.32	11.5	14	750	0.32	11.5
6	1000	0.32	13	15	750	0.32	11.5
8	1000	0.8	10	16	750	0.56	10
8	1000	0.8	13	17	500	0.8	10
9	500	0.56	11.5	18	750	0.56	11.5

## ۲-۴- آزمون میکرو سختی سنجی

پس از چکش کاری نمونه‌ها آزمایش میکرو سختی توسط دستگاه میکروسختی (MICROMET 1, 60044, USA) انجام شد. شرایط اندازه‌گیری برای همه نمونه‌ها یکسان و در نیروی ۱۰gf و به مدت ۲۰ ثانیه انجام شد. برای هر نمونه در ۱۰ نقطه اندازه‌گیری انجام و میانگین آن محاسبه گردیده است.

## ۲-۵- آزمون سایش

آزمون سایش<sup>۳</sup> توسط دستگاه آزمون سایش ترکیبی پین روی دیسک مدل WT50 و با روش چرخشی انجام شد. این آزمون در دمای محیط و با نیروی ۱۰ نیوتن و سرعت ۰/۱m/s و مسافت ۵۰ متر انجام گردید. برای محاسبه مقدار سایش وزن هر یک از نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون با ترازو با قابلیت تفکیک‌پذیری ۰/۰۰۰۱ گرم مدل HR-200 اندازه‌گیری شد. با اندازه‌گیری جرم نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون سایش و به دست آمدن میزان تغییرات جرم ( $\Delta m$ ) نرخ سایش به روش زیر محاسبه گردید. با مشخص بودن مقدار چگالی ( $\rho$ ) تغییرات حجم ( $\Delta V$ ) از رابطه ۱ محاسبه شد [۱۸].

$$\Delta v = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Response Surface Methodology

<sup>2</sup> Central Composite Design

<sup>3</sup> Wear

سپس نرخ سایش ( $R_w$ ) از رابطه ۲ تعیین گردید:

$$R_w = \frac{\Delta v}{N \cdot m} = \frac{\Delta m}{\rho \cdot N \cdot m} \quad (2)$$

در این رابطه  $N$  نیروی سایش برحسب نیوتن و  $m$  مسافت طی شده توسط پین برحسب متر در آزمون سایش است. با استفاده از رابطه ۲ نرخ سایش نمونه خام برابر است:

$$R_w = \frac{-1.45 \times 10^{-2}(gr)}{2.7 \left(\frac{gr}{cm^3}\right) \times 9.8(N) \times 50(m)} = -1.09 \times 10^{-5} \left(\frac{cm^3}{N \cdot m}\right) \quad (3)$$

نرخ سایش نمونه خام برابر است:

$$R_w = \frac{-1.45 \times 10^{-2}(gr)}{2.7 \left(\frac{gr}{cm^3}\right) \times 9.8(N) \times 50(m)} = -1.09 \times 10^{-5} \left(\frac{cm^3}{N \cdot m}\right) \quad (4)$$

## ۴- ارائه نتایج و بحث

### ۴-۱- بررسی اثر پارامترهای فرایند کوبش فراصوتی بر سختی سطحی

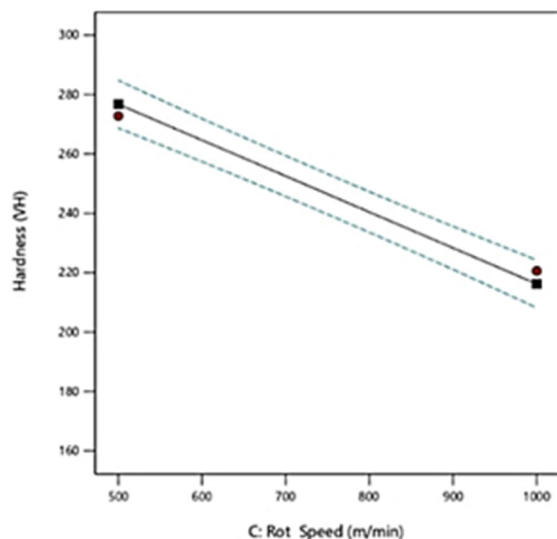
در جدول ۵ نتایج به دست آمده از آزمون سختی سنجی آورده شده است. تأثیر پارامترهای دامنه نوسان، سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر مقدار سختی سطحی در شکل ۳ آورده شده است. شکل ۳-الف تأثیر دامنه نوسان بر سختی سطح را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که با افزایش مقدار دامنه نوسان از ۱۰ میکرون به ۱۳ میکرون سختی افزایش یافته است. دلیل این موضوع را می‌توان چنین بیان کرد که با افزایش دامنه نوسان انرژی حاصل از ضربه زننده افزایش یافته لذا منطقه تغییر شکل پلاستیک و پدیده کار سختی بیشتری حاصل شده است.

در شکل ۳-ب اثر سرعت دورانی بر مقدار سختی نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش دور از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه سختی در نمونه کاهش پیدا کرده است. دلیل این کاهش را می‌توان کاهش مدت زمان تماس ابزار با قطعه کار و به عبارتی تعداد ضربات وارد شده به سطح بیان کرد.

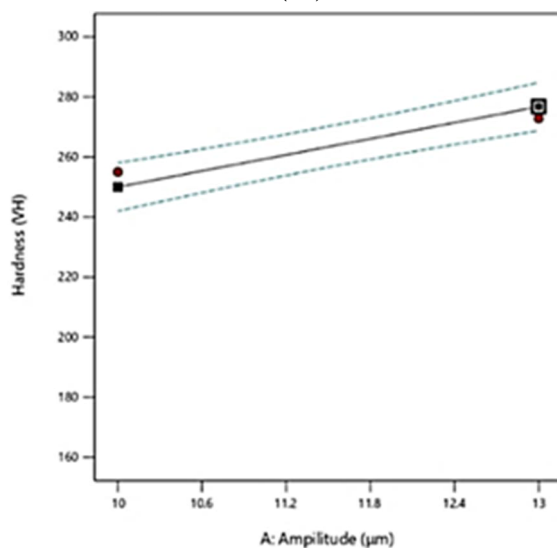
مطابق شکل ۳-ج با افزایش میزان پیشروی از ۰/۳۲ به ۰/۸ میلی‌متر بر دور مقدار سختی افزایش یافته است. در این آزمون بیشترین سختی سطح ایجاد شده در نمونه شماره ۱۳ با دامنه نوسان ۱۳ میکرون، تعداد دور ۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۸ میلی‌متر بر دور برابر با ۲۷۲/۸ ویکرز است. کمترین سختی سطح برای نمونه شماره ۱۰ با شرایط دامنه نوسان ۱۰ میکرون، تعداد دور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و میزان پیشروی ۰/۳۲ میلی‌متر بر دور برابر با ۱۶۸ ویکرز به دست آمده است. مقدار سختی نمونه خام برابر است با ۱۰۵/۷۵ ویکرز است که با توجه به بیشترین سختی به دست آمده با دامنه نوسان ۱۳ میکرون، سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۸ میلی‌متر بر دور برابر با ۲۷۲/۸ ویکرز است، می‌توان گفت که پس از انجام فرآیند کوبش فراصوتی میزان سختی سطح آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در حدود ۱۵۸ درصد افزایش یافته است.

جدول ۵ مقادیر به دست آمده برای سختی نمونه‌ها

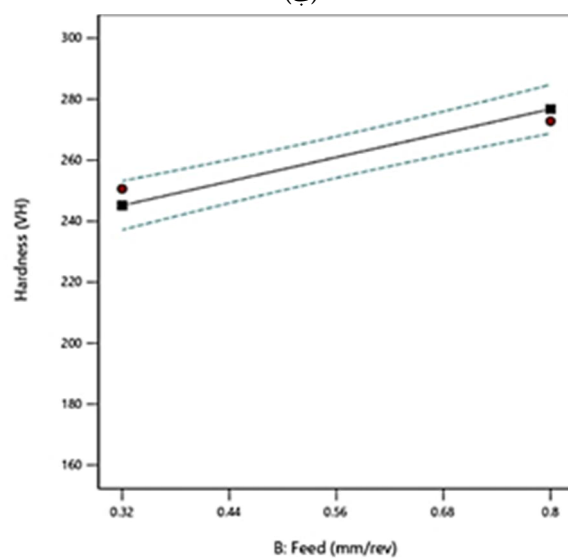
شماره نمونه	سختی (HV)	شماره نمونه	سختی (HV)
1	216	10	168
2	219.2	11	238.2
3	182.2	12	215
4	250.6	13	272.8
5	200.6	14	238.6
6	180.6	15	214.4
7	186.8	16	203.2
8	220.6	17	255
9	264.4	18	203.2



(الف)



(ب)



(ج)

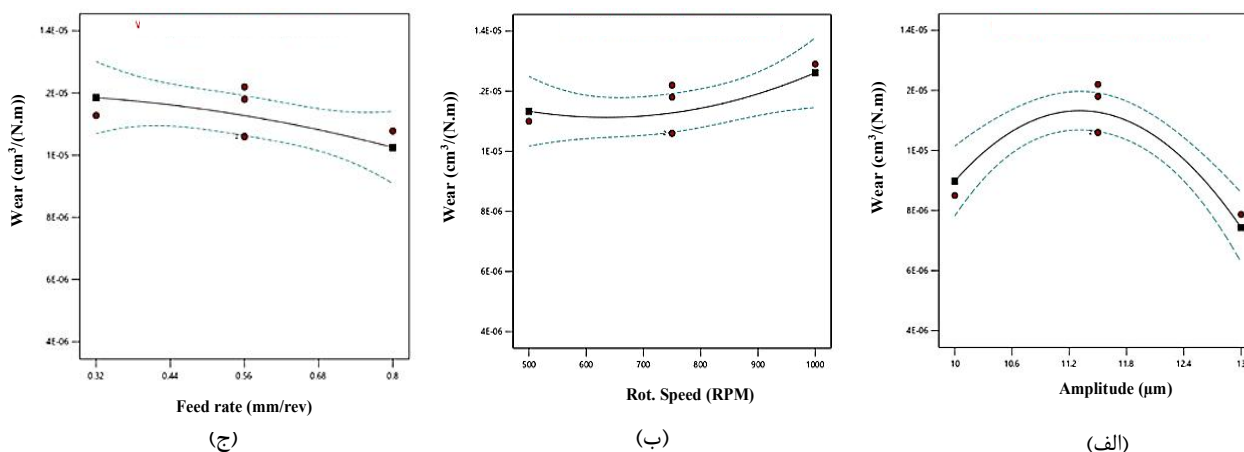
شکل ۳ تأثیر پارامترهای الف) سرعت دوران، ب) دامنه نوسان و ج) نرخ پیشروی بر میکرو سختی

### ۴-۲- بررسی اثر پارامترهای فرایند کوبش فراصوتی بر نرخ سایش

مقادیر نرخ سایش محاسبه شده برای هر یک از نمونه‌ها در جدول ۶ آورده شده است. تأثیر پارامترهای دامنه نوسان، سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر نرخ سایش سطحی در شکل ۴ آورده شده است.

جدول ۶ نرخ سایش نمونه‌ها

شماره نمونه	نرخ سایش $(\frac{cm^3}{N.m})$	شماره نمونه	نرخ سایش $(\frac{cm^3}{N.m})$
1	$1.14 \times 10^{-5}$	10	$1.31 \times 10^{-5}$
2	$1.06 \times 10^{-5}$	11	$7.87 \times 10^{-6}$
3	$1.29 \times 10^{-5}$	12	$1.22 \times 10^{-5}$
4	$6.5 \times 10^{-6}$	13	$8.8 \times 10^{-6}$
5	$1.128 \times 10^{-5}$	14	$1.078 \times 10^{-5}$
6	$7.5 \times 10^{-6}$	15	$1.06 \times 10^{-5}$
7	$8.08 \times 10^{-6}$	16	$8.5 \times 10^{-6}$
8	$8.4 \times 10^{-6}$	17	$5.8 \times 10^{-6}$
9	$1.1 \times 10^{-5}$	18	$1.06 \times 10^{-5}$

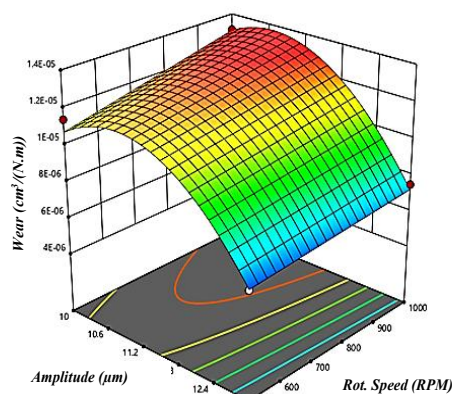


شکل ۴ تأثیر پارامترهای الف) دامنه نوسان، ب) سرعت دوران و ج) نرخ پیشروی بر نرخ سایش

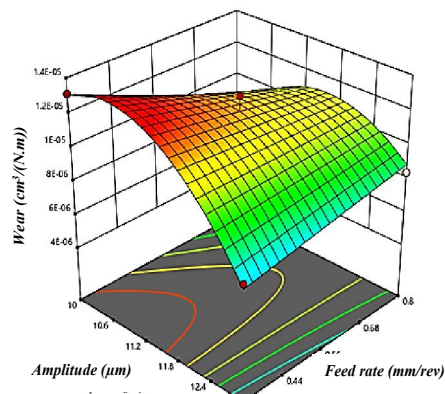
در شکل ۴-الف تغییرات نرخ سایش در برابر تغییرات دامنه نوسان نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده شد که با افزایش مقدار دامنه نوسان ابتدا نرخ سایش افزایش و سپس کاهش یافته است. دلیل افزایش مقاومت به سایش (کاهش نرخ سایش) را می‌توان افزایش سختی در دامنه‌های نوسان بالا بیان کرد. اثر سرعت دورانی بر مقدار نرخ سایش در شکل ۴-ب نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش دور از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نرخ سایش در نمونه تا حدودی افزایش پیدا کرده است. دلیل این افزایش را می‌توان کاهش سختی نمونه‌ها با افزایش سرعت دورانی فرایند بیان کرد. بر اساس شکل ۴-ج با افزایش میزان پیشروی از ۰/۳۲ به ۰/۸ میلی‌متر بر دور مقدار نرخ سایش کاهش یافته است. دلیل این موضوع افزایش سختی در اثر افزایش نرخ پیشروی است. بیشترین مقاومت به سایش در دامنه نوسان ۱۱ میکرون، سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۸ میلی‌متر بر دور بوده است. در این شرایط مقاومت به سایش بر اساس نرخ سایش حدود ۴۶ درصد نسبت به ماده خام افزایش یافته است.

در شکل ۴-۵ الف اثر هم زمان دامنه نوسان و نرخ پیشروی بر نرخ سایش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نرخ پیشروی و دامنه نوسان، مقاومت به سایش افزایش یافته است. به عبارتی برای رسیدن به حداکثر مقاومت به سایش باید سرعت پیشروی و دامنه نوسان بالا استفاده شود.





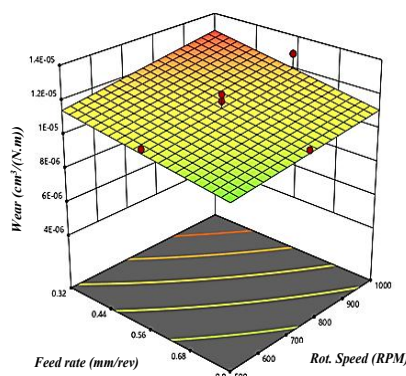
(ب)



(الف)

شکل ۵ الف) تأثیر هم‌زمان میزان پیشروی، دامنه نوسان با تعداد دور اسپیندل ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بر نرخ سایش، ب) تأثیر هم‌زمان تعداد دور اسپیندل و دامنه نوسان با پیشروی ۰/۳۲ میلی‌متر بر دور

در شکل ۵-ب اثر هم‌زمان دو متغیر دامنه نوسان و سرعت دورانی بر سایش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت دورانی مقدار مقاومت به سایش کاهش و با افزایش دامنه نوسان افزایش یافته است. بنابراین استفاده از دامنه نوسان بالا و سرعت دورانی کمتر در فرآیند چکش کاری فراصوتی برای افزایش مقاومت به سایش سطح مناسب است. با توجه به تأثیر متقابل دو متغیر نرخ پیشروی و سرعت دورانی در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ پیشروی مقاومت به سایش افزایش یافته است. این افزایش در سرعت‌های دورانی پایین‌تر کمتر بوده است.



شکل ۶ تأثیر هم‌زمان میزان پیشروی و تعداد دور با دامنه نوسان ۱۱/۵ میکرون

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر فرآیند کوبش فراصوتی بر خواص سایشی آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 پرداخته شده است. دامنه نوسان، سرعت دورانی و نرخ پیشروی به‌عنوان پارامترهای ورودی فرآیند کوبش فراصوتی در آزمون‌های عملی انتخاب گردید و نتایج به‌دست آمده به‌طور خلاصه به شرح زیر است.

- با افزایش دامنه نوسان و نرخ پیشروی سختی سطحی افزایش و با افزایش سرعت دورانی سختی کاهش یافته است.
- بیشترین سختی سطحی با دامنه نوسان ۱۳ میکرون، سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۸ میلی‌متر بر دور بوده است. در این شرایط در حدود ۱۴۱/۴ درصد افزایش سختی نسبت به حالت خام اتفاق افتاده است.
- با افزایش دامنه نوسان و نرخ پیشروی نرخ سایش کاهش و با افزایش سرعت دورانی نرخ سایش افزایش یافته است.
- بیشترین مقاومت به سایش در دامنه نوسان ۱۱ میکرون، سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۸ میلی‌متر بر دور بوده است. در این شرایط مقاومت به سایش بر اساس نرخ سایش حدود ۴۶ درصد نسبت به ماده خام افزایش یافته است.

## References

- [1] Mattox, Donald M. Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing. William Andrew, 2010.
- [2] Liu Y, Wang L, Wang D. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011; 211(12):2106-2113. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.009
- [3] kbarzadeh B, Gorji H, Bakhshi M, Jamaati, R, Mirnia, M. J. Development of a new process for the severe plastic deformation of AA 1050 to improve the mechanical properties. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020; 7(4): 19-29. [In Persian]
- [4] Abdullah A, Pak A, Abedini A. Design and Manufacture of Ultrasonic Hammer Penning Tool. Patent, Iran, 2009.
- [5] Liang L, Miru K, Seungjun L, Jongman K, Hyunse K, Deugwoo L. Study on surface modification of aluminum 6061 by multiple ultrasonic impact treatments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018; 96: 1255-1264. doi: 10.1016/j.msea.2004.07.025
- [6] Statnikov S. Guide for application of ultrasonic impact treatment improving fatigue life of welded structures. *International Institute of Welding*. 1999; 1757.99: 1-17.
- [7] Zhu Q, Fang Z, Sun M, Da Ma T, Klimenov V. A, Borozna V, Hong Zhu V. Effect of ultrasonic surface peening on fatigue property of 7B04 high strength and toughness aluminum alloy. *Materials Science Forum*. 2010; 654: 1892-1895. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.1892
- [8] Rasooli M, Moshref-Javadi M, Taheri Zadeh A. Investigation of ultrasonic vibration effects on the microstructure and hardness of aluminum alloy 2024 tube spinning parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;77(9): 2117-2124. doi: 10.1007/s00170-014-6500-5
- [9] He Y.Z, Wang D, Ying W. A. N. G, Zhang H. Correction of buckling distortion by ultrasonic shot peening treatment for 5A06 aluminum alloy welded structure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016; 26.6: 1531-1537. doi: 10.1016/S1003-6326(16)64259-0
- [10] Feng Y, Hu S, Wang D, Cui L. Formation of short crack and its effect on fatigue properties of ultrasonic peening treatment S355 steel. *Materials & Design*. 2016; 89: 507-515. doi: 10.1016/j.matdes.2015.10.009
- [11] Hadzima B, Nový F, Trško, L Pastorek F, Jambor M, Fintová S. Shot peening as a pre-treatment to anodic oxidation coating process of AW 6082 aluminum for fatigue life improvement. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017; 939(9): 3315-3323. doi: 10.1007/s00170-017-0776-1
- [12] Pandey V, Singh J, Chattopadhyay K, Srinivas S, Singh V. Influence of ultrasonic shot peening on corrosion behavior of 7075 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;723: 826-840. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.06.310
- [13] Liang 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): 1255-1264. doi: 10.1007/s00170-018-1666-x
- [14] Sun Q, Han Q, Xu R, Zhao K, Li J. Localized corrosion behavior of AA7150 after ultrasonic shot peening: Corrosion depth vs. impact energy. *Corrosion Science*. 2018; 130: 218-230. doi: 10.1016/j.corsci.2017.11.008
- [15] Zhang R, Li X, Liu L, He C, Wang Q. Effect of ultrasonic peening treatment on VHCF behavior of friction stir welded joints in aluminum alloys, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; 611(1): 012011. doi: 10.30684/etj.v39i9.1725
- [16] Zhu L, Guan Y, Wang Z, Zheng H, Lin J, Zhai J, Xie Z. Influence of Surface Nano crystallization and Partial Amorphization Induced by Ultrasonic Shot Peening on Surface Properties of 7075 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020; 29(11): 7693-7709. doi: 10.1007/s11665-020-05219-5
- [17] Efe Y, Karademir I, Husem F, Maleki E, Karimbaev R, Amanov A, Unal O. Enhancement in microstructural and mechanical performance of AA7075 aluminum alloy via severe shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification. *Applied Surface Science*. 2020; 528: 146922. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.146922
- [18] Elmkhah H. Nano engineering of hard coatings (Properties, Applications, Coating technology). Bu-Ali Sina University; 2019.