



# The Effect of Copper Microstructure on Surface Characteristics in Roller Burnishing Process

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Khalilpourazary S\*<sup>1</sup>

### How to cite this article

Khalilpourazary S. The Effect of Copper Microstructure on Surface Characteristics in Roller Burnishing Process. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(07):451-460.

<sup>1</sup> Department of Renewable Energy, Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

### \*Correspondence

Address: Department of Renewable Energy, Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.  
s.khalilpour@mee.uut.ac.ir

### Article History

Received: January 19, 2022

Accepted: March 13, 2022

ePublished: June 06, 2022

## ABSTRACT

The microstructure characteristics of the material have a significant effect on the results of plastic deformation processes. In this research, the effect of the coarse and fine-grained microstructure on the microhardness and surface quality in the roller burnishing process has been scrutinized. To facilitate comparison of the results, the input parameters including the size of the workpieces, speed, feed rate, the number of passes, the penetration depth, and burnishing tool were selected the same in all experiments. The results revealed that before the surface devastation, the arithmetic average of surface roughness of the coarse-grained microstructure decreased more than the fine-grained microstructure. Moreover, the penetration depth of the burnishing tool in the coarse-grained microstructure is more than the fine-grained, which indicates its proper ductility. With increasing the number of passes in the roller burnishing process, the surface microhardness of coarse and fine-grained microstructures has gradually increased and in all cases, the microhardness of the fine-grained microstructure is higher than the coarse-grained microstructure. Measurement of sub-surface hardness values shows that the microhardness in coarse-grained microstructure has increased to a greater depth than the fine-grained structure.

**Keywords** Roller burnishing, Microstructure, Microhardness, Surface quality

## CITATION LINKS

[1] Investigation of the burnishing process with PCD tool on non-ferrous metals. [2] Machining: fundamentals and recent advances. [3] Machining technology: machine tools and operations. [4] Surface improvement through hybridization of electrochemical turning and roller burnishing based on the Taguchi technique. [5] Study of Internal Roller Burnishing Operation on En8 Material. [6] How alumina nanoparticles impact surface characteristics of Al7175 in roller burnishing process. [7] Effect of burnishing parameters on the surface quality and hardness. [8] An investigation of the mechanics of roller burnishing through finite element simulation and experiments. [9] Optimization of the Internal Roller Burnishing Process for Energy Reduction and Surface Properties. [10] Effect of burnishing on Inconel 718 workpiece surface heated by infrared radiation. [11] Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model. [12] Microstructural characteristics of ultrafine-grained aluminum produced using equal-channel angular pressing. [13] The effect of ECAP deformation route on microstructure, mechanical and electrochemical properties of low CN Fe-20% Cr alloy. [14] Ductile fracture analysis of annealed and ECAPed pure copper. [15] Fatigue behavior of nano-grained copper prepared by ECAP. [16] ASTM standard E112-96. Standard test methods for determining average grain size. [17] Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals. [18] Metal cutting theory and practice. [19] Optimization of interior roller burnishing process for improving surface quality. [20] ISO E. 4287-Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface Texture: Profile Method-Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. [21] Designing energy-efficient high-precision multi-pass turning processes via robust optimization and artificial intelligence. [22] Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness, and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminum alloys. [23] Investigation of texture characteristics of deformed layers in burnished 2024 aluminum alloy subsurface by EBSD. [24] Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80.

## تأثیر ریزساختار مس بر ویژگی‌های سطح در فرآیند جلاکاری غلتکی

سامان خلیل پورآذری\*

دانشکده انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

ویژگی‌های اولیه ریزساختار مواد بر روی نتایج حاصل از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک تأثیر به‌سزایی دارد. در این تحقیق اثر ریزساختار درشت و ریزدانه بر مقادیر میکروسختی و کیفیت سطح در فرآیند جلاکاری غلتکی بررسی شده است. به منظور تسهیل مقایسه نتایج، عوامل ورودی شامل اندازه قطعه‌کارها، سرعت، پیشروی، عمق نفوذ، تعداد پاس و ابزار جلاکاری در تمام آزمایش‌ها به صورت یکسان انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان زبری میانگین سطح قبل از تخریب آن، در ریزساختار درشت‌دانه بیش از حالت ریزدانه شده کاهش یافته و عمق نفوذ نهایی ابزار نیز در ریزساختار درشت‌دانه بیش از ریزدانه است که بیانگر شکل‌پذیری مناسب آن می‌باشد. با افزایش تعداد پاس‌ها در فرآیند جلاکاری غلتکی، میزان سختی سطح ریزساختار درشت‌دانه و ریزدانه نیز به تدریج افزایش یافته است و در تمام موارد ریزسختی ریزساختار ریزدانه بیشتر از درشت‌دانه است. اندازه‌گیری سختی زیرلایه در فرآیند جلاکاری غلتکی نیز نشان می‌دهد که ریزسختی در ریزساختار درشت‌دانه نسبت به ریزدانه تا عمق بیشتری افزایش یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** جلاکاری غلتکی، ریزساختار، میکروسختی، کیفیت سطح

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲

\*نویسنده مسئول: s.khalilpour@mee.uut.ac.ir

### ۱- مقدمه

فرآیندهای پرداخت کاری نظیر سنگ‌زنی، هونینگ و لپینگ نیازمند استفاده از ماشین‌ابزارهای مجزا، مخصوص و گران‌قیمت می‌باشند که بر پایه براده‌برداری از روی سطح قطعه‌کار تا رسیدن به نتیجه مطلوب طرح‌ریزی شده‌اند. همچنین کاربرد ابزار مناسب برای پرداخت کاری در این روشها، مستلزم صرف هزینه بالایی بوده و غالباً باید براساس جنس قطعه‌کار و ویژگی‌های آن تعیین گردد. بنابراین در سال‌های اخیر جهت جایگزینی فرآیندهای پرداخت ثانویه و جلوگیری از انباشت هزینه‌های تولید که منجر به افزایش قیمت نهایی محصول می‌گردد، تحقیقات مستمری صورت گرفته است. روش جلاکاری سطح، یک روش جایگزین است که در آن پرداخت قطعات بدون برداشت براده از سطح آنها قابل انجام است. این روش به دلیل اینکه افزایش کیفیت سطح در برخی از فلزات غیرآهنی نظیر مس و آلومینیوم با روش‌هایی مانند سنگ‌زنی بسیار دشوار است، به شدت مورد توجه قرار گرفته است [1]. همچنین عدم برداشت براده در این روش خصوصاً در مورد فلزات گران‌قیمت مانند بریلیم، مس و تیتانیوم دیگر مزیت اصلی این روش محسوب می‌شود. اجرای فرآیند جلاکاری که به یکی از دو صورت غلتکی و ساچمه‌ای انجام می‌گیرد، نیازمند کاربرد ماشین

خاص نبوده و به راحتی می‌توان آن را به صورت همزمان به عنوان یک فرآیند ترکیبی با روش‌هایی نظیر تراشکاری و فرزکاری در ماشین تراش و فرز به کار گرفت [2]. در روش جلاکاری از ترکیب اعمال فشار بر سطح قطعه‌کار توسط یک ابزار جلاکار با سختی بیشتر از ماده قطعه‌کار و حرکت پیشروی این ابزار بر روی سطح قطعه که منجر به ایجاد تنش برشی در سطح آن می‌گردد، استفاده می‌شود. میزان فشار اعمالی در این روش تابعی از عمق نفوذ ابزار جلاکار به داخل قطعه‌کار است. همچنین حرکت پیشروی ابزار از طریق ایجاد سازوکار تغییر شکل برشی، سبب تغییر شکل پلاستیک در سطح قطعه‌کار شده و با این کار سختی سطحی قطعه‌کار نیز افزایش می‌یابد. از این دیدگاه حتی می‌توان فرآیند جلاکاری را جزئی از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک دانست. از طرف دیگر در فرآیند جلاکاری غلتکی، ارتفاع قله‌های میکروسکوپی به واسطه فشار ابزار بر سطح قطعه‌کار کاهش یافته و در ضمن حرکت ابزار جلاکار بر روی سطح، ماده حاصل از آنها در مقیاس میکرونی صرف پرکردن پستی‌های میکروسکوپی روی سطح می‌گردد. نتیجه این عمل، کاهش زبری سطح بعد از اجرای فرآیند جلاکاری است [3]. از عوامل مؤثر بر فرآیند جلاکاری می‌توان به: (۱) ویژگی‌های هندسی و جنس ابزار، (۲) پارامترهای فرآیند جلاکاری نظیر عمق نفوذ، میزان پیشروی و تعداد پاس‌های عبور ابزار جلاکاری از روی قطعه‌کار و (۳) ویژگی‌های ماده قطعه‌کار اشاره نمود. با توجه به پیچیدگی تحلیل تمام این عوامل ورودی در فرآیند جلاکاری، تحقیقات زیادی در رابطه با بررسی دقیق این فرآیند نیز به انجام رسیده است.

عبید و ایطویل از کاربرد هم‌زمان فرآیند جلاکاری غلتکی و ماشین‌کاری الکتروشیمیایی برای افزایش کیفیت سطوح در قطعات آلیاژ آلومینیوم-روی-منیزیم استفاده نمودند. آنها با کاربرد تکنیک طراحی آزمایشات به روش تاگوچی ترکیب پارامترهای ورودی شامل سرعت برشی، پیشروی، عمق نفوذ و تعداد پاس را تعیین و نشان دادند که استفاده از این روش سبب کاهش چشمگیری در میزان زبری سطح قطعات تولید شده می‌گردد [4]. سانداراجان و ناکاراجان روش جلاکاری غلتکی را برای ارتقا کیفیت سطح داخلی سوراخ‌های ایجاد شده در قطعات از جنس EN8 به کار گرفتند. فرآیند جلاکاری غلتکی با استفاده از یک ماشین سوراخ‌کاری با پیشروی ثابت و مقادیر مختلف سرعت اسپیندل در محدوده یکصد تا دو هزار و هفتصد دور بر دقیقه به انجام رسید. سوراخ‌های پرداخت شده سپس از نظر ابعادی مورد بررسی قرار گرفته و کیفیت سطح داخلی آنها بررسی شد. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته منجر به تعیین یک سرعت دورانی بهینه برای اسپیندل جهت حصول به بالاترین کیفیت سطح در قطعات تولیدی گردید [5].

خلیل پورآذری و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر استفاده از نانوسیال متشکل از اتانول و نانو ذرات آلومینا را بر روی کیفیت و سختی

استفاده و نتایج را با جلاکاری غلتکی در دمای اتاق مقایسه نمودند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از فرآیند جلاکاری در این آلیاژ سبب افزایش سختی سطح در محدوده پانزده تا بیست درصدی می‌گردد[11].

در تحقیق حاضر اثر ریزساختار فلز مس بر میزان کیفیت و سختی سطح در فرآیند جلاکاری غلتکی مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور ابتدا تمام نمونه‌ها تاب‌کاری شده و سپس تعدادی از نمونه‌ها در یک قالب دو تکه با روش پرس در کانال‌های زاویه‌دار مساوی (ایکپ) در یک پاس تغییر شکل یافتند. سپس نمونه‌ها ماشین‌کاری گردیده و به منظور تسهیل مقایسه نتایج بین نمونه‌های مس آنیل و ریزدانه شده، فرآیند ماشین‌کاری اولیه توسط روش تاگوچی طراحی شد. در ادامه فرآیند جلاکاری غلتکی بر روی تمام نمونه‌ها انجام و نتایج کیفیت و سختی سطح قطعات با هم مقایسه شد. نوآوری مقاله حاضر را در چند بخش می‌توان مورد توجه قرار داد: (۱) تحقیقات انجام شده‌ای در زمینه بررسی تأثیر ریزساختار فلز مس بر پارامترهای خروجی فرآیند جلاکاری وجود ندارد. (۲) این مقاله به نحوی اثر فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار مساوی بر روی کیفیت سطح و سختی سطحی در فرآیند جلاکاری را بررسی نموده که عملاً چنین تحقیقی در مورد فلز مس و به جرأت در مورد هیچ فلز دیگری تاکنون به انجام نرسیده است. (۳) تاکنون در هیچ مرجعی حد آسیب و تخریب در فرآیند جلاکاری فلز مس ارائه نشده است. (۴) این مقاله با توجه به ناتوانی فرآیند سنگ‌زنی در افزایش کیفیت سطح قطعات غیرآهنی بخصوص مس، تلاش دارد تا پتانسیل روش جلاکاری غلتکی را ارزیابی و آن را به عنوان روشی مطمئن و کم‌هزینه به کاربران صنعتی این تحقیق پیشنهاد نماید.

## ۲- مواد و تجهیزات آزمایش

### ۲-۱- قطعه‌کار

ماده مورد استفاده در این تحقیق از میلگرد مس خالص اکستروند شده با خلوص ۹۹/۹ درصد و با قطر خام بیست و دو میلی‌متر می‌باشد.

### ۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌های اولیه

با توجه به اینکه هدف این تحقیق مطالعه اثر فرآیند جلاکاری بر روی خروجی‌های خروجی صافی سطح، میزان سختی در سطح و زیرلایه قطعات مس آنیل و ریزدانه شده می‌باشد، ابتدا تمام میلگردهای مسی خریداری شده به طول موردنظر برش‌کاری و سپس در کوره عملیات حرارتی تحت فرآیند تاب‌کاری در دمای پانصد و بیست درجه سانتیگراد به مدت هفتاد و پنج دقیقه قرار گرفت. سپس تعدادی از نمونه‌های آنیل برای رسیدن به اندازه دانه ریزتر در یک پاس توسط یک قالب دو تکه با زاویه کانال نود درجه و با روان‌کاری سولفید مولیبدن تحت فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار مساوی در دمای اتاق قرار گرفت. همچنین تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در نمونه‌های مسی با خلوص بالا

قطعات استوانه‌ای شکل از آلومینیوم ۷۱۷۵ در فرآیند جلاکاری غلتکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از مقایسه این فرآیند با جلاکاری غلتکی بدون روان‌کاری یا خشک نشان داد که استفاده از نانو سیال به ترتیب سبب کاهش و افزایش هر چه بیشتر زبری سطح و سختی قطعات در مقایسه با جلاکاری در حالت خشک شده است. همچنین در این تحقیق به اثبات رسید که استفاده از نانوسیال حاوی ذرات آلومینا سبب ایجاد لایه‌ای پوشش‌دهنده بر روی سطح قطعات جلاکاری شده که می‌تواند به عنوان پوشش محافظ در این قطعات جهت افزایش مقاومت به سایش سطح به کار گرفته شود[6]. همچنین چوبان اوغلو و اُزتورک نیز مقادیر به دست آمده از میزان کیفیت سطح و میکروسختی ایجاد شده در فرآیند جلاکاری غلتکی نمونه‌های فولاد کربنی AISI 1040 را بررسی نموده‌اند. در این تحقیق سرعت، پیشروی و نیروی جلاکاری به عنوان عوامل ورودی در نظر گرفته شده و سپس از روش تاگوچی برای بررسی اثر همزمان عوامل ورودی استفاده گردید. نتایج تحقیقات نشان داد که بیشترین تأثیر در افزایش عوامل خروجی را تغییرات عامل ورودی پیشروی به خود اختصاص داده است[7]. بالاند و همکاران نیز از تحلیل اجزا محدود برای بررسی موقعیت تنش در فرآیند جلاکاری غلتکی فولاد 11SMn30 استفاده نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که دقت مدل ارائه شده ضمن تطابق با داده‌های عملی و آزمایش‌ها، دارای توان چشمگیری در پیش‌بینی مقادیر سختی و تنش‌های پسماند قطعات بعد از اجرای فرآیند جلاکاری غلتکی بوده است[8]. نگوپن و له در سال ۲۰۲۱ مدلی را بر پایه منطق فازی برای حصول به مقادیر حداقل مصرف انرژی و زبری سطح و نیز حداکثر میزان سختی سطحی در فرآیند جلاکاری غلتکی سطوح سوراخ‌ها ارائه دادند. در این مدل عوامل سرعت اسپیندل، پیشروی، عمق نفوذ ابزار و تعداد پاس به عنوان عوامل ورودی انتخاب گردید. به منظور افزایش دقت مدل ارائه شده، نتایج خروجی از مدل مجدداً با استفاده از الگوریتم پرندگان بهینه‌سازی شد. نتایج نشان‌دهنده دقت مدل پیشنهادی و کاهش شانزده درصدی مقدار انرژی و بیست و چهار درصدی زبری سطح و افزایش چهار درصدی میزان سختی قطعات تولیدی با انتخاب عوامل ورودی بهینه بوده است[9].

کاسارین و همکاران در سال ۲۰۲۱ از اشعه مادون قرمز و دمای سیصد و ده درجه سانتیگراد برای انجام فرآیند جلاکاری غلتکی بر روی اینکونل ۷۱۸ استفاده کرده و نتایج را با همین فرآیند در دمای اتاق مقایسه نمودند. عوامل خروجی بررسی شده شامل مقادیر زبری سطح، انحراف از دایروی بودن قطعات استوانه‌ای جلاکاری شده، ریزسختی و تنش پسماند بوده است. نتایج تحقیق بیانگر بهبود تمام عوامل خروجی فرآیند جلاکاری در دمای بالا نسبت به دمای اتاق می‌باشد[10]. هوانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ از فرآیند جلاکاری غلتکی بردتی توسط مایع نیتروژن به منظور بررسی عوامل سختی سطح در قطعات دیسکی شکل آلومینیوم ۷۰۵۰

جدول ۱) سطح‌بندی پارامترهای ورودی

ردیف	پارامتر	سطح يك	سطح دو	سطح سه
۱	سرعت اسپیندل (دور بر دقیقه)	۴۵۰	۶۰۰	۷۰۰
۲	پیشروی (میلیمتر بر دور)	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸
۳	عمق بار (میلیمتر)	۰/۵	۰/۸۵	۱

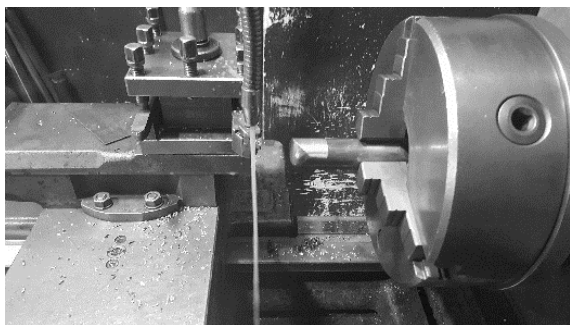
جدول ۲) طراحی آزمایش به روش تاگوجی براساس آرایه متعامد L9 و نتایج آزمایشات

شماره آزمایش	سرعت اسپیندل	پیشروی	عمق بار	زبری میانگین نمونه آنیل (میکرومتر)	زبری میانگین نمونه ریزدانه شده (میکرومتر)
۱	۱	۱	۱	۲۸/۵۷	۲۱/۴۲
۲	۱	۲	۲	۱۵/۴۱	۱۳/۸۵
۳	۱	۳	۳	۱۹/۸۶	۱۶/۷۰
۴	۲	۱	۲	۱۷/۳۰	۱۵/۷۶
۵	۲	۲	۳	۱۲/۸۳	۱۱/۱۴
۶	۲	۳	۱	۱۳/۷۸	۱۲/۹۴
۷	۳	۱	۳	۱۴/۴۲	۱۲/۸۹
۸	۳	۲	۱	۱۸/۹۶	۱۷/۴۳
۹	۳	۳	۲	۲۲/۲۱	۱۸/۷۴

مقادیر اندازه‌گیری شده زبری میانگین سطح در آزمایش‌ها با این مقادیر ورودی به ترتیب برای نمونه آنیل و ریزدانه شده برابر با ۱۲/۸۳ و ۱۱/۱۴ میکرومتر بوده که اختلاف عددی زیادی را بین نمونه‌های مسی آنیل و ریزدانه شده نشان نمی‌دهد. در شکل (۱)، نمایی از فرآیند تراشکاری نمونه مس ریزدانه شده نشان داده شده است.

#### ۲-۴- فرآیند جلاکاری غلتکی

برای اجرای فرآیند جلاکاری از ماشین تراش شرکت ماشین سازی تبریز مدل TN71/3000B استفاده شد. ابزار به کار گرفته شده در فرآیند جلاکاری غلتکی دارای تنه نگهدارنده از جنس فولاد کم‌کربن St37 با مقطع مستطیلی به ابعاد ۱۵×۲۸ میلیمتر بوده و در یکی از وسط دو انتهای آن توسط ابزار انگشتی در ماشین فرز، شیار ایجاد شده است. این شیار برای قرار دادن بلبرینگ از جنس فولاد AISI 52100 با قطر خارجی بیست میلیمتر با استفاده از پین بر روی تنه ابزار تعبیه شده است.



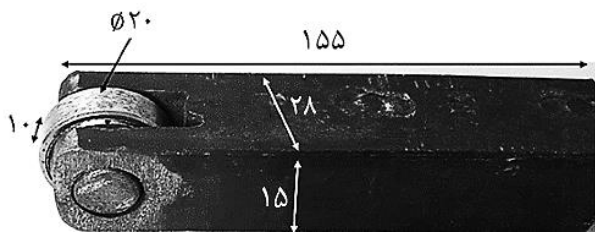
شکل ۱) فرآیند تراشکاری مس ریزدانه شده در یک پاس

بیشترین میزان افزایش سختی و استحکام تسلیم در روش پرس در کانال‌های زاویه‌دار مساوی در پاس اول اتفاق می‌افتد و در پاس‌های دیگر اختلاف کمی بین نمونه‌ها وجود دارد [12-15]. از این رو در این مقاله در کنار نمونه‌های آنیل شده فقط از نمونه‌های ریزدانه شده در یک پاس برای بررسی فرآیند جلاکاری غلتکی استفاده شده است. برای بررسی ریزساختار بیلت‌های مسی آنیل و ریزدانه شده، ابتدا این نمونه‌ها در رزین فنولیک مانت شده و در ادامه نمونه‌ها با استفاده از کاغذ سمباده از جنس سیلیکون کاربرد با درجه‌بندی هزار، دوهزار و پنج‌هزار سمباده‌زنی شدند. برای پولیش‌کاری نهایی مقطع نمونه‌ها قبل از اجرای فرآیند اچ کردن، جهت حصول به نمایی واضح از ریزساختار قطعات، از خمیر ساینده حاوی ذرات الماس با اندازه یک میکرون استفاده گردید. سپس نمونه‌ها با استفاده از ترکیب پنج گرم تری کلرید آهن، چهل میلی-لیتر اسید هیدروکلریک و یکصد میلی‌لیتر الکل اتانول اچ شده و سریعاً سطح آنها با آب مقطر شسته و خشک گردید. برای مشاهده ریزساختار نمونه‌ها نیز از میکروسکوپ نوری و برای حصول به اندازه میانگین دانه‌ها از روش تقاطع‌دهی خطوط مستقیم، با کمک نرم‌افزار MIP Cloud استفاده شد [16].

#### ۲-۳- ماشین‌کاری نمونه‌ها

جهت زدودن اثرات روانکار از روی سطح بیرونی قطعات استوانه‌ای شکل مس آنیل و ریزدانه شده در یک پاس، از اینسرت فولاد تندبر گردید تی-پانزده استفاده شده و قطر و طول استوانه‌ها به ترتیب در ماشین تراش مدل TN71/3000B به بیست میلیمتر و هفتاد میلیمتر کاهش یافت. با توجه به اینکه بعد از فرآیند تراشکاری، فرآیند جلاکاری غلتکی بر روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد، جهت سهولت مقایسه بین نتایج اجرای فرآیند جلاکاری بر روی مقادیر صافی سطح نمونه‌های آنیل و ریزدانه شده در یک پاس، در بخش ماشین‌کاری آزمایشی با سه سطح به روش تاگوجی برای عوامل ورودی سرعت دوران اسپیندل، پیشروی و عمق بار طراحی گردید تا مقادیر مناسب ورودی برای دستیابی به حداکثر میزان صافی سطح با مقادیر نزدیک به هم در نمونه‌های مس آنیل و ریزدانه شده به دست آید. در جدول (۱)، پارامترهای ورودی آزمایش، سطح‌بندی و مقادیر آنها در هر سطح ارائه شده است.

در جدول (۲)، نیز نحوه طراحی آزمایشات به روش تاگوجی و نتایج اندازه‌گیری شده زبری سطح پس از تراشکاری بیلت‌های استوانه‌ای مس آنیل و ریزدانه شده ارائه گردیده است. در این جدول مقادیر ارائه شده برای زبری میانگین سطح در هر آزمایش براساس اندازه‌گیری متوسط مقادیر بعد از سه بار اندازه‌گیری متوالی تعیین شده است. براساس نتایج به دست آمده در هر دو آزمایش مقادیر مناسب برای عوامل ورودی سرعت اسپیندل، پیشروی و عمق بار به ترتیب از سطح دو، دو و سه انتخاب گردید.



شکل ۲) نمایی از ابزار جلاکاری غلتکی مورد استفاده در این تحقیق (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۳) اجرای فرآیند جلاکاری غلتکی بر روی نمونه مس آنیل

برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها نیز از دستگاه فاکون چهارصد ساخت شرکت اینوآ تست استفاده گردید که در آن برای تعیین مقادیر سختی، بار بیست گرمی به مدت ده ثانیه بر روی نمونه‌ها اعمال شد. همچنین برای تهیه تصاویر عیوب از سطح نمونه‌های جلاکاری شده نیز از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRA3 FEG-SEM ساخت شرکت تسکان استفاده گردیده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ریزساختار نمونه‌های مس

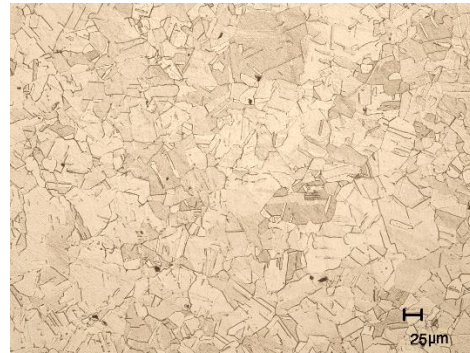
در شکل (۴)، ریزساختار مس آنیل و ریزدانه شده توسط فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار مساوی در یک پاس نشان داده شده است. طبق شکل (۴)، ساختار مس آنیل شده در این تحقیق متشکل از دانه‌های نسبتاً هم محور با چگالی بالایی از دوقلوپی می‌باشد. لازم به ذکر است که در شبکه‌های کریستالی مکعبی از نوع وجوه مرکزدار مانند فلز مس پیدایش دوقلوپی‌ها به نوع عملیات حرارتی انجام گرفته بر روی ریزساختار بستگی داشته و احتمال بروز آن در حین فرآیند آنیل مس بالا و قابل انتظار بوده است. در ریزساختار مس ریزدانه شده در یک پاس، کشیدگی دانه‌ها در امتداد اجرای فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار مساوی مشهود بوده و کاهش اندازه میانگین دانه‌ها در مقایسه با مس آنیل چشمگیر است. با توجه به تصاویر ریزساختار و بر طبق بررسی‌های انجام گرفته با نرم‌افزار، اندازه میانگین دانه در مس آنیل و ریزدانه شده به ترتیب برابر با بیست و سه و پنج و سه دهم میکرون تعیین گردید.

لازم به ذکر است که فولاد AISI 52100 دارای درصد بالایی از عناصر کربن و کروم بوده و از استحکام مناسبی برای اجرای فرآیند جلاکاری بر روی فلزات نرم‌تر نظیر مس برخوردار است. در شکل (۲)، نمایی از ابزار مورد استفاده در این تحقیق و ابعاد قسمت‌های مختلف آن ارائه شده است.

سپس فرآیند جلاکاری غلتکی در حالت بدون روان‌کار در دمای اتاق بر روی طول چهل سانتیمتر از استوانه‌های مس ماشینکاری شده، اجرا گردید. برای اجرای فرآیند جلاکاری غلتکی بر روی نمونه‌های مس آنیل و ریزدانه، تمام نمونه‌ها مابین سه‌نظام و مرغک مهار شده و ابزار جلاکاری در ابزارگیر ماشین طوری محکم شد که ارتفاع مرکز بلبرینگ با نوک مرغک به یک اندازه باشد. برای اعمال عمق نفوذ به ابزار نیز از جابجایی سوپرت عرضی ماشین تراش استفاده گردید. همچنین جهت سهولت مقایسه بین مقادیر سختی و صافی سطح از مقادیر یکسان سرعت و پیشروی که به ترتیب برابر با صد و هشتاد دور بر دقیقه و بازده صدم میلی‌متر بر دور است، استفاده شد<sup>[17]</sup>. بررسی منابع علمی مختلف نشان می‌دهد که در بین عوامل ورودی فرآیند جلاکاری سرعت دوران اسپیندل کمترین اثر را بر روی نتایج کیفیت سطح و سختی سطح قطعات دارد و مهمترین عوامل را می‌توان پیشروی و عمق نفوذ ابزار که تعیین‌کننده میزان نیروی وارد بر سطح قطعه‌کار است، دانست<sup>[18]</sup>. پیشروی ابزار جلاکاری بر روی سطح قطعه در حقیقت میزان جابجایی ابزار در هر دور از قطعه‌کار است که مقدار اندک آن نتایج بهتری را در افزایش کیفیت سطح در فرآیند جلاکاری ایفا می‌نماید. تحقیقات انجام شده در زمینه فرآیند جلاکاری که مشتمل بر مدل‌سازی‌های پیشرفته و بررسی اثر برهمکنش عوامل ورودی است، نشان می‌دهد که افزایش پیشروی عاملی برای افزایش نیروی وارد بر سطح و ایجاد پدیده چتر یا لرزش است که سبب کاهش کیفیت سطح قطعه‌کار می‌گردد<sup>[19]</sup>. از این رو در این تحقیق نیز مقدار پیشروی بسیار اندک انتخاب شده است. همچنین اجرای فرآیند جلاکاری به صورت مرحله به مرحله و با اعمال تدریجی عمق بار به میزان پنج صدم میلی‌متر و در ده پاس متوالی صورت گرفت که این مقادیر نیز برای تمام نمونه‌ها ثابت فرض شده است. بعد از اجرای فرآیند، مقادیر میانگین زبری سطح نمونه‌ها در هر مرحله با استفاده از دستگاه زبری‌سنج پرتابل مدل ماهر اندازه‌گیری شده و بر طبق استانداردهای موجود از طول کات-آف معادل هفت میلی‌متر استفاده شد<sup>[20]</sup>. در هر مورد مقادیر زبری میانگین سطح، شش بار سنجیده شده و متوسط آنها در نتایج تحقیق ارائه شده است. شکل (۳)، نمایی از اجرای فرآیند جلاکاری را بر روی نمونه مس آنیل نشان می‌دهد.



سطح افزایش یافته است. بنابراین در این تحقیق مقدار بهینه برای زبری میانگین سطح در عمق نفوذ ۰/۴۵ میلیمتر و معادل ۰/۸۴۸ میکرومتر به دست آمد. در تحقیقات گذشته نشان داده شده است که اجزای فرآیند جلاکاری بر روی سطح فلزات تا عمق مشخصی سبب بهبود مقادیر زبری سطح می‌شود، که این امر به جنس فلز قطعه کار، عوامل ماشین کاری اولیه، پارامترهای ورودی و نوع ابزار فرآیند جلاکاری بستگی دارد. در حالت کلی با رسیدن عمق نفوذ ابزار به یک مقدار بحرانی در فلزات، کیفیت سطح به ناگهان به دلیل تخریب سطح قطعه کار ناشی از ترکیب فشار اعمال شده بر سطح قطعه کار و برش ایجاد شده به دلیل حرکت پیشروی ابزار جلاکاری، کاهش می‌یابد [22]. با توجه به شکل (۵)، در مس آنیل آستانه تخریب سطح قطعه در عمق نفوذ ۰/۴۵ میلیمتر بوده و بعد از آن اعمال عمق نفوذ بیشتر به ابزار جلاکاری تأثیر مثبتی را بر روی کیفیت سطح قطعه کار نخواهد داشت. همچنین در مس ریزدانه در مقایسه با مس آنیل مقادیر زبری میانگین سطح از همان ابتدا به میزان اندکی کاهش یافته و این روند تا عمق نفوذ ابزار برابر با ۰/۳ میلیمتر ادامه دارد که در این حالت میزان زبری میانگین سطح ۲/۴۹۴ میکرومتر می‌باشد. بعد از آن به دلیل تخریب سطح قطعه - کار، زبری میانگین سطح روند افزایشی یافته است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که روند کاهشی میزان زبری میانگین سطح در مس ریزدانه به نسبت مس آنیل تا عمق کمتری از نفوذ ابزار ادامه یافته و بعد از آن زبری مجدداً به میزان بیشتری افزایش یافته است. علت این امر را با توجه به شکل (۵) می‌توان به سختی بالاتر نمونه مس ریزدانه در مقایسه با مس آنیل در ابتدای فرآیند جلاکاری مرتبط دانست. بدیهی است که با افزایش سختی ماده، استحکام آن نیز افزایش و انعطاف پذیری کاهش می‌یابد، بنابراین با افزایش تدریجی عمق نفوذ ابزار در سطح قطعه، احتمال آسیب به سطح نیز به مراتب نسبت به جنس نرم تر افزایش خواهد یافت. به عبارت دیگر اجزای فرآیند پرس در کانال‌های زاویه دار مساوی از طریق ریزدانه کردن ماده و افزایش استحکام اولیه آن، حد شکل پذیری سطحی مس و توان تحمل تنش وارد شده بر سطح آن را کاهش داده و لذا دستیابی به مقادیر صافی سطح بیشتر را محدود نموده است.



(الف)

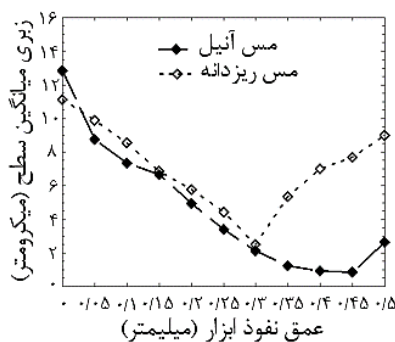


(ب)

شکل ۴) تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروساختار الف- مس آنیل و ب- مس ریزدانه در یک پاس

### ۳-۲- زبری سطح در نمونه‌های مس جلاکاری شده

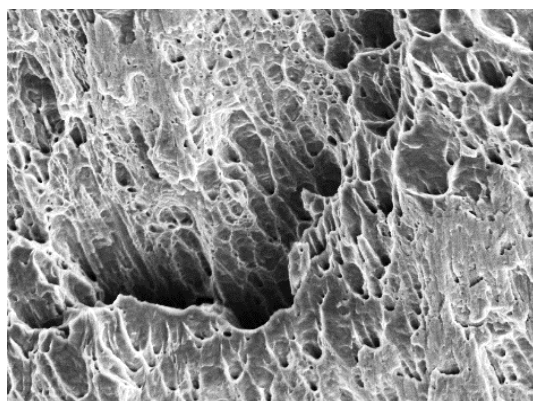
فرآیند جلاکاری از طریق انجام کار سرد و اعمال تنش لهیدگی به سطح قطعه کار سبب کاهش ارتفاع قله‌های میکروسکوپیکی روی سطح شده و ماده اضافه را به سبب حرکت پیشروی آرام ابزار برای پرکردن دره‌های میکروسکوپیکی به کار می‌برد. بنابراین فرآیند جلاکاری می‌تواند فرآیندی مؤثر در پرداخت سطح قطعات تولید شده با سایر روشها خصوصاً قطعات ماشین کاری و یا شکل‌دهی شده باشد [21]. در شکل (۵)، نحوه تغییرات زبری میانگین سطح در فرآیند جلاکاری غلتکی به ازا عمق نفوذ ابزار جلاکاری نشان داده شده است. در این شکل برای تعیین زبری میانگین سطح شش اندازه‌گیری انجام شده تا دقت اندازه‌گیری‌ها تضمین گردد. از آنجا که در این تحقیق، مقادیر عمق نفوذ در هر پاس، تعداد پاس‌ها، میزان پیشروی و سرعت برشی برای هر دو نوع مس با هم برابر و از طرفی میزان زبری میانگین سطح نمونه‌ها بعد از فرآیند تراشکاری نیز به هم نزدیک بوده است، بنابراین می‌توان مقایسه‌ای دقیق را بین مقادیر زبری میانگین سطح در فرآیند جلاکاری به انجام رسانید. با توجه به شکل (۵)، زبری سطح مس آنیل در پاس اول جلاکاری کاهش بیشتری را از خود نشان داده و این روند کاهشی تا عمق نفوذ ابزار معادل ۰/۴۵ میلیمتر ادامه دارد. پس از آن سطح قطعه کار در اثر افزایش فشار اعمالی ناشی از نفوذ ابزار و به تبع آن تنش برشی ایجاد شده در سطح به واسطه حرکت پیشروی ابزار جلاکاری دچار آسیب شده و مجدداً مقادیر زبری



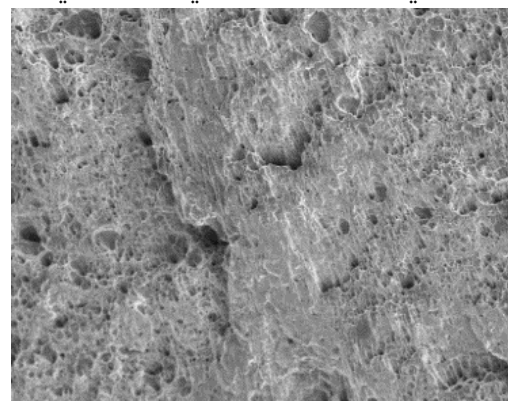
شکل ۵) تغییرات زبری میانگین سطح در برابر عمق نفوذ ابزار جلاکاری

مخروطی به داخل سطح می‌باشند که نشان‌دهنده شدت بالای تخریب سطح در نمونه مس ریزدانه در مقایسه با مس آنیل است. همین امر افزایش شدیدتر زبری سطح در نمونه ریزدانه شده را در مقایسه با نمونه آنیل بعد از بهبود کیفیت سطح در شکل (د)، به خوبی توجیه می‌نماید. به نظر می‌رسد دلیل چنین اتفاقی در سطح قطعات را می‌توان به تأثیر فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی مس ریزدانه شده در یک پاس نسبت داد. به عبارت دیگر تنش برشی اعمال شده از طرف ابزار جلاکاری بر سطح قطعه کار که ناشی از حرکت پیشروی آن است، بر روی سطح مس ریزدانه شده به دلیل استحکام اولیه بالاتر آن و به تبع آن سختی بالاتر سطح و مغز قطعه اثر مخرب‌تری را از خود برجای گذاشته است. همچنین مقایسه شکل (۶- الف و ج) نشان می‌دهد که سطح قطعه کار در نواحی نزدیک به مکانهای وقوع ریزترک در مس آنیل به مراتب هموارتر از مس ریزدانه می‌باشد. به عبارتی در مس ریزدانه ایجاد ریزترک سبب ایجاد پستی و بلندی‌های عمیقی در نواحی مجاور گردیده و حتی در شکل (۶- ج) آثاری از روی هم انباشتگی لایه‌ها نیز مشهود می‌باشد.

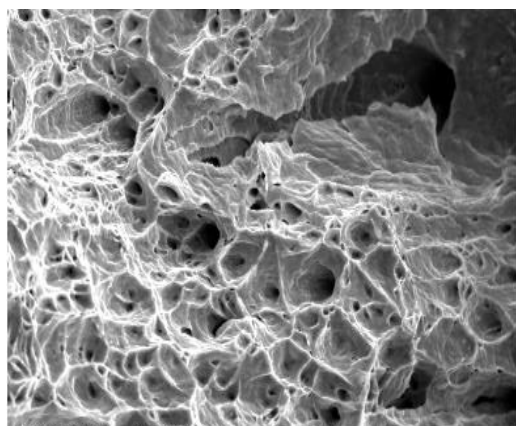
به منظور بررسی نوع آسیب سطوح جلاکاری شده که موجب افزایش میانگین زبری سطح گردیده است، دو نمونه از هر مس آنیل و ریزدانه شده به ترتیب در عمق نفوذهای ابزار معادل ۰/۵ و ۰/۳۵ میلی‌متر انتخاب شده و تحت بررسی قرار گرفت. علت انتخاب این نمونه‌ها این است که کیفیت سطح بعد از بهبود در فرآیند جلاکاری، بلافاصله در این مقادیر از عمق نفوذ ابزار دچار روند کاهشی شده است. شکل (۶) نمونه‌ای از عیوب ایجاد شده بر روی سطوح نمونه‌های مس آنیل و ریزدانه شده را نشان می‌دهد. بر طبق شکل (۶- الف) ایجاد ریزترک در سطح مس آنیل در اثر اجرایی فرآیند جلاکاری با عمق نفوذ ابزار معادل ۰/۵ میلی‌متر مشهود است. این تصاویر به وضوح نشان می‌دهد که در مس آنیل ریزترک‌های ایجاد شده در سطح، دارای عمق کمتر و طول بیشتری نسبت به نمونه‌های مس ریزدانه شده می‌باشد. همچنین در اشکال (۶- الف و ب) حفره‌های کوچک بسیاری نیز در مجاورت با میکروتُرک‌ها رویت می‌شود که زمان کافی برای رشد آنها و ایجاد ترک وجود نداشته است. در شکل‌های (۶- ج و د) میکروتُرک‌های ایجاد شده دارای طول کوتاه بوده و از عمق بیشتری برخوردارند. طوری که بسیاری از ریزترک‌ها در نمای نزدیک دارای حالت



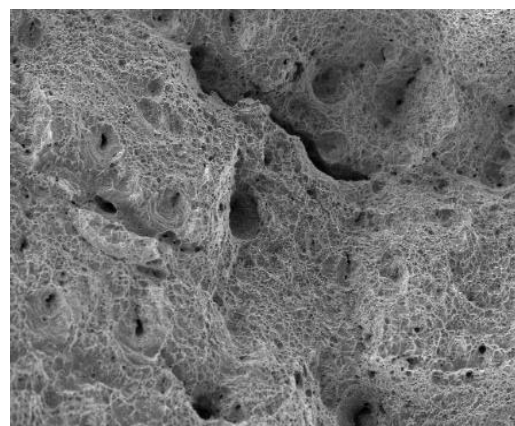
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

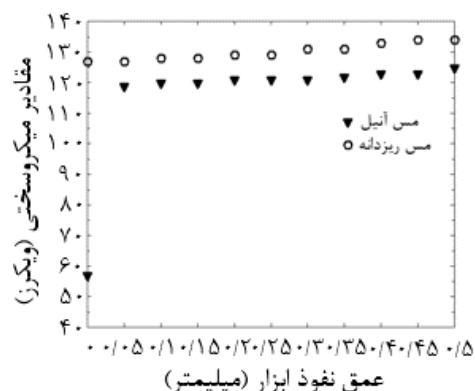
**شکل ۶** تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح جلاکاری شده نمونه‌های الف و ب) مس آنیل با عمق نفوذ ۰/۵ میلی‌متر و ج و د) مس ریزدانه با عمق نفوذ ۰/۳۵ میلی‌متر

۳-۳- ریزسختی در نمونه‌های مس جلاکاری شده

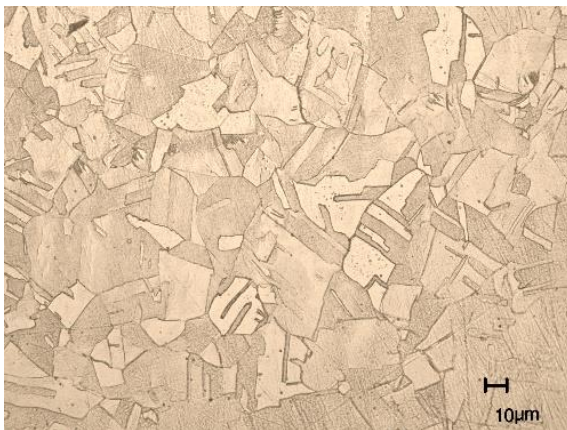
شکل (۷)، نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقادیر ریزسختی در سطح نمونه‌های مس آنیل و ریزدانه شده در یک پاس را متناسب با میزان عمق نفوذ ابزار جلاکاری در داخل سطح قطعه نشان می‌دهد. بر طبق این نمودار، سختی سطحی مس آنیل که قبل از اجرای فرآیند جلاکاری معادل پنجاه و شش ویکرز بوده، بعد از اجرای پاس اول بشدت افزایش یافته و پس از آن در بقیه پاس‌ها روند افزایشی در مقادیر میکروسختی با شیب کندی ادامه یافته است. تحقیقات انجام شده در ارتباط با فرآیند جلاکاری نشان می‌دهد که در اثر اجرای فرآیند جلاکاری غلتکی و تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در سطح قطعه کار، اندازه میانگین دانه کاهش و چگالی نابجایی‌ها در مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد که نتیجه این امر بروز پدیده کارسختی و افزایش سختی در سطح قطعات می‌باشد [23-24]. در شکل (۸- الف) میکروساختار سطح جلاکاری شده مس آنیل در پاس هشتم و با عمق نفوذ ۰/۴۵ میلی‌متر نشان داده شده که دارای اندازه میانگین دانه معادل با نه میکرون می‌باشد. همین امر روند افزایش میزان میکروسختی در نمونه آنیل بعد از اجرای پاس- های متوالی از فرآیند جلاکاری غلتکی را به وضوح اثبات می‌نماید. در نمونه‌های مس ریزدانه شده در یک پاس با سختی اولیه سطحی معادل با یکصد و بیست و هفت ویکرز، آهنگ افزایش سختی به مراتب نسبت به نمونه‌های آنیل کندتر است. علت این امر را می‌توان پیش ریزدانه شدن مس در فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار مساوی دانست، طوری که مقدار اندازه میانگین دانه‌ها در فرآیند جلاکاری غلتکی با توجه به مقدار عمق بار مورد استفاده و تنش اعمالی بر سطح قطعه تغییر چندانی ننموده است. شکل (۸- ب) نشان می‌دهد که اندازه میانگین دانه در ریزساختار مس ریزدانه شده در پاس ششم و در عمق نفوذ ابزار معادل با ۰/۳ میلی‌متر با کاهشی اندک به حدود سه و دو دهم میکرون رسیده است.

۳-۴- بررسی سختی زیرلایه

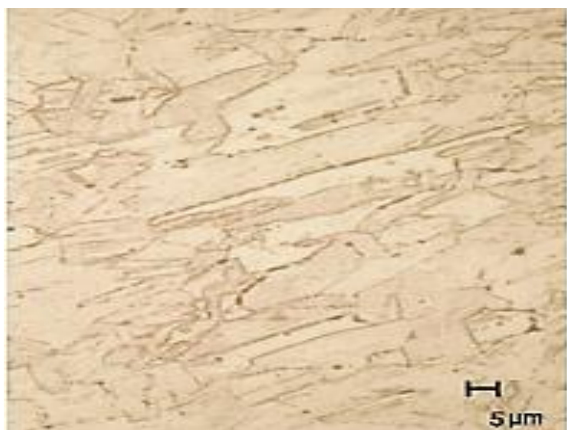
در فرآیند جلاکاری علاوه بر افزایش میزان سختی سطحی نمونه‌ها، مقادیر آن در لایه‌های زیرین سطح نیز افزایش می‌یابد. لذا برای



شکل (۷) مقادیر ریزسختی در نمونه‌های مس آنیل و ریزدانه شده بر حسب میزان عمق نفوذ ابزار جلاکاری



(الف)



(ب)

شکل (۸) الف) تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروساختار الف) مس آنیل در عمق نفوذ ابزار برابر با ۰/۴۵ میلی‌متر و ب) مس ریزدانه شده در عمق نفوذ ابزار برابر با ۰/۳ میلی‌متر

بررسی عامل سختی در لایه‌های زیرین، فقط نمونه‌های استوانه‌ای با بالاترین صافی سطح بعد از فرآیند جلاکاری غلتکی از قطعات آنیل و ریزدانه شده انتخاب و سپس مقاطعی از آنها به شکل دایره- ای در امتداد عمود بر محور طولی برش زده شد. برای اندازه‌گیری میزان سختی زیرلایه‌ای نمونه‌ها در مقاطع دایروی و در فواصل مختلف از لایه بیرونی سطح قطعه، از اعمال بار یکصد گرمی به مدت ده ثانیه برای استخراج مقادیر سختی ویکرز استفاده گردید. همچنین برای جلوگیری از اثرگذاری نقاط بر روی مقادیر اندازه‌گیری شده، فاصله نقاط بر روی مقاطع دایروی بیش از یکصد میکرون در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه بهترین میزان کیفیت سطح در مس آنیل و ریزدانه شده در یک پاس به ترتیب در عمق نفوذ ابزار معادل ۰/۳ و ۰/۴۵ میلی‌متر به دست آمده است، سختی زیرلایه این دو نمونه روی هر قطعه سه بار اندازه‌گیری شد. شکل (۹)، راستای اندازه‌گیری سختی در نمونه‌های مس آنیل و ریزدانه شده به همراه نمودار سختی زیرلایه ارائه شده است.

با توجه به شکل (۹)، مشخص است که در مس آنیل در عمق ۰/۹۶ میلی‌متری از سطح قطعه کار جلاکاری شده و در مس ریزدانه از عمق ۰/۴۸ میلی‌متری، مقادیر سختی به همان مقادیر سختی قبل



مس آنیل و ۰/۳ در مس ریزدانه به ترتیب معادل ۱۲۲ و ۱۳۱ ویکر شد.

- در مس آنیل بعد از عمق نفوذ ابزار معادل ۰/۴۵ میلیمتر، ریزترک‌هایی در سطح ایجاد گردید که دارای عمق کمتر و طول بیشتری نسبت به نمونه‌های مس ریزدانه شده می‌باشد.
- در سطح مس ریزدانه از عمق نفوذ ابزار برابر با ۰/۳ میلیمتر، ریزترک‌های با طول کوتاه و عمق بیشتر به همراه روی‌هم‌انباشتگی لایه‌ها ایجاد گردید که سبب افزایش مجدد میانگین زبری سطح شد.

• میزان سختی زیرلایه در مس آنیل و ریزدانه شده به ترتیب در عمق ۰/۹۶ و ۰/۴۸ میلیمتر از سطح قطعه کار جلاکاری شده به همان مقادیر سختی قبل از اجرای فرآیند جلاکاری بازگشته است.

**تأییدیه اخلاقی:** نتایج علمی بیان شده در این تحقیق برگرفته از فعالیت پژوهشگر مقاله بوده و تاکنون در مجله دیگری به چاپ نرسیده است، همچنین صحت نتایج بر عهده نویسنده مقاله می‌باشد.

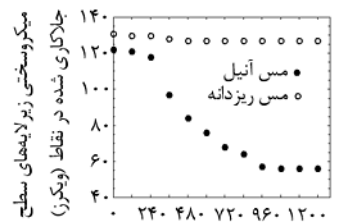
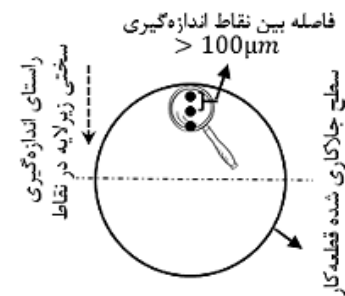
**تعارض منافع:** نویسنده مقاله اعلام می‌دارد که مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمانها ندارد.

**منابع مالی:** تأمین تمامی هزینه‌ها به صورت شخصی بوده است.

#### منابع

- 1- Luo H, Liu J, Wang L, Zhong Q. Investigation of the burnishing process with PCD tool on non-ferrous metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005;25(5):454-9.
- 2- Davim JP, editor. *Machining: fundamentals and recent advances*. Springer Science & Business Media; 2008.
- 3- Youssef HA, El-Hofy H. *Machining technology: machine tools and operations*. CRC Press; 2008.
- 4- Ebeid SJ, Ei-Taweel TA. Surface improvement through hybridization of electrochemical turning and roller burnishing based on the Taguchi technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2005;219(5):423-30.
- 5- Sundararajan PN, Nagarajan N. Study Of Internal Roller Burnishing Operation On En8 Material. *International Journal of Research and Innovation in Engineering Technology*. 2015;1(12):10-2.
- 6- Khalilpourazary S, Salehi J. How alumina nanoparticles impact surface characteristics of Al7175 in roller burnishing process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;39:1-1.
- 7- Cobanoglu T, Ozturk S. Effect of burnishing parameters on the surface quality and hardness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2015;229(2):286-94.
- 8- Balland P, Tabourot L, Degre F, Moreau V. An investigation of the mechanics of roller burnishing through finite element simulation and experiments. *International Journal of Machine tools and manufacture*. 2013;65:29-36.

از اجرای فرآیند جلاکاری بازگشته است. به عبارت دیگر عمق سخت‌کاری شده در مس آنیل بیش از مس ریزدانه بوده که این امر ناشی از کارپذیری مناسب این نوع مس می‌باشد.



**شکل ۹** تغییرات اندازه‌گیری شده سختی زیرلایه و نحوه بررسی آن در نمونه مس آنیل با عمق نفوذ ۰/۴۵ و مس ریزدانه با عمق نفوذ ۰/۳ میلیمتر

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیرات تغییر ریزساختار فلز مس آنیل و تغییر شکل یافته در فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار مساوی در یک پاس بر روی فرآیند جلاکاری غلتکی با هم مقایسه گردید. نمونه‌ها بعد از ماشین‌کاری که با طراحی آزمایشات جهت حصول به مقادیر میانگین زبری سطح نزدیک به هم انجام شد، تحت فرآیند جلاکاری غلتکی در حالت خشک و در دمای اتاق قرار گرفتند. نتایج به دست آمده را می‌توان در موارد ذیل خلاصه نمود:

- اجرای فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار بر روی مس آنیل در یک پاس سبب افزایش سختی سطح و ریزدانه شدن ریزساختار تا اندازه میانگین دانه پنج و سه دهم میکرومتر گردید.
- روند کاهش میزان زبری میانگین سطح در مس آنیل تا عمق نفوذ ابزار معادل ۰/۴۵ میلیمتر ادامه یافته و پس از آن مقادیر زبری میانگین سطح افزایش یافته است.
- مقدار بهینه زبری میانگین سطح برای مس آنیل در عمق نفوذ ۰/۴۵ میلیمتر و معادل ۰/۸۴۸ میکرومتر به دست آمد.
- در مس ریزدانه در مقایسه با مس آنیل مقادیر زبری میانگین سطح از همان ابتدا به میزان اندکی کاهش یافته و این روند تا عمق نفوذ ابزار برابر با ۰/۳ میلیمتر ادامه دارد که در این حالت میزان زبری سطح ۲/۴۹۴ میکرومتر می‌باشد.
- با افزایش تعداد پاس‌ها در فرآیند جلاکاری غلتکی میزان سختی سطح نمونه‌های مس آنیل و ریزدانه شده نیز به تدریج افزایش یافته و مقادیر آن برای عمق نفوذ ابزار معادل ۰/۴۵

- microstructure of some non-ferrous metals. *Wear*. 1996;199(1):1-8.
- 18-Stephenson DA, Agapiou JS. *Metal cutting theory and practice*. CRC press; 2018.
- 19-Nguyen TT, Le XB. Optimization of interior roller burnishing process for improving surface quality. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018;33(11):1233-41.
- 20-ISO E. 4287-Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface Texture: Profile Method-Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland. 1997.
- 21-Khalilpourazari S, Khalilpourazary S, Özyüksel Çiftçioğlu A, Weber GW. Designing energy-efficient high-precision multi-pass turning processes via robust optimization and artificial intelligence. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2021;32(6):1621-47.
- 22-Maximov JT, Anchev AP, Duncheva GV, Ganey N, Selimov KF. Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness, and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminum alloys. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017;39(8):3067-78.
- 23-Zou J, Luo H, Han Z, Lv J. Investigation of texture characteristics of deformed layers in burnished 2024 aluminum alloy subsurface by EBSD. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*. 2013;5(3):355-62.
- 24-Zhang P, Lindemann J. Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80. *Scripta materialia*. 2005;52(10):1011-5.
- 9- Nguyen TT, Le MT. Optimization of the Internal Roller Burnishing Process for Energy Reduction and Surface Properties. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*. 2021;67(4).
- 10-Casarin SJ, De Angelo Sanchez LE, Bianchi EC, Scalon VL, Fragelli RL, De Godoi EL, Cindra Fonseca MD. Effect of burnishing on Inconel 718 workpiece surface heated by infrared radiation. *Materials and Manufacturing Processes*. 2021;36(16):1853-64.
- 11-Huang B, Kaynak YU, Sun Y, Jawahir IS. Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model. *Procedia CIRP*. 2015;31:1-6.
- 12-Iwahashi Y, Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. Microstructural characteristics of ultrafine-grained aluminum produced using equal-channel angular pressing. *Metallurgical and materials transactions A*. 1998;29(9):2245-52.
- 13-Rifai M, Miyamoto H, Fujiwara H. The effect of ECAP deformation route on microstructure, mechanical and electrochemical properties of low CN Fe-20% Cr alloy. *Materials Sciences and Applications*. 2014;2014.
- 14-Khalilpourazary S, Zadshakoyan M, Hoseini SH. Ductile fracture analysis of annealed and ECAPed pure copper. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019;103:102277.
- 15-Han SZ, Goto M, Lim C, Kim CJ, Kim S. Fatigue behavior of nano-grained copper prepared by ECAP. *Journal of alloys and compounds*. 2007;434:304-6.
- 16-ASTM standard E112-96. Standard test methods for determining average grain size. 2004.
- 17-Hassan AM, Al-Bsharat AS. Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and