

مطالعه تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ ساچمه‌ای و زبری سطح اولیه بر روی ویژگی‌های مغزی زبری سطح قطعات استوانه‌ای مسی*

مقاله پژوهشی

علی جوادی^(۱) مسعود فرحناکیان^(۲) صادق الهامی جوشقان^(۳)

چکیده پارامترهای مغزی زبری سطح از جمله پارامترهای مهم در عملکرد سطوح در تماس هستند. برنیشینگ که به منظور بهبود پارامترهای سطح و کارسختی شناخته می‌شود، بر پارامترهای مغزی زبری سطح نیز تأثیر زیادی دارد. در این پژوهش، به مطالعه پارامترهای سطح و به‌ویژه پارامترهای مغزی زبری سطح از جمله ارتفاع قله و عمق دره کاهیده، قبل و پس از فرایند برنیشینگ ساچمه‌ای روی قطعات مسی پرداخته شده است. پروفیل اولیه سطح و ابزار با قابلیت تغییر قطر ساچمه ورودی‌های پژوهش حاضر هستند که در کنار نیرو و پیشروی برنیشینگ مطالعه می‌شوند. نتایج نشان داد که فرایند برنیشینگ مقادیر زبری سطح (Ra) را در حدود ۹۰ تا ۹۶ درصد کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از ساچمه با قطر ۲۰ میلی‌متر نسبت به قطر ۱۲ میلی‌متر، ۲۰ درصد کاهش بیشتر Ra را به دنبال خواهد داشت. کاهش ارتفاع قله کاهیده و کاهش عمق دره کاهیده در فرایند برنیشینگ ساچمه‌ای به ترتیب، حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد و بین ۲۰ تا ۸۰ درصد است که بیانگر اثرگذاری کمتر فرایند برنیشینگ بر عمق دره کاهیده است. بنابراین، شرایط اولیه و از جمله زبری سطح اولیه تأثیر زیادی بر عمق دره کاهیده خواهد داشت. سطوح پرداخت شده با سناده ۶۰ و تراشکاری با پیشروی ۰/۲۴ میلی‌متر بر دور که بیشترین مقادیر زبری سطح را دارا بودند، تأثیر پذیری و بهبود بیشتری از عملیات برنیشینگ پیدا کردند.

واژه‌های کلیدی برنیشینگ ساچمه‌ای، مغزی زبری سطح، زبری سطح، میکروسختی، پروفیل سطح.

مقدمه

در درگیری ۲ سطح با یکدیگر، پارامترهای سطوح در تعیین نحوه رفتار و ویژگی‌های عملکردی آن‌ها بسیار تعیین‌کننده هستند. در این بین برخی پارامترها ویژگی‌های سطح را به صورت کلی توصیف می‌کنند و برخی دیگر با اشاره به جزئیات، کمک بیشتری در تعیین نحوه رفتار سطح خواهند داشت. در این راستا ابتدا فرایند مورد استفاده که برنیشینگ ساچمه‌ای روی سطح خارجی قطعات استوانه‌ای است به اختصار معرفی می‌شود و سپس پیشینه مقالات انجام شده در زمینه این فرایند و مطالعه پارامترهای سطح بیان خواهد شد. در

قسمت بعد، پارامترهای سطح و مغزی زبری سطح شرح داده خواهند شد. پارامترهای مغزی زبری سطح که با زبری معمول سطح متفاوت است، بیانگر ویژگی‌های سطح هنگام کاربردهایی است که با سایش و روان‌کاری همراه هستند. انواع پارامترهای مغزی زبری به اختصار شامل Rk ، Rvk و Rpk هستند که در ادامه تشریح خواهند شد.

فرایند برنیشینگ ساچمه‌ای روی قطعات استوانه‌ای. برنیشینگ را یک عملیات غلتک‌کاری یا نورد سرد بدون براده‌برداری تعریف کرده‌اند که روی سطوح، کار سرد انجام می‌دهد. در عملیات برنیشینگ که پس از

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۱۲/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۵/۱۴ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

(۲) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

(۳) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

مروری بر مراجع. تامیژنای و همکاران در سال ۲۰۰۸ پژوهشی روی زبری سطح آلیاژهای تیتانیم انجام دادند. ابزار انتخابی فولاد سخت‌شده با ۸ غلتک بود. فرایند برنیشینگ تیتانیم دارای محدودیت است که علت آن احتمال گسترش نقص و میکروترک‌ها روی سطح است. بر طبق نتایج، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کمترین زبری سطح در سرعت اسپیندل ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و در نرخ پیشروی ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و با در نظر گرفتن عمق نفوذ ۰/۳۵ میلی‌متر به دست می‌آید [3].

کورزینسکی در سال ۲۰۰۹ شرایط لایه‌های سطحی و مقاومت خستگی المان‌های پوشش کروم داده شده را بررسی کرد. برنیشینگ قطعات با پوشش کروم‌دار، تنش پسماند در لایه‌های سطحی و مقاومت خستگی المان را به میزان ۴۰ درصد بهبود داده است. برنیشینگ یک پوشش سخت با مغز نرم فرایندی دشوار است و نیروی زیادی را نمی‌توان به کار برد چون با پوسته‌پوسته شدن و ترک خوردن سطح همراه خواهد بود، در نتیجه باید نیروی تماس کم باشد [4].

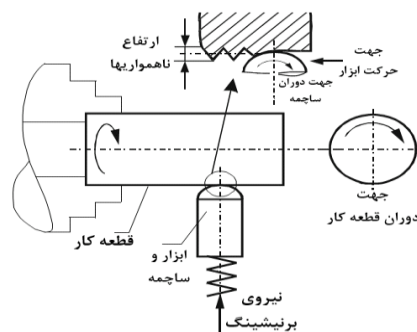
ساجباس در سال ۲۰۱۱ اثر نیرو، تعداد پاس، سرعت و پیشروی برنیشینگ را برای به دست آوردن صافی سطح بهینه در برنیشینگ ساچمه‌ای آلومینیم ۷۱۷۸ بررسی و مدل بهینه را استخراج کرد [5]. غاربی و همکاران در سال ۲۰۱۲ به ارائه ابزار صیقل‌کاری طراحی شده برای بهبود زبری سطوح بسیار بزرگ پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که صیقل‌کاری ورقه‌های آلومینیم A1۰۵۰ موجب بهبود قابلیت چکش‌خواری آن‌ها می‌شود [6].

روانکار و همکاران در سال ۲۰۱۴ تحقیقی روی برنیشینگ ساچمه‌ای آلیاژ تیتانیم انجام دادند. آن‌ها اثر سرعت، نیرو، پیشروی و تعداد پاس را روی صافی سطح و سختی با روش تاگوجی بررسی کردند. سرعت ۴۵ متر بر دقیقه، پیشروی ۰/۰۵ میلی‌متر بر دور، تعداد پاس ۳ و نیروی ۲۰۰ نیوتن بهترین صافی سطح را روی این آلیاژ ایجاد کرد [7].

ژینگ در سال ۲۰۱۴ به بررسی میکرو ساختار سطح قبل و بعد از فرایند برنیشینگ پرداخت. قطعه‌کار مورد

تراشکاری یا فرزکاری انجام می‌شود، با فشار دادن سطح، ناهمواری‌های کوچک سطحی دچار تغییر شکل پلاستیک شده و سطح کاملاً صاف و پرداخت می‌شود. ابزار مورد استفاده در این عملیات ممکن است روی قطعه کار بلغزد یا بغلتد و هرچه جنس قطعه کار نرم‌تر باشد، سطح آن بیشتر صیقلی و تنش‌های فشاری و درجه سخت‌کاری بیشتری در آن ایجاد خواهد شد که نتیجه آن افزایش مقاومت قطعه در برابر سایش است. در میان روش‌های مرسوم ماشین‌کاری، سنگ‌زنی از پرکاربردترین روش‌هاست و برای قطعاتی که به صافی سطح و دقت ابعادی بالا نیاز دارند، به کار گرفته می‌شود. در کنار قابلیت‌های بسیار، در هنگام سنگ‌زنی قطعات مسی، برنجی، آلومینیم و سوپرآلیاژها، ذرات جدا شده به دلیل وجود حرارت بالا و چسبیده بودن، باعث پرشدن حفره‌های سنگ شده و ادامه سنگ‌زنی را دچار مشکل می‌کند. بنابراین، برای پرداخت این گروه از قطعات از روش برنیشینگ استفاده می‌شود [1].

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، غلتک (ساجمه) برنیشینگ با اعمال یک نیروی پیش فرض، با دوران و حرکت روی سطح، قله‌ها و دره‌های موجود در ناهمواری سطح را تسطیح می‌کند و موجب افزایش صافی سطح و میکروسختی می‌شود. فرایند برنیشینگ به صورت ساچمه‌ای و غلتکی برای سطوح خارجی و داخلی استفاده می‌شود.



شکل ۱ نمایش شماتیک از فرایند برنیشینگ [2].

۲۹ درصد بهبود پیدا کرد [12]. همچنین وی در تحقیق مشابه دیگری که روی فولاد SKD61 انجام شد، از ترکیب تاگوچی، PCA و TOPSIS به منظور شبیه سازی استفاده کرد. ورودی ها و خروجی های شبیه سازی مشابه تحقیق قبل در نظر گرفته شدند. در این شرایط انرژی مصرفی، زبری و سختی سطح در مقیاس برینل به ترتیب ۴۹/۵ درصد، ۱۳/۸ درصد و ۵۶ درصد بهبود پیدا کردند [13].

در بررسی مقالات برنیشینگ مشخص شد که در بین پارامترهای این فرایند، قطر ساچمه برنیشینگ مورد توجه قرار نگرفته است و عموماً ابزار مورد استفاده قابلیت تعویض ساچمه را نداشته است. بنابراین بررسی این پارامتر از نوآوری های این پژوهش است. از طرف دیگر، هدف از فرایند برنیشینگ بهبود زبری سطح است که مطالعه پارامترهای زبری سطح را اجتناب ناپذیر می کند. این درحالی است که بیشتر مقالات فرایند برنیشینگ به مطالعه این پارامترها نمی پردازند. در حالی که تحقیقاتی وجود دارد که این پارامترها را در فرایندهای ماشین کاری و پرداخت کاری مطالعه می کند. در این قسمت به آنها اشاره می شود و در نهایت وجه تمایز تحقیق حاضر با مقالات اشاره شده بیان می شود.

در فرایند تراش کاری، مادورا و همکاران در سال ۲۰۲۰ به مطالعه پارامترهای سطح و سلامت سطح تراشکاری شده پرداختند. آنها پارامترهای مغزی R_k ، R_{vk} ، R_{pk} در کنار ۲ پارامتر R_q و R_v را مطالعه کردند [14]. در تحقیق جامع دیگری، کرولیژک و همکاران پارامترهای R_a ، R_z ، R_q ، R_v و R_p را در کنار پارامترهای توزیع نرمال زبری روی سطح در نظر گرفتند. آنها این پارامترها را در فرایندهای تراشکاری، فرزکاری، سنگ زنی و فرایندهای پرداخت سایشی مطالعه کردند [15].

سدلاسک پارامترهای سطحی و مغزی زبری سطح را در فرایند سنگ زنی مطالعه کرد. پارامترهای در نظر گرفته شده شامل R_a و R_q در کنار ۳ پارامتر مغزی زبری سطح R_k ، R_{vk} و R_{pk} بودند [16]. با روس تحقیق جامعی روی پارامترهای مغزی زبری سطح در فرایند

استفاده از جنس مس انتخاب شد و تغییرات میکروساختار سطح تا عمق ۱۰۰ میکرومتر بررسی شد. وی مشاهده کرد که سختی در سطح برنیشینگ شده بالا بوده و با افزایش عمق کاهش می یابد که به تغییرات اندازه دانه نسبت داده شد [8]. در تحقیق مشابهی، ژانگ نیز به مطالعه اندازه دانه هنگام برنیشینگ قطعات ساخته شده از مس با خلوص بالا پرداخت. اندازه دانه در سطح در حدود ۱۰۰ نانومتر تخمین زده شد [9].

جان و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از نرم افزار DEFORM-2D به شبیه سازی المان محدود فرایند برنیشینگ فولاد AISI D3 پرداختند. پارامترهای ورودی سرعت، نیروی برنیشینگ، پیشروی و پارامتر خروجی را میکرو سختی در نظر گرفتند. مقدار سختی سطح بعد از فرایند برنیشینگ ۸۶/۲ درصد افزایش یافت و اختلاف آن با نتایج شبیه سازی حدود ۸ درصد بود [10].

روتلا و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی شرایط خنک کاری و روان کاری در فرایند برنیشینگ روی تیتانیوم پرداختند. آنها از خنک کاری کرایوژنیک و روان کاری MQL استفاده کردند. نتایج نشان داد که به کارگیری روش خنک کاری کرایوژنیک منجر به بهبود سختی سطح حاصل از برنیشینگ می شود و از طرف دیگر فرایند از نظر سایش ابزار بازدهی بالاتری را نشان می دهد. استفاده از روش روان کاری MQL موجب بهبود پارامترهای سطح و به ویژه زبری سطح شد [11].

انگوبین و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی بهینه سازی چندهدفه فرایند برنیشی ننگ روی فولاد H13 با در نظر گرفتن هم زمان پارامترهای زبری سطح، انرژی مصرفی و سختی سطح پرداختند. پارامترهای برنیشینگ در نظر گرفته شده شامل سرعت، پیشروی و عمق فرایند برنیشینگ بود. الگوریتم ازدحام ذرات به منظور بهینه سازی در نظر گرفته شد. نتایج بهینه سازی نشان داد در شرایط بهینه می توان به کاهش ۳۹/۵ درصد در مصرف انرژی و ۷/۸ درصد در زبری سطح رسید. همچنین در شرایط بهینه سختی سطح در مقیاس برینل در حدود

اولیه بر پارامترهای سطح نهایی اثرگذار است که در تحقیقات پیشین به آن پرداخته نشده است. در تحقیقات پیشین و در بین پارامترهای برنیشینگ، قطر ساچمه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، ابزاری خاص با قابلیت تعویض ساچمه ساخته و استفاده شد.

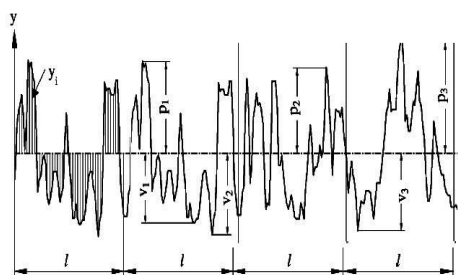
مواد و روش تحقیق

پارامترهای پروفیل سطح و مغزی زبری سطح. حداکثر ارتفاع قله و حداکثر عمق دره پروفیل در یک طول نمونه برداری، با Z_p و Z_v نشان داده می‌شود. حداکثر ارتفاع زبری (R_z) از مجموع پارامتر Z_p و Z_v در یک طول نمونه برداری حاصل می‌شود. R_z با رابطه (۱) محاسبه می‌شود که معمولاً مقدار n برابر ۵ در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲).

$$R_z = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (1)$$

میانگین حسابی قدر مطلق مقادیر عرضی پروفیل، در یک طول نمونه برداری، با پارامتر R_a نشان داده می‌شود. R_a متداول‌ترین و پرکاربردترین پارامتر جهت آنالیز ساختار سطح است و باتوجه به رابطه (۲) محاسبه می‌شود (شکل ۲).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2)$$



شکل ۲ منحنی نشان‌دهنده تعریف R_z و R_a [22]

از پرکاربردترین سطوح مهندسی، سطوح در تماس با یکدیگر هستند که موجب سایش هر یک از سطح می‌شود. جهت شبیه‌سازی اثر این سایش از پارامتری

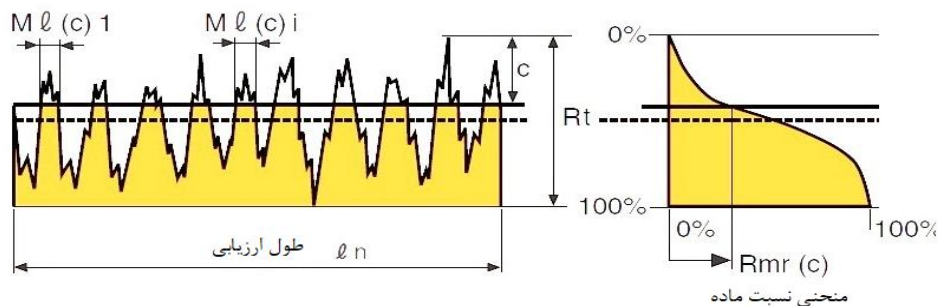
هونینگ انجام داد و هر ۳ پارامتر R_k ، R_{vk} و R_{pk} را در سطوح پرداخت شده به روش هونینگ بررسی کرد. وی همچنین پارامترهای دیگری از جمله Mr_1 ، Mr_2 و نسبت R_p/R_t را به منظور مطالعه سطح مدنظر قرار داد [17].

در بین تحقیقات داخلی نیز به برنیشینگ توجه شده است. مهدیه و همکاران با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی به مطالعه تنش پسماند و میکروسختی در سطح برنیشینگ شده پرداختند. آن‌ها مقادیر بهینه پارامترهای برنیشینگ را به منظور دستیابی به بهترین حالت استحکام و سختی سطح تعیین کردند [18]. همچنین، انظمی و همکاران برنیشینگ را روی قطعات استوانه‌ای اعمال کردند و شرایط برای حصول زبری سطح بهینه را تعیین کردند. در این راستا، سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، نیروی غلتک ۵۲ نیوتن و پیشروی ۰،۰۵ میلی‌متر بر دور برای حصول مقادیر بهینه زبری سطح حاصل شد [19]. در تحقیق جامعی، امینی و همکاران روش برنیشینگ به کمک ارتعاشات آلتراسونیک را توسعه دادند و این فرایند جدید را به صورت تجربی و تئوری بررسی کردند. در این راستا، زبری سطح، سختی سطح و تنش پسماند عمده پارامترهای خروجی در نظر گرفته شده بودند. همچنین مدل تحلیلی به منظور پیش‌بینی کرنش در عمق‌های مختلف پس از عملیات برنیشینگ ارائه شد [20, 21].

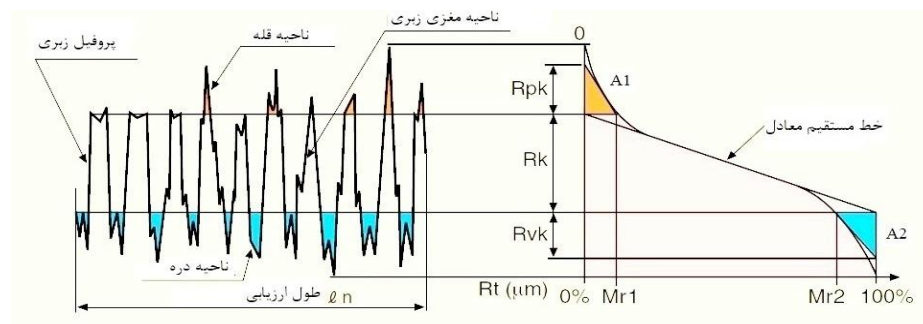
باتوجه به پژوهش‌های پیشین، می‌توان جنبه‌های نوآوری مقاله را به صورت زیر بیان کرد. در فرایند برنیشینگ به طور معمول تنها زبری سطح بررسی می‌شود و به سایر پارامترها که حائز اهمیت نیز هستند، پرداخته نمی‌شود. از این رو در این تحقیق، پارامترهای مغزی زبری سطح در فرایند برنیشینگ ساچمه‌ای در چهارچوب چیدمان تراشکاری (قطعات استوانه‌ای) بررسی شده است. از طرف دیگر، شرایط اولیه سطح قبل از برنیشینگ نیز بسیار حائز اهمیت و مؤثر است. هر سطحی که فرایند برنیشینگ بر آن اعمال می‌شود دارای پروفیل سطح اولیه متفاوت است، بنابراین پروفیل

بین ۲ خط مستقیم هم‌ارز و موازی قرار می‌گیرد (شکل ۳-ب). از ویژگی‌های این ناحیه دارا بودن کمترین گرادیان در منحنی نسبت ماده است. ۲ خط مستقیم، هم‌ارز و موازی محور x بوده و پروفیل مغزی زبری سطح را با تفکیک و بیرون‌زدگی قله‌ها و دره‌ها نسبت به مغز زبری تعیین می‌کند. فاصله قائم بین این خطوط موازی، عمق مغزی زبری سطح یعنی R_k نامیده می‌شود. هنگامی که تغییرات غیرعادی در عمق دره‌ها یا ارتفاع قله‌های پروفیل سطح رخ می‌دهد، R_k می‌تواند استفاده شود، درحالی‌که سایر پارامترهای زبری سطح (R_a و R_z) دچار عدم تکرارپذیری می‌شوند. ارتفاع متوسط قله‌های بیرون‌زده بالای پروفیل مغزی زبری سطح، ارتفاع قله کاهیده (R_{pk}) و عمق متوسط دره‌های پروفیل تصویرشده در سراسر پروفیل مغزی زبری سطح، عمق دره کاهیده (R_{vk}) نامیده می‌شوند (شکل ۳-ب).

به نام نسبت ماده استفاده می‌شود. مطابق شکل (۳-الف) سمت چپ، یک خط تخت روی مرتفع‌ترین قله به صورت موازی با طول ارزیابی در نظر گرفته می‌شود که سطح را سایش می‌دهد. خط سایش به فاصله C از این صفحه واقع شده است. با ساییده شدن سطح در اثر تماس و مرور زمان، این خط به پایین‌تر منتقل می‌شود و در نتیجه فصل مشترک خط سایش با پروفیل سطح بیشتر می‌شود (شکل ۳-الف). نسبت ماده (R_{mr}) معمولاً به صورت درصدی از طول ارزیابی بیان می‌شود و پارامتری است که نسبت‌های مختلف ماده را در عمق‌های متفاوت به یکدیگر مرتبط می‌کند [22]. به وسیله ترسیم نسبت ماده در عمق‌های مختلف، منحنی به دست می‌آید که منحنی نسبت ماده نامیده می‌شود (شکل ۳-الف سمت راست). این منحنی تفاوت پروفیل‌های مختلف سطح را نشان می‌دهد. در منحنی نسبت ماده، منطقه مرکزی ناحیه‌ای است که حاوی ۴۰ درصد نقاط مرکزی پروفیل اندازه‌گیری شده است و



الف



ب

شکل ۳ الف) منحنی نسبت ماده ب) تعریف پارامترهای R_k , R_{vk} و R_{pk} [22].



الف



ب

شکل ۴ الف) قطعه‌کار ب) ابزار مورد استفاده.

یک فنر فولادی در سوراخ انتهای بلوک فولادی قرار داده شده است و نیروی برنیشینگ را بر طبق رابطه هوک ($F=kx$) اعمال می‌کند. فنر مورد استفاده دارای ثابت فنر برابر با ۱۰۰ نیوتن بر میلی‌متر است که برای رسیدن به نیروهای مورد نیاز در جدول (۱)، به جابه‌جایی ۵ و ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متری نیاز خواهد بود. دستگاه تراش مورد استفاده، ساخت ماشین‌سازی تبریز و از نوع TN50B و دستگاه زبری‌سنج مدل Mahr-M300c ساخت کشور آلمان است. برای مشاهده سطوح از میکروسکوپ Dino-LiteAM-413ZT با بزرگ‌نمایی ۲۳۰ برابر استفاده شد.

طراحی آزمایش‌ها. مجموعه آزمایش‌ها در ۲ قسمت کلی انجام گرفته است. در قسمت اول، تأثیر متغیرهای فرایند برنیشینگ بر پارامترهای زبری سطح و مغزی زبری بررسی می‌شود. پارامترهای زبری سطح در نظر گرفته شده عبارت‌اند از:

$$Ra - Rz - Rk - Rvk - Rpk$$

متغیرها و طراحی آزمایش در نظر گرفته شده برای انجام سری اول آزمایش‌ها در جدول (۱) بیان شده‌اند.

هریک از پارامترهای Rvk , Rpk برابر با ارتفاع مثلث‌های قائم‌الزاویه معینی هستند. مثلث‌های مذکور به‌گونه‌ای رسم می‌شوند که به ترتیب ناحیه و مساحت مربوط به نواحی قله‌ای و دره‌ای را داشته باشند. مثلث قائم‌الزاویه متناظر با قله (A1)، دارای قاعده $Mr1$ بوده و مثلث متناظر با دره (A2)، دارای قاعده $Mr2$ است (شکل ۳-ب).

مقدار Rpk بالا به معنی آن است که سطح دارای قله‌های بلندی است و در نتیجه سطح تماس کمی، در تماس اولیه وجود دارد. نتیجه این حالت ایجاد تنش بالا در سطوح تماس اولیه است. Rpk می‌تواند بیانگر ارتفاعی از ماده باشد که در حین کارکرد و سایش از بین می‌رود و ممکن است به شکل براده از یکی از سطوح جدا شود و بین ۲ سطح قرار بگیرد و باعث کاهش خواص سایشی شود. Rvk بیانگر عمق دره‌ها در زیر ناحیه مغزی زبری سطح است و مستقیماً بر نگهداری روان‌کارها و به‌دام‌اندازی براده‌های نامطلوب اثرگذار است. ممکن است گفته شود با فرایندهایی مانند سنگ‌زنی و پولیش می‌توان به زبری سطح کم دست یافت، اما آنچه در عملکرد سایشی و روان‌کاری سطح حائز اهمیت بیشتری است، پارامترهای مغزی زبری سطح است که کمتر به آن توجه شده است. فرایند برنیشینگ بر این پارامترها تأثیر عمده داشته است و آن‌ها را بهبود می‌دهد. این تحقیق شامل فرایند برنیشینگ و پارامترهای مغزی زبری است، بنابراین می‌تواند در ساخت قطعات با کارایی بیشتر در صنعت کمک کند.

مواد مصرفی. قطعه‌کار از جنس مس بوده و دارای سختی متوسط ۸۸ برینل (HB) است (شکل ۴-الف). ساچمه‌های استفاده‌شده از جنس تنگستن کارباید با قطرهای ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر بوده و ابزار طراحی‌شده قابلیت استفاده از ساچمه با قطرهای متفاوت و استفاده از فنرهای متفاوت برای اعمال نیروی اولیه برنیشینگ را دارند. ابزارگیر (بلوک فولادی) از جنس CK45 است که در شکل (۴-ب) نشان داده شده است.

جدول ۱ متغیرها و طراحی آزمایش در نظر گرفته شده برای انجام سری اول آزمایش‌ها

شماره آزمایش	پیشروی [f] (mm/rev)	نیروی برنیشینگ (N) [F _B]	قطر ساچمه (mm) [D]	شماره آزمایش	پیشروی [f] (mm/rev)	نیروی برنیشینگ (N) [F _B]	قطر ساچمه (mm) [D]
۱	۰/۰۵	۱۵۰	۲۰	۱	۰/۰۵	۱۵۰	۱۲
۲	۰/۰۵	۳۰۰	۲۰	۲	۰/۰۵	۳۰۰	۱۲
۳	۰/۰۵	۴۵۰	۲۰	۳	۰/۰۵	۴۵۰	۱۲
۴	۰/۰۷	۱۵۰	۲۰	۴	۰/۰۷	۱۵۰	۱۲
۵	۰/۰۷	۳۰۰	۲۰	۵	۰/۰۷	۳۰۰	۱۲
۶	۰/۰۷	۴۵۰	۲۰	۶	۰/۰۷	۴۵۰	۱۲
۷	۰/۱	۱۵۰	۲۰	۷	۰/۱	۱۵۰	۱۲
۸	۰/۱	۳۰۰	۲۰	۸	۰/۱	۳۰۰	۱۲
۹	۰/۱	۴۵۰	۲۰	۹	۰/۱	۴۵۰	۱۲

(زبری اندازه‌گیری شده سطح، قبل از برنیشینگ برابر با $Ra=6.2\mu m$, $Rz=26\mu m$ است). فرایند برنیشینگ با ساچمه‌ای به قطر ۱۲ میلی‌متر، پیشروی ۰/۰۷ میلی‌متر بر دور و نیروی ۳۰۰ نیوتن انجام شده است. باتوجه به مقیاس ده‌برابری محور عمودی که ۲ کردار نسبت به یکدیگر دارند، بهبود در وضعیت زبری و کاهش چشمگیر مقادیر Rz که بیانگر کاهش ارتفاع قله‌های موجود روی سطح در کردار پروفیل زبری است، به‌وضوح قابل مشاهده است. همچنین، یکنواختی پروفیل سطح و کاهش انحراف از خط میانگین بیانگر کاهش قابل توجه مقادیر Ra است.

کردارهای شکل (۶) نشان می‌دهد با افزایش نیروی برنیشینگ مقدار زبری سطح کاهش می‌یابد. البته با افزایش مقدار پیشروی، زبری بالاتری حاصل می‌شود. در مقایسه ۲ کردار حاصل از برنیشینگ با ساچمه‌هایی به قطر ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر به‌وضوح می‌توان دید که کردار مربوط به قطر ۲۰ میلی‌متر مقدار زبری پایین‌تری را گزارش می‌کند، به‌ویژه در پیشروی‌های کم، این کاهش زبری مشهودتر است. تغییر قطر ساچمه از ۱۲ به ۲۰ میلی‌متر توانسته است به‌طور میانگین حدود ۲۰ درصد زبری سطح را کاهش دهد. پایین‌ترین مقدار زبری

در قسمت دوم آزمایش‌ها، تأثیر زبری اولیه سطح بر پروفیل سطح نهایی بررسی می‌شود. زبری اولیه با فرایند تراشکاری با مقادیر پیشروی ۰/۱۲، ۰/۱۶، ۰/۲ و ۰/۲۴ میلی‌متر بر دور توسط ابزار کاربیدی (سرعت اسپیندل ۵۰۰ دور بر دقیقه و عمق برشی ۰/۵ میلی‌متر) و سنباده‌زنی سطح (شماره‌های ۶۰، ۲۲۰ و ۶۰۰) ایجاد می‌شود. بنابراین، ۴ حالت زبری سطح توسط تراشکاری و ۳ حالت دیگر توسط سنباده‌زنی ایجاد می‌شود که مجموع ۷ حالت زبری اولیه را به‌عنوان ورودی ایجاد می‌کند. سایر پارامترها ثابت (نیروی ۳۰۰ نیوتن، پیشروی ۰/۰۷ میلی‌متر بر دور و قطر ساچمه ۲۰ میلی‌متر) در نظر گرفته شدند.

نتایج و بحث

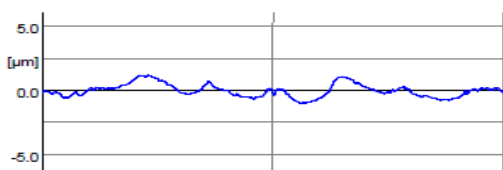
در این مرحله، ابتدا نتایج سری اول آزمایش‌ها که شامل مقادیر مربوط به پارامترهای زبری سطح است، بررسی می‌شود. در ادامه نتایج سری دوم آزمایش‌ها و تأثیر زبری سطح اولیه بر پرداخت نهایی سطح تحلیل خواهد شد.

بررسی تغییرات پارامتر Ra و Rz . در شکل (۵) کردار پروفیل زبری قبل و بعد از برنیشینگ ارائه شده است

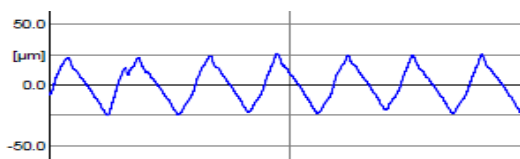
بیان شده است. مقادیر P-value نشان می‌دهد که نتایج در سطح اطمینان ۹۵ درصد قابل قبول هستند که در بیشتر آزمایش‌های تجربی نیز این سطح اطمینان در نظر گرفته می‌شود. همچنین مطابق شکل (۶-د)، کردار اثر تعاملی پارامترها و موازی بودن کلی خطوط نشان‌دهنده اثرگذاری مستقل و عدم برهمکنش هم‌زمان آن‌هاست.

مربوط به برنیشینگ با قطر ساچمه ۲۰ میلی‌متر با نیروی ۴۵۰ نیوتن و مقدار پیشروی ۰/۰۵ میلی‌متر بر دور است. بنابراین کردار نشان می‌دهد که افزایش نیروی برنیشینگ و قطر ساچمه و کاهش پیشروی منجر به کاهش مقدار زبری سطح در فرآیند برنیشینگ می‌شود.

در شکل (۶-ج) نتایج آنالیز واریانس پارامتر Ra

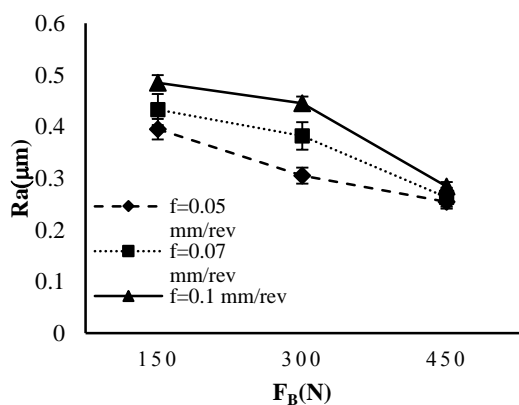


ب

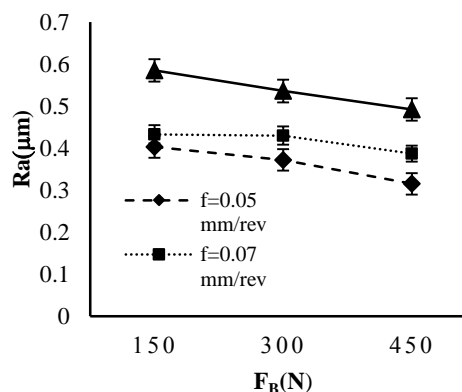


الف

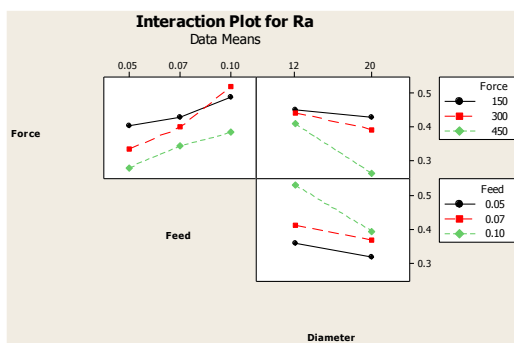
شکل ۵ کردار پروفیل زبری (الف) قبل (ب) بعد از فرآیند برنیشینگ ساچمه‌ای.



ب



الف

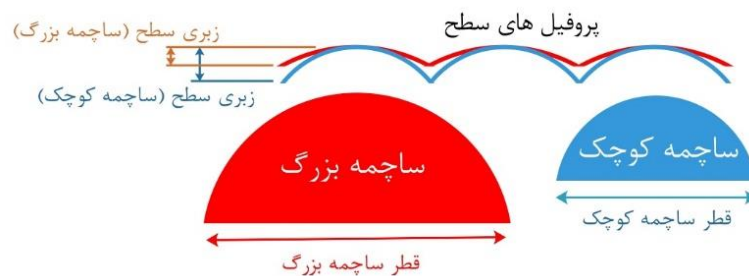
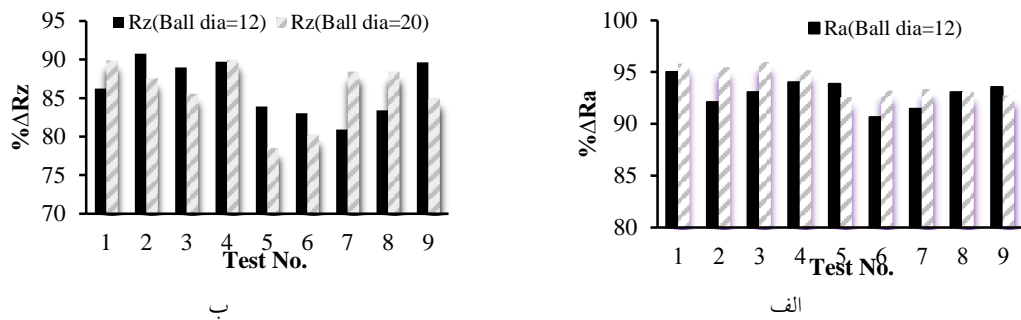


د

Source	DF	SS	MS	F	P
Force	2	0.0364	0.0182	6.33	0.013
Feed	2	0.0473	0.0236	8.22	0.006
Diameter	1	0.0242	0.0242	8.4	0.013
Error	12	0.0345	0.0028		
Total	17	0.1425			

ج

شکل ۶ مقادیر زبری سطح Ra (الف) ساچمه به قطر ۱۲ میلی‌متر (ب) ساچمه به قطر ۲۰ میلی‌متر (ج) نتایج آنالیز واریانس پارامتر Ra (د) کردار اثر تعاملی پارامترها روی Ra

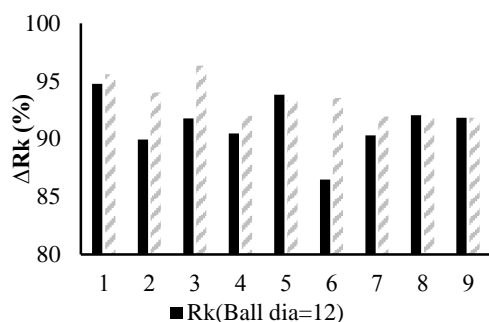


ج

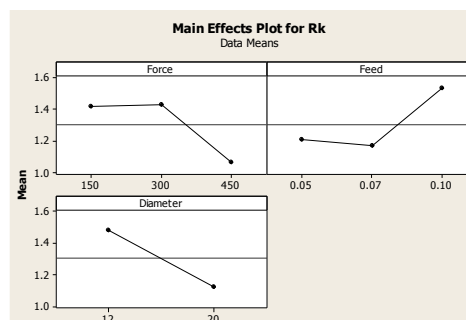
شکل ۷ کردار الف) ΔRa ب) ΔRz در فرایند برنیشینگ ساچمه‌ای ج) نمایی شماتیک از نحوه تأثیرگذاری قطر ساچمه بر زبری سطح

بررسی عمق مغزی زبری سطح Rk در برنیشینگ. در شکل (۸-الف) کردارهای اثر اصلی پارامترهای آزمایش روی عمق مغزی زبری سطح Rk نشان داده شده است. با توجه به کردار مشاهده می‌شود که هر ۳ پارامتر تأثیر قابل توجهی بر کاهش مقادیر Rk داشته‌اند. تغییر نیروی برنیشینگ از ۱۵۰ به ۳۰۰ نیوتن تأثیر زیادی بر Rk نداشته است، اما افزایش بیشتر آن از ۳۰۰ به ۴۵۰ نیوتن، تنش وارده را به بیشتر از مقادیر تنش لهیدگی افزایش داده و منجر به کاهش قابل توجه Rk شده است. در بررسی کردار شکل (۸-ب) مشاهده می‌شود که تأثیر فرایند برنیشینگ با ساچمه به قطر ۲۰ میلی‌متر روی تغییرات میانگین عمق مغزی زبری سطح به‌طور کلی بیشتر از تأثیر فرایند برنیشینگ با ساچمه به قطر ۱۲ میلی‌متر است. بنابراین با افزایش قطر ساچمه عمق مغزی زبری سطح‌ها کاهش می‌یابد.

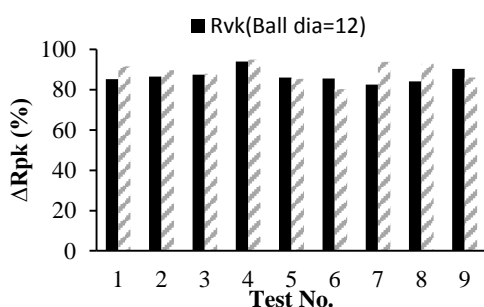
در شکل (۷-الف و ب) تغییرات Ra و Rz نسبت به زبری اولیه (ΔRa و ΔRz) در آزمایش‌های مختلف مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد که فرایند برنیشینگ با قطر ساچمه مختلف، مقادیر Ra را در حدود ۹۰ تا ۹۶ درصد کاهش می‌دهد. شکل (۷-ج) نحوه تأثیرگذاری قطر ساچمه برنیشینگ را با ۲ رنگ آبی (قطر کوچک) و قرمز (قطر بزرگ) بر سطح نشان می‌دهد. با هر بار دوران قطعه‌کار و پیشروی ابزار (ساجمه) پروفیل سطح مطابق شکل (۷-ج) تشکیل خواهد شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورت افزایش قطر ساچمه (به رنگ قرمز در شکل)، انحناهای پروفیل‌ها هم‌پوشانی بیشتری داشته و در نتیجه ارتفاع زبری سطح کاهش خواهد داشت. با توجه به ساختار پروفیل، قطر ساچمه مستقیماً بر ارتفاع قله‌های ناهمواری‌ها اثر گذاشته و آن‌ها را تسطیح می‌کند. از طرف دیگر، اثرگذاری ساچمه بر دره‌های ناهمواری‌ها نسبت به قله‌ها کمتر خواهد بود.



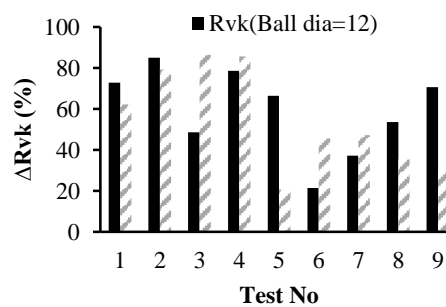
ب



الف

شکل ۸ الف) کردار اثر اصلی پارامترهای آزمایش روی Rk ب) ΔRk در فرآیند برنیشینگ ساچمه‌ای.

ب



الف

شکل ۹ کردار تغییرات الف) عمق دره (ΔRvk) و ب) قلّه (ΔRpk) کاهش در فرآیند برنیشینگ ساچمه‌ای.

کاهیده این براده را به دام انداخته و اثرات مضر آن‌ها را خنثی می‌کنند. باتوجه به شکل (۹-ب)، کاهش عمق قلّه کاهیده به طور متوسط حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد است، درحالی‌که کاهش عمق دره کاهیده به طور متوسط بین ۲۰ تا ۸۰ درصد است. این موضوع بیانگر آن است که فرآیند برنیشینگ به خوبی توانسته است قلّه‌ها را تسطیح کند. این موضوع را به خوبی می‌توان در پروفیل زبری نمونه‌ها بعد از برنیشینگ در شکل (۱۰) مشاهده کرد. کاهش ارتفاع قلّه کاهیده به معنی افزایش سطح تماس اولیه ۲ سطح است. همان‌طور که در قسمت قبل ذکر شد، ارتفاع قلّه کاهیده در تماس اولیه ۲ سطح نقش داشته و معمولاً در همان لحظات اولیه تحت تنش زیاد قرار گرفته و حذف می‌شود که خواص سایشی را کاهش خواهد داد، بنابراین کاهش ارتفاع قلّه کاهیده به معنی بهبود خواص سایشی است. در

بررسی تغییرات عمق دره (ΔRvk) و قلّه (ΔRpk) کاهیده. تغییرات عمق دره و قلّه کاهیده در شکل (۹) نشان داده شده است. کردار تغییرات میانگین عمق دره کاهیده (شکل ۹-الف) همانند کردار میانگین عمق زبری و متعاقب آن، بیانگر این مطلب است که فرآیند برنیشینگ با ساچمه به قطر ۲۰ میلی‌متر نسبت به ساچمه به قطر ۱۲ میلی‌متر، تأثیر بیشتری روی تغییرات میانگین عمق دره کاهیده می‌گذارد. مهم‌ترین کارکرد Rvk فراهم کردن مکانی برای انباشت روان‌کار است، بنابراین افزایش این پارامتر نقش مهمی در بهبود خاصیت روان‌کاری بین ۲ سطح دارد [22]. همچنین Rvk مکانی را برای انباشت براده احتمالی حاصل از سایش ۲ سطح فراهم می‌کند. این براده‌های احتمالی اثرات منفی بر سطح داشته و موجب ایجاد خطوطی روی سطح خواهند شد، بنابراین دره‌های

نمونه ۴: $Rpk=0.3$ $Rvk=0.42$ $Rk=1.62$
 نمونه ۱۴: $Rpk=0.19$ $Rvk=0.85$ $Rk=0.62$

می توان تأثیر افزایش قطر ساچمه را بر کاهش عمق زبری و ارتفاع قله ها به وضوح مشاهده کرد. در نمونه ۴ تا حدودی تأثیر ساچمه با قطر ۱۲ بر تغییرات منحنی قابل مشاهده است، در حالی که با به کارگیری ساچمه ۲۰ میلی متری منحنی تقریباً تخت حاصل شده است.

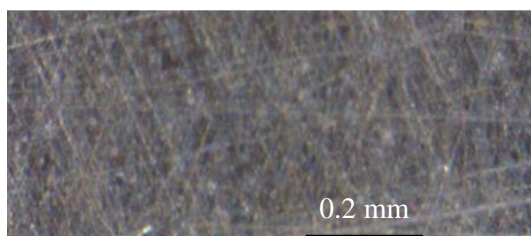
در ادامه، نتایج مربوط به مطالعه اثر زبری سطح اولیه بر سطح پرداخت شده نهایی ارائه و تحلیل شده است. زبری اولیه سطح با ۲ روش تراشکاری و سنباده زنی ایجاد شده است.

این راستا سطح تماس اولیه افزایش یافته و تنش یکنواخت تری در لحظه تماس اولیه در سطح اعمال می شود. لازم به ذکر است که در برخی کاربردها، لحظه تماس (برخورد) اولیه جزو لحظات بحرانی تماس (درگیری) ۲ جسم است [22].

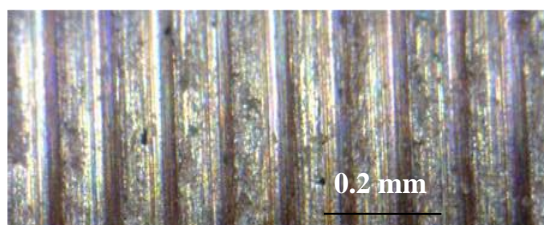
در شکل (۱۰) پروفیل زبری سطح تحت تأثیر فرایند برنیشینگ با ساچمه هایی به قطر ۱۲ و ۲۰ میلی متر و تغییرات عمق دره و قله کاهیده نمایش داده شده است. نمونه شماره ۴ با ساچمه ای به قطر ۱۲ میلی متر و نمونه شماره ۴ با ساچمه ای به قطر ۲۰ میلی متر تحت فرایند برنیشینگ ساچمه ای قرار گرفته اند. برای هر ۲ نمونه نیرو و پیشروی برنیشینگ یکسان است و پارامترهای زبری برای هر ۲ نمونه به قرار زیر است:



شکل ۱۰ پروفیل زبری سطح، حاصل از فرایند برنیشینگ ساچمه ای با ۲ قطر متفاوت ساچمه

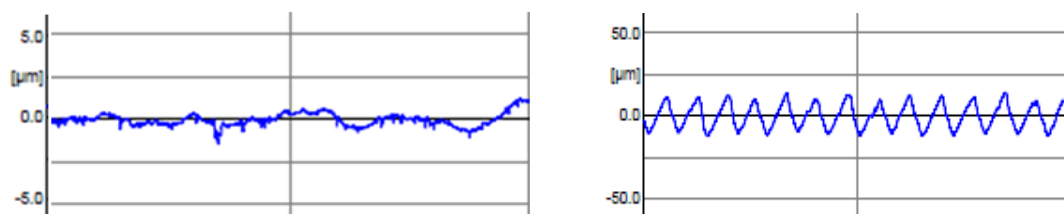


ب

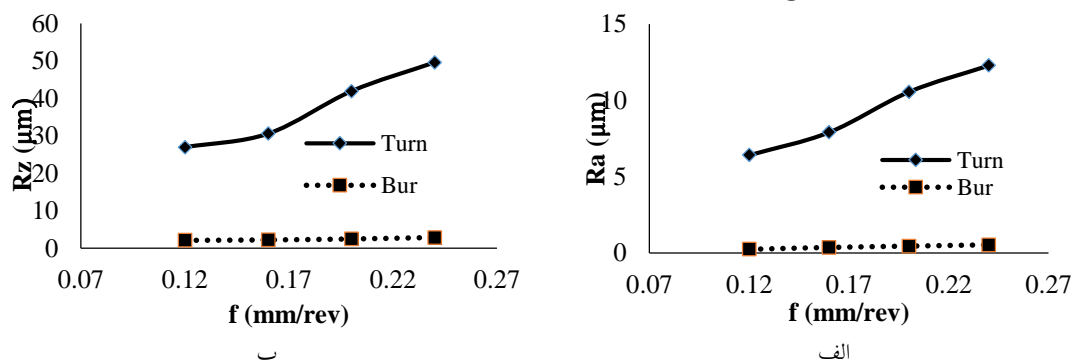


الف

شکل ۱۱ تصویر الف) نمونه تراشکاری شده با پیشروی ۰/۱۶ میلی متر بر دور ب) نمونه برنیشینگ شده بعد از عملیات تراشکاری.

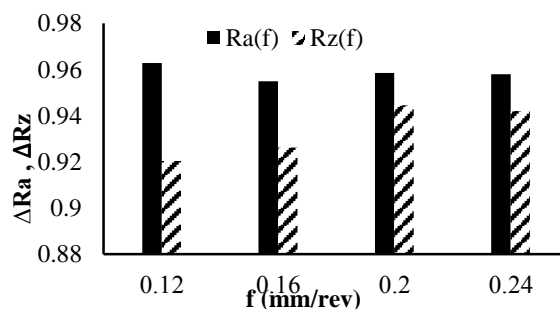


شکل ۱۲ پروفیل زبری سطح ایجاد شده با فرایند تراشکاری (سمت راست) و فرایند برنیشینگ ساچمه‌ای (سمت چپ)



ب

الف



ج

شکل ۱۳ کردارهای الف (Ra ب) Rz ج) ΔRa و ΔRz نمونه‌های تراشکاری و برنیشینگ شده

تغییر در اندازه دره‌ها پی برد. تأثیر فرایند برنیشینگ بر اندازه پارامترهای زبری در سطوحی با قله‌های مرتفع‌تر و سطوح ناصاف‌تر بیشتر از سطوحی صاف با قله‌های با ارتفاع کمتر است.

باتوجه به شکل (۱۳-الف و ب) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش پیشروی در تراشکاری (زبری اولیه)، مقادیر پارامترهای Ra و Rz افزایش می‌یابد. همچنین، تأثیر فرایند برنیشینگ روی تغییرات میانگین زبری (ΔRa) بسیار بیشتر از تأثیر آن روی تغییرات میانگین بلندترین ارتفاعات زبری (ΔRz) است (شکل ۱۳-ج). به عنوان مثال، در سرعت پیشروی ۰/۲۴ میلی‌متر بر دور، مقدار Ra از حدود ۱۲ میکرون به ۰/۵۲ میکرون

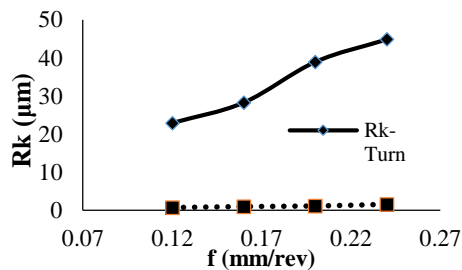
بررسی تأثیر زبری اولیه (سطوح تراشکاری شده) بر فرایند برنیشینگ. شکل (۱۱) تصویر نمونه تراشکاری شده و برنیشینگ شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اثرات مربوط به تراشکاری که روی سطح ایجاد می‌شود، پس از برنیشینگ ساچمه‌ای به‌طور کامل حذف شده است. به‌منظور مقایسه دقیق‌تر، در شکل (۱۲) پروفیل زبری سطوح تراشکاری شده با پیشروی ۰/۱۶ میلی‌متر بر دور قبل و بعد از برنیشینگ ساچمه‌ای نشان داده شده است. باتوجه به مقیاس ده‌برابری محور عمودی که ۲ کردار نسبت به یکدیگر دارند، می‌توان به تأثیر قابل توجه فرایند برنیشینگ بر تسطیح شدن سطح، کوبش قله‌ها و

زبری سطح، مقدار عمق مغزی زبری سطح (R_k) نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۴-الف) و طبق کردارهای شکل (۱۴-ب)، ارتفاع قلّه کاهیده نیز افزایش می‌یابد. برای عمق دره کاهیده مشاهده می‌شود که روند افزایشی است (شکل ۱۴-ج)، هرچند بعد از فرایند برنیشینگ تغییرات چندانی برای عمق دره کاهیده مشاهده نمی‌شود. در کردار شکل (۱۴-د) مشاهده می‌شود که فرایند برنیشینگ کمترین تأثیر را روی کاهش مقدار عمق مغزی زبری سطح (R_k) نسبت به مقادیر ارتفاع قلّه و عمق دره کاهیده گذاشته است. مطابق شکل (۱۴)، به‌عنوان مثال در پیشروی 0.24 میلی‌متر بر دور، مقدار R_k از حدود 45 میکرون به $1/5$ میکرون، مقدار R_{pk} از $8/5$ میکرون به 0.8 میکرون و مقدار R_{vk} از $7/5$ میکرون به 0.6 میکرون کاهش یافته‌اند که در R_k بیشترین مقدار کاهش نتیجه شده است. بازه تغییرات درصد بهبود پارامترهای عمق مغزی زبری سطح و ارتفاع قلّه کاهیده، پس از فرایند برنیشینگ و با شرایط زبری اولیه متفاوت، تقریباً یکسان و ثابت هستند.

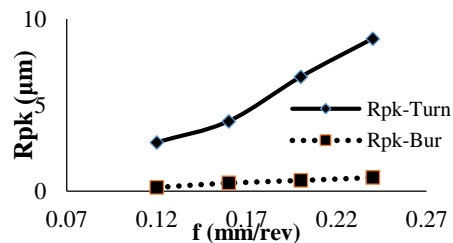
کاهش یافته است و مقدار R_z از 48 میکرون به $2/7$ میکرون رسیده است، که در R_a کاهش حدود $1/5$ میکرون و در R_z کاهش حدود 45 میکرون را نتیجه می‌دهد.

در شکل (۱۳-ج) تفاوت درصد تغییرات R_a و R_z در برنیشینگ ساچمه‌ای روی سطوح اولیه تراشکاری شده با سرعت‌های پیشروی متفاوت (زبری اولیه متفاوت) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش زبری اولیه، مقدار بهبود R_z (ΔR_z) بیشتر می‌شود، به‌گونه‌ای که در تراشکاری با پیشروی 0.8 میلی‌متر بر دور، بهبود R_z پس از برنیشینگ حدود 92 درصد است و با افزایش پیشروی تراشکاری اولیه به 0.24 میلی‌متر بر دور بهبود R_z پس از برنیشینگ به 94 درصد می‌رسد، درحالی‌که تغییرات R_a قابل ملاحظه نیست.

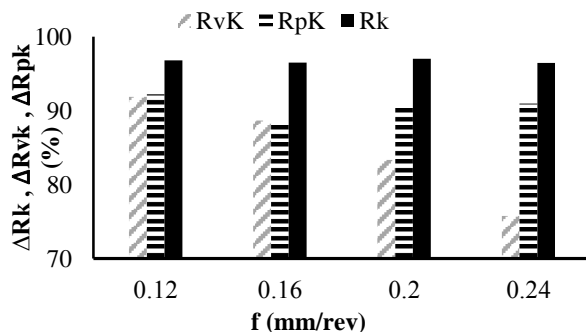
در شکل (۱۴) به بررسی تغییرات پارامترهای عمق مغزی زبری سطح (R_k)، ارتفاع قلّه (R_{pk}) و عمق دره کاهیده (R_{vk}) پرداخته شده است. با افزایش پیشروی تراشکاری (زبری اولیه) و به‌دنبال آن افزایش



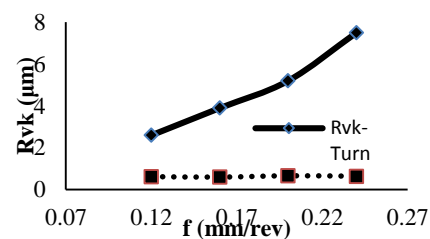
ب



الف



د



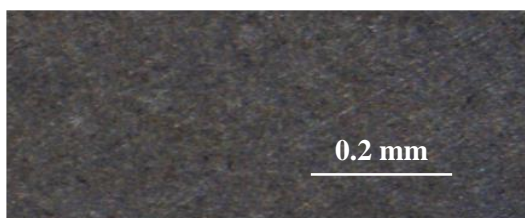
ج

شکل ۱۴ کردار الف (ب) R_k (ج) R_{pk} (د) R_{vk} و ΔR_k ، ΔR_{pk} ، ΔR_{vk} نمونه‌های تراشکاری شده و برنیشینگ شده.

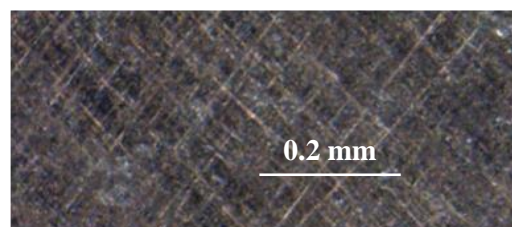
دچار تغییر شکل زیادی می‌شود، بنابراین تأثیرپذیری کمتری از زبری سطح اولیه در مقایسه با Rvk پیدا می‌کند.

بررسی تأثیر زبری اولیه (سطوح سنباده کاری) بر فرآیند برنیشینگ. شکل (۱۵) تصویر نمونه سنباده کاری شده و برنیشینگ شده را نشان می‌دهد. فرآیند برنیشینگ ساچمه‌ای میزان خطوط موجود روی سطح را کاهش داده و پرداخت بهتری را نتیجه داده است. همچنین در شکل (۱۶)، پروفیل زبری سطح سنباده کاری شده با سنباده‌های شماره ۶۰ قبل و بعد از فرآیند برنیشینگ نشان داده شده است. تفاوت کردارهای پروفیل سطح بعد از فرآیند برنیشینگ ساچمه‌ای این موضوع را به اثبات می‌رساند که تفاوت در پروفیل سطح اولیه موجب ایجاد تغییرات در نتایج پرداخت نهایی سطح، پس از فرآیند برنیشینگ خواهد شد. باتوجه به تفاوت مقیاس محور عمودی در کردارهای ارائه شده، به وضوح می‌توان تأثیر فرآیند برنیشینگ بر تسطیح پروفیل زبری، کوبش قله‌ها و همچنین تغییر در اندازه دره‌ها را مشاهده کرد.

با در نظر گرفتن ۲ پارامتر Rvk و Rpk که به ترتیب مربوط به دره و قله ناهمواری‌ها هستند، می‌توان پی برد که در هنگام اعمال فرآیند برنیشینگ، ساچمه قله را دچار تغییر شکل زیادی می‌کند و این درحالی است که ساچمه دسترسی کمتری به دره‌ها داشته و بنابراین تأثیر کمتری روی آن‌ها خواهد داشت. هرچه سطح زیرتر باشد، (باتوجه به نیروی ثابت برنیشینگ) ساچمه در فاصله بیشتری از عمق دره قرار گرفته و آن را کمتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این راستا، دره‌های پروفیل سطح شکل اولیه خود را تا حدی حفظ می‌کنند که این تابع زبری اولیه سطح است. بنابراین، زبری اولیه سطح تأثیر زیادی بر پارامترهایی مغزی زبری به ویژه عمق دره کاهیده دارد که باید مدنظر قرار گیرد. همان‌طور که در متن هم اشاره شده است، Rvk تأثیر زیادی بر خاصیت روان کاری سطح دارد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت زبری اولیه سطح بر خاصیت روان کاری سطح برنیشینگ شده تأثیر زیادی دارد. در رابطه با Rpk، باتوجه به اینکه در معرض تماس با ساچمه قرار دارد و در حین فرآیند برنیشینگ

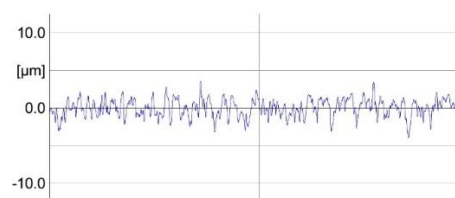
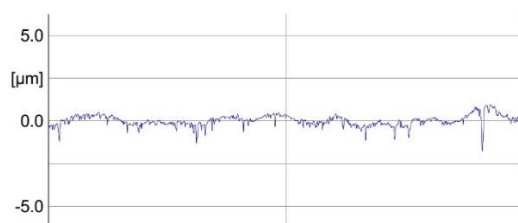


ب



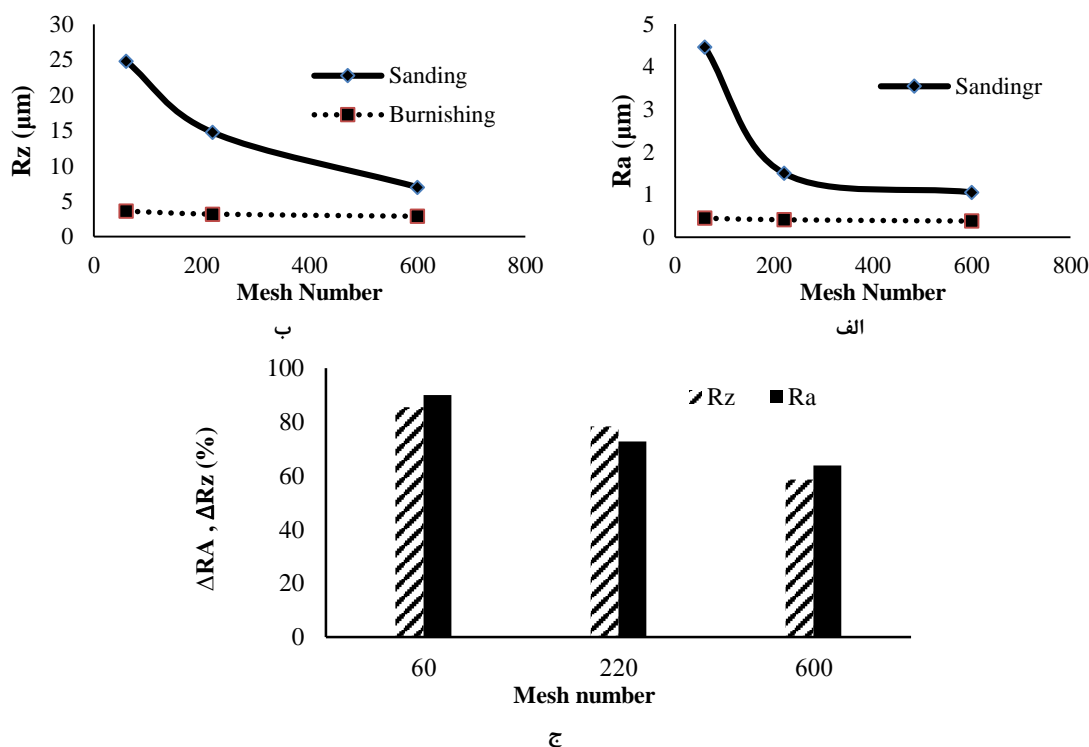
الف

شکل ۱۵ تصویر الف) نمونه سنباده کاری شده (ب) نمونه برنیشینگ شده بعد از عملیات سنباده کاری.



شکل ۱۶ پروفیل زبری سطح نمونه‌های سنباده کاری شده به وسیله سنباده شماره ۶۰ (شکل سمت راست)

و سپس برنیشینگ شده (شکل سمت چپ)



شکل ۱۷ زبری سطح نمونه‌های سنباده‌کاری شده و برنیشینگ شده (الف) Ra (ب) Rz (ج) ΔRz و ΔRa

دیگر، تأثیر فرایند برنیشینگ روی تغییرات میانگین زبری (ΔRa) بیشتر از تغییرات میانگین بلندترین ارتفاعات زبری (ΔRz) است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق نتایج زیر حاصل شد:

- افزایش نیروی برنیشینگ و قطر ساچمه و کاهش پیشروی منجر به کاهش مقدار زبری سطح می‌شود.
- افزایش قطر ساچمه در بهبود زبری سطح تأثیرگذار است. تغییر قطر ساچمه از ۱۲ به ۲۰ میلی‌متر توانسته است به‌طور میانگین حدود ۲۰ درصد زبری سطح را کاهش دهد.
- فرایند برنیشینگ عمق مغزی زبری سطح را به‌طور متوسط تا حدود ۹۰ درصد کاهش می‌دهد. تأثیر فرایند برنیشینگ با ساچمه به قطر ۲۰ میلی‌متر روی تغییرات میانگین عمق مغزی زبری سطح به‌طور کلی بیشتر از تأثیر فرایند برنیشینگ با ساچمه به قطر ۱۲ میلی‌متر است.

مقادیر عددی زبری سطح Ra و Rz و تغییرات آنها پس از سنباده‌زنی و برنیشینگ ساچمه‌ای در شکل (۱۷) نشان داده شده است. با افزایش مش سنباده در ابتدا، زبری سطح به‌شدت کاهش می‌یابد و سپس روندی تقریباً ثابت را در پیش می‌گیرد. دربارهٔ کردار مربوط به Rz می‌توان چنین نتیجه گرفت که مقادیر مربوط به بلندترین ارتفاعات زبری به‌دست‌آمده از سطح سنباده‌کاری بسیار بالاتر از مقادیر مربوط به Ra است. البته همانند کردار Ra، هم‌زمان با افزایش مش سنباده‌زنی، مقدار Rz کاهش می‌یابد.

در شکل (۱۷-ج) کردار تأثیر فرایند برنیشینگ بر تغییرات پارامترهای Rz و Ra، در شرایطی که سطوح اولیه به‌وسیلهٔ سنباده‌های نرم، متوسط و زبر آماده شده‌اند، نمایش داده می‌شود. نتایج نشان‌دهنده این موضوع هستند که سطح پرداخت‌شده با سنباده ۶۰ که بیشترین زبری را دارد، نسبت به بقیه سطوح تأثیرپذیری بیشتری از عملیات برنیشینگ پیدا می‌کند. به عبارت

بیشتری هستند، تأثیر بیشتری می‌گذارد. تأثیر فرایند برنیشینگ بر اندازه پارامترهای زبری در سطوحی با قله‌های مرتفع‌تر و سطوح ناصاف‌تر بیشتر از سطوحی با قله‌های با ارتفاع کمتر و سطوح صاف‌تر است.

- فرایند برنیشینگ علاوه بر اینکه زبری سطح (Ra) را کاهش می‌دهد، بر پارامترهای مغزی زبری سطح نیز تأثیر می‌گذارد و با کاهش قله کاهیده خواص سایشی را بهبود می‌بخشد.

بنابراین با افزایش قطر ساچمه، عمق زبری‌ها به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد. کاهش عمق قله کاهیده به‌طور متوسط حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد است، درحالی‌که کاهش عمق دره کاهیده به‌طور متوسط بین ۲۰ تا ۸۰ درصد است که نشانگر آن است که فرایند برنیشینگ به‌خوبی توانسته است قله‌ها را بکوبد.

- فرایند برنیشینگ روی سطوحی که با سرعت پیشروی بالاتری روتراشی شده‌اند و دارای زبری

مراجع

1. N. El-Tayeb, K. Low, P. Brevern, "Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, pp: 272-278, (2007)
2. J. Maximov, G. Duncheva, A. Anchev, M. Ichkova, "Slide burnishing—review and prospects", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104, pp: 785-801, (2019)
3. S. Thamizhmani, B.B. Omar, S. Saparudin, S. Hasan, "Surface roughness investigation and hardness by burnishing on titanium alloy", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 28, pp: 139-142, (2008)
4. M. Korzynski, "A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp: 625-633, (2009)
5. A. Sagbas, "Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function", *Advances in Engineering Software*, Vol. 42, pp: 992-998, (2011)
6. F. Gharbi, S. Sghaier, H. Hamdi, T. Benameur, "Ductility improvement of aluminum 1050A rolled sheet by a newly designed ball burnishing tool device", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 60, pp: 87-99, (2012)
7. G.D. Revankar, R. Shetty, S.S. Rao, V.N. Gaitonde, "Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy", *Measurement*, Vol. 58, pp: 256-268, (2014)
8. Z. Jing, X. Wei, L. Ning, F.-l. Li, "A gradient nano/micro-structured surface layer on copper induced by severe plasticity roller burnishing", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, pp: 441-448, (2014)
9. X. Zhang, H. Luo, Z. Han, J. Lv, "Evolution of microstructures and texture in the surface layer of

- copper during burnishing process", *Materials Science and Technology*, Vol. 30, pp: 1742-1750, (2014)
10. M.S. John, A.W. Wilson, A.P. Bhardwaj, A. Abraham, B. Vinayagam, "An investigation of ball burnishing process on CNC lathe using finite element analysis", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 62, pp: 88-101, (2016)
 11. G. Rotella, S. Rinaldi, L. Filice, "Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 106, pp: 431-440, (2020)
 12. T.-T. Nguyen, L.-H. Cao, T.-A. Nguyen, X.-P. Dang, "Multi-response optimization of the roller burnishing process in terms of energy consumption and product quality", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 245, pp. 119328, (2020)
 13. T.-T. Nguyen, L.-H. Cao, X.-P. Dang, T.-A. Nguyen, Q.-H. Trinh, "Multi-objective optimization of the flat burnishing process for energy efficiency and surface characteristics", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 34, pp: 1888-1901, (2019)
 14. R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, S. Wojciechowski, B. Powalka, S. Klos, N. Szczotkarz, M. Matuszak, N. Khanna, "Evaluation of turning with different cooling-lubricating techniques in terms of surface integrity and tribologic properties", *Tribology International*, Vol., pp: 106334, (2020)
 15. G. Krolczyk, J. Krolczyk, R. Maruda, S. Legutko, M. Tomaszewski, "Metrological changes in surface morphology of high-strength steels in manufacturing processes", *Measurement*, Vol. 88, pp: 176-185, (2016)
 16. M. Sedlaček, B. Podgornik, J. Vižintin, "Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces", *Tribology international*, Vol. 48, pp: 102-112, (2012)
 17. G.H.C. Barros, C.R. Schramm, S.D. Franco, L.J. Arantes, R.V. Arencibia, "Effect of grain size and number of strokes on Rk parameters and emptiness coefficient in honing process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 103, pp: 3717-3734, (2019)
 ۱۸. م.س. مهدیه، ا. رفعتی، س. کارگر، م. دانش، "بررسی پارامترهای مؤثر روی استحکام و میکرو سختی سطوح حاصل از عملیات رولبرنیشینگ با استفاده از روش تاگوچی"، دوازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، بیرجند، ایران، (۱۳۹۰).
 ۱۹. س. ساکی انتظامی، م. فرحناکیان، غ. نجارزاده، ساخت یک ابزار برنیشینگ و بررسی تجربی پارامترهای مؤثر بر فرایند برنیشینگ سطوح خارجی، کنفرانس ملی مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه شیراز، (۱۳۹۲).
 20. S. Amini, A. Bagheri, R. Teimouri, "Ultrasonic-assisted ball burnishing of aluminum 6061 and AISI 1045 steel", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, pp: 1250-1259, (2018)

21. R. Teimouri, S. Amini, "Analytical modeling of ultrasonic surface burnishing process: evaluation of through depth localized strain", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 151, pp: 118-132, (2019)
22. E. Gadelmawla, M. Koura, T. Maksoud, I. Elewa, H. Soliman, "Roughness parameters", *Journal of materials processing Technology*, Vol. 123, pp: 133-145, (2002)

Exploring the Effects of Ball Burnishing Process and Initial Surface Roughness on the Core Roughness Characteristics of Copper Cylindrical Parts

A.Javadi¹, M. Farahnakian², S.Elhami³

1. Introduction

Burnishing is a rolling process without chip removal which applies strain hardening on the surface. In burnishing, through a compression force, surface deviations, including valleys and peaks, are flattened and a finished surface is achieved. Burnishing is known as a process that affects the surface specifications and strain hardening and has a great effect on the core roughness parameters.

Ra is the most common parameter in analyzing the surface profile and states the arithmetic mean of surface deviations. When a great variation in valleys depth or peaks height is created another parameter is used which is called Rk. According to Figure 1, the central area of the surface profile is symbolled by Rk. Simultaneously, the mean height of peaks that are higher than Rk area is stated by Rpk. Moreover, the mean depth of valleys which are deeper than the central area is presented by Rvk.

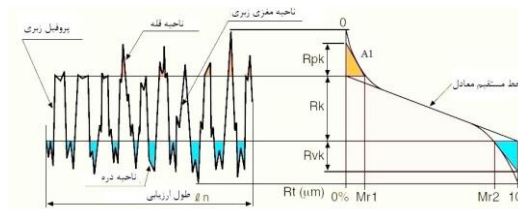


Figure 1. Definitions of Rk, Rvk, and Rpk

The high value of Rpk means that the surface profile has high peaks which provide a small initial contact area. Hence, great stresses are expected on the mentioned peaks. Rvk refers to the depth of valleys below the central area which directly affects the lubrication condition and storing of undesirable chips. It is possible to say that low surface roughness can be achieved through grinding and polishing but the main effective parameter on the wear and lubrication

performance is core roughness parameters which require more researches and attention. The main effect of the burnishing process is on the improvement of core roughness parameters.

In the current research, core roughness parameters are studied during ball burnishing and in the configuration of turning (cylindrical parts). Another effective parameter is initial surface roughness which has a direct effect on the final surface specifications. A few researchers have paid attention to this important parameter. In previous researches, ball diameter was considered as a constant parameter due to configuration complexities. In this research, a special configuration was designed to implement different ball diameters.

2. Materials

A Copper workpiece was selected with a hardness of 88 HB (Figure 2-a). Tungsten Carbide balls were chosen with diameters of 12 and 20 mm. Configuration includes a spring that applied different burnishing forces according to Hook's law ($F=KX$) (Figure 2-b). A turning machine with a code of TN50B was used to apply the burnishing process.

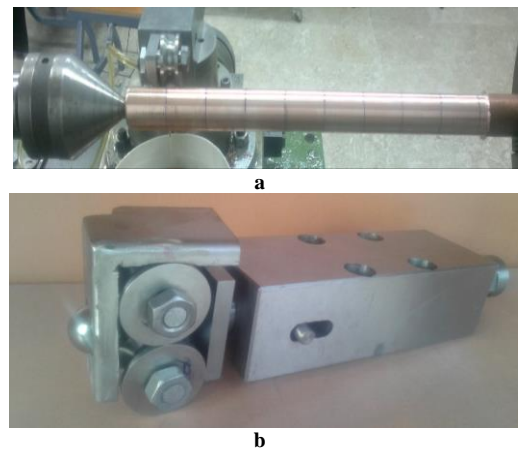


Figure 2. a. Workpiece, b. Burnishing tool

3. Experimental design

Experiments were classified into two categories. In the first category, the effect of burnishing parameters was studied on the roughness and core roughness parameters. All surface parameters are as follows:

Ra, Rz, Rk, Rvk, Rpk

¹.MSc., Mechanical Engineering Department, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³.Corresponding Author, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: Sadeghelhami@um.ac.ir

Table 1 shows the experiments variables and design of experiments of case one.

Table 1. The experiment parameters and levels

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
Feed (mm/rev)	0.05	0.07	0.1
Burnishing force (N)	150	300	450
Ball Diameter (mm)	12	20	-

4. Results and Discussion

Figure 3 presents the roughness profile before and after the burnishing process (roughness parameters of the surface before burnishing are $R_z=26 \mu\text{m}$ and $R_a=6.2 \mu\text{m}$). The burnishing process was performed by a ball with a diameter of 12 mm, feed of 0.07 mm/rev, and force of 300 N. According to the scale of the vertical axis, it is clear that R_z found a great improvement after the burnishing process which show the flattening and reduction of peak height. Moreover, a uniform trend of the profile and small deviation from the mean line results in significantly smaller values of R_a .

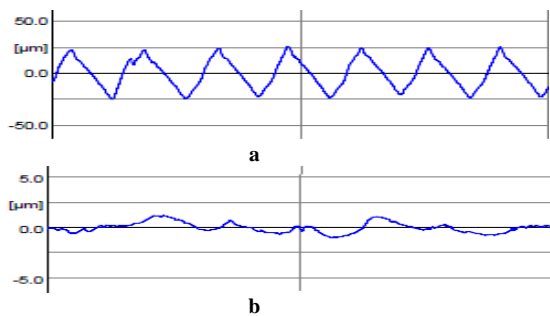


Figure 3. Diagram of roughness profile: a. Before, and b. After burnishing process

Results showed that burnishing force has a reverse relation to the surface roughness. On the other hand, the feed has a direct relation to the surface roughness. Variation of ball diameter from 12 mm to 20 mm achieved a 20% reduction of surface roughness. The smallest roughness was achieved with a ball diameter of 20 mm, a force of 450 N, and a feed of 0.05 mm/rev. Increase in force and ball diameter and reduction of feed can lead to improvement of roughness (R_a) up to 96%.

Results of Rk

As can be seen in Figure 4, reduced peak height (Rpk) and reduced valleys depth (Rvk) are about 80% to 90% and 20% to 80%, respectively, which shows the lower effectiveness of the burnishing process on the Rvk. Results of Rvk show that a ball with a diameter of 20 mm has a greater effect on the Rvk, compared to a ball diameter of 12 mm. Hence, ball diameter has a reverse direction to the Rvk.

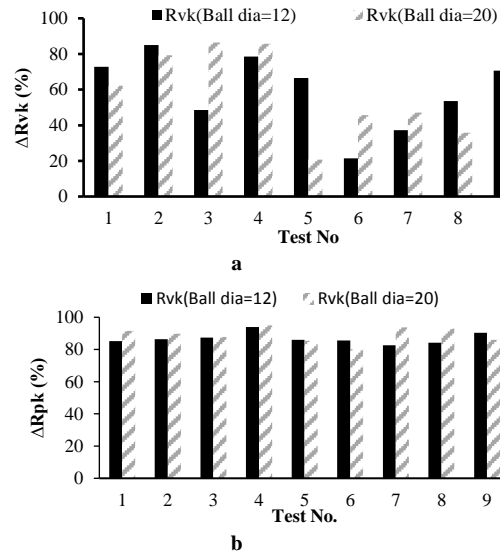


Figure 4. Variation diagram of: a. ΔRvk , b. ΔRpk during ball burnishing

5. Conclusion

Results can be classified into the following categories:

1. Higher burnishing force and ball diameter besides a smaller feed led to reduction of surface roughness.
2. On average, the burnishing process decreased core roughness of the surface up to 90%. Ball diameter of 20 mm achieved more improvement of surface roughness in comparison to ball diameter of 12 mm.
3. Burnishing process reduced Rpk and Rvk about 80 to 90% and 20 to 80%, which shows the great effect of the process on reduced peak height.
4. Burnishing process, through reduction of Rpk, improved wear characteristics of the surface.