



## بررسی تجربی میکروسختی سطح در فرآیند فرزکاری سرعت بالای آلیاژ Ti-6Al-4V

حامد حسن پور<sup>۱</sup>، محمدحسین سعادت بخش<sup>۲</sup>، محمدحسین صادقی<sup>۳</sup>، محمدمهملی هادوی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>. تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک (دانشجوی دکتری)

<sup>۲</sup>. تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک (دانشجوی کارشناسی ارشد)

<sup>۳</sup>. تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک (استاد)

<sup>۴</sup>. تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر (دانشیار)

### چکیده

امروزه آلیاژهای تیتانیوم به دلیل داشتن خواصی از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی عالی و خواص خستگی خوب، کاربرد بسیاری در صنایع مختلف دارند. اما هدایت حرارتی پایین آنها، قابلیت ماشین کاری این آلیاژها را تحت تاثیر قرار داده است، به طوری که به عنوان مواد سخت ماشین کاری شونده شناخته می شوند. در این پژوهش میکروسختی سطح نهایی قطعاتی از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V در فرآیند فرزکاری سرعت بالا و در حضور روان کاری کمینه بررسی شدند. به این منظور، طراحی آزمایشی شامل فاکتورهای سرعت برشی و نرخ پیشروی به روش فاکتوریل کامل صورت گرفت. پس از انجام آزمایشها، سختی لایه سطحی نمونه های فرزکاری شده اندازه گیری گردید. نتایج نشان داد که فارغ از شرایط برش، سختی بعد از فرآیند، از سختی اولیه آلیاژ بیشتر است. با افزایش سرعت برشی تا ۳۷۵ m/min سختی بالارفته و پس از آن به شدت افت می کند. بیشترین مقدار سختی نیز در شرایط برشی ( $V_c = 375 \text{ m/min}$  و  $f_z = 0.08 \text{ mm/tooth}$ ) گزارش شد که افزایش ۵۷٪ را نشان می داد.

**واژه های کلیدی:** فرزکاری سرعت بالا؛ آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V؛ میکروسختی؛ حداقل سیال برشی؛ سلامت سطح.

## مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم در صنایع مختلف، بالاخص صنایع هوافضا، نیروگاهی و تجهیزات پزشکی کاربرد زیادی دارند. این گستردگی کاربرد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی چون مقاومت به خوردگی و خستگی عالی و نیز نسبت استحکام به وزن بالای آنهاست. توانایی نگه داشتن این خواص استثنایی در درجه حرارت‌های بالا قابلیت ماشین‌کاری این آلیاژها را تحت تاثیر قرار داده است، به طوری که به عنوان مواد سخت ماشین‌کاری شونده<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند. علت اصلی این مشکل، قابلیت هدایت حرارتی ضعیف آنهاست. قابلیت هدایت حرارتی آلیاژهای پایه تیتانیوم چند برابر کمتر از آلیاژهای فولادی است که این امر حرارت بسیار زیادی را در موضع ماشین‌کاری ایجاد می‌کند. از این رو در ماشین‌کاری این آلیاژها، معمولاً نواحی برش با افزایش درجه حرارت قابل ملاحظه‌ای مواجه هستند [۱].

برای دستیابی به قابلیت تولید ماکزیمم و کاهش زمان ماشین‌کاری، غالباً در پروسه‌های فرزکاری فرآیندی به نام فرزکاری سرعت بالا مطرح است. همانگونه از نام آن پیداست، در این فرآیند، ماشین‌کاری با سرعت دورانی بالای اسپیندل انجام می‌شود. البته این تعریف دقیق نیست و اینکه چه بازه‌ای از سرعت برشی مربوط به محدوده‌ی ماشین‌کاری سرعت بالاست، وابسته به نوع ماده و نیز نوع فرآیند ماشین‌کاری می‌باشد. مثلاً این محدوده برای مواد نرم مانند آلومینیوم بسیار بالا بوده و برای مواد سخت ماشین‌کاری شونده مانند آلیاژهای تیتانیوم پائین است [۲]. در این فرآیند کیفیت سطح پس از ماشین‌کاری، به علت حداقل بودن حرارت ورودی به قطعه کار افزایش پیدا می‌کند.

درصد زیادی از قطعات مهندسی بر اثر پدیده‌های سطحی نظیر سایش، خوردگی، خزش و خستگی در ضمن کار منهدم می‌شوند. به همین دلیل در بسیاری از موارد کیفیت سطح قطعه کار عامل رد و یا قبول محصول تولیدی است. از همین رو مساله کیفیت سطح قطعه در ماشین‌کاری همواره از موضوعات اصلی و با اهمیت برای محققان و نیز مهندسان تولید بوده است. سطح ماشین‌کاری به صورت مرز بین قطعه‌ی ماشین‌کاری شده و شرایط محیطی فرآیند ماشین‌کاری تعریف می‌شود. ماهیت لایه سطحی، تاثیر بسیار زیادی بر خواص مکانیکی و عملکردی قطعه کار دارد که تعامل این دو، تحت عنوان سلامت سطح بررسی می‌شود [۳]. قیمت بالا و حساسیت شرایط کارکردی قطعات تیتانیومی، باعث افزایش اهمیت مطالعه تغییرات سطحی بوجود آمده در اثر ماشین‌کاری این مواد شده است. سلامت سطح به مطالعه این تغییرات در قالب پارامترهای مختلف می‌پردازد.

از مهمتری مشخصه‌های سلامت سطح، سختی سطح ماشین‌کاری شده می‌باشد که تاثیر مهمی روی رفتار سایشی و عمر خستگی قطعه دارد [۴]. فرآیند فرزکاری، سبب تغییر شکل پلاستیک لایه‌های سطحی قطعه کار شده و این امر منجر به بالا رفتن سختی در مقیاس میکرو در لایه سطحی و زیر سطحی قطعه‌ی ماشین‌کاری شده می‌شود و با پیشروی در عمق کاهش می‌یابد. زمانی که درجه حرارت قطعه در طول عملیات ماشین‌کاری از دمای آستنیته فراتر رود (به علت اصطکاک، لبه انباشته و کرنش پلاستیک)، فاز آستنیت تغییر کرده و ضمن کوئنچ شدن، لایه

<sup>۱</sup> Hard Difficult to Cut

تغییر یافته‌ی شکننده‌ای با نام لایه سفید بوجود می‌آید. این لایه‌ی مارتنزیتی، دارای تنش پسماند و تردی بالا بوده و در نتیجه می‌تواند بر روی استحکام خستگی ماده تأثیر منفی بگذارد. بنابراین کاهش سختی و تردی این لایه مورد نیاز می‌باشد [۵]. خواص این لایه را می‌توان توسط اندازه‌گیری میکروسختی سطح قطعه، مورد بررسی قرارداد [۶]. گفتنی است که بیشترین مقادیر میکروسختی، در لایه‌ی سطحی قطعه‌ی ماشین‌کاری شده به وجود می‌آید که مقدار آن از سطح به مغز قطعه به سرعت کاهش می‌یابد.

اکسینت و همکاران [۷] طی انجام تحقیقی بیان کردند که سلامت سطح فرز‌کاری سرعت بالا دارای مزایایی همچون کاهش تغییرات میکروساختاری، کاهش ضخامت لایه سخت شده سطح و بهبود عمر خستگی نسبت به فرآیند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی<sup>۱</sup> (EDM) است. همچنین در فرآیند فرز‌کاری سرعت بالا، در زیر لایه‌ی سطحی، تنش پسماند فشاری بوجود می‌آید که از رشد ترک در طول تست خستگی جلوگیری می‌کند.

هونگ و همکاران [۸]، فرز‌کاری سرعت بالای آلایژ تیتانیومی را با دو ابزار مختلف برای بررسی تغییرات میکروسختی سطح ماشین‌کاری شده انجام دادند و گزارش کردند که سختی زیرسطحی در فاصله  $10\ \mu\text{m}$  زیر سطح ماشین‌کاری شده، پایینتر از سختی میانگین آلایژ پایه است. انتقال حرارت پایین آلایژ تیتانیوم عامل حفظ دمای زیرسطح ماشین‌کاری و به تبع آن نرم شدگی ماده در این قسمت ذکر شد.

آلام و همکاران [۹] با بررسی توپوگرافی سطح در فرز‌کاری سرعت بالای تیتانیوم دریافتند که چسبندگی لبه انباشته بر روی سطح ماشین‌کاری شده قابل مشاهده است. همچنین کرنش سختی بیش از حد ماده، تغییر شکل پلاستیک سطح قطعه کار و تغییر شکل موضعی در دماهای نسبی پایین منجر به افزایش میکروسختی لایه زیر سطحی می‌شود. از آنجایی که ماشین‌کاری سرعت بالا با افزایش کرنش، نرخ کرنش و همچنین دما مرتبط است، تغییرات متالورژیکی در ماده مورد انتظار می‌باشد.

التان و ازیل [۱۰] سلامت سطح ماشین‌کاری شده آلایژهای تیتانیوم و نیکل را مطالعه کرده و نشان دادند که مقدار سختی سطح ماشین‌کاری شده بیشتر از سختی اولیه‌ی ماده بوده و عمق آن از  $200\ \mu\text{m}$  تا  $500\ \mu\text{m}$  می‌باشد.

پاوار و پاواد [۱۱] با ماشین‌کاری آلایژ تیتانیوم به صورت خشک و افزایش سختی در محدوده سطح ماشین‌کاری شده نشان دادند که سرعت تنها عامل تأثیرگذار بوده و تداخل میان نرخ پیشروی و عمق برش نیز اثراتی روی مقدار سختی قطعه داشت. سطح ماشین‌کاری شده دگرگونی کمتر و مشابه آن صافی سطح کمتری را نتیجه داد.

یاو و همکاران [۱۲] به مطالعه تغییرات سلامت سطح در فرز‌کاری سرعت بالای آلایژ تیتانیوم Ti-۶Al-۴V پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند که افزایش میزان پارامترهای برش، باعث بالا رفتن میزان میکروسختی و منجر به تغییر شکل سطح شده است. در واقع افزایش پیشروی و همچنین ازدیاد حرارت برش و سریع سرد شدن سطح دلایل توجیهی برای مطالعه سختی سطح بود. اکسید شدن سطح ماشین‌کاری شده به دلیل حرارت ناشی از ماشین‌کاری نیز عامل دیگری است که در افزایش میکروسختی معرفی شد.

<sup>۱</sup>. Electrical discharge machining

تحقیقات کمی در زمینه مطالعه میکروسختی سطح در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم به روش روانکاری با حداقل سیال برشی<sup>۱</sup> صورت گرفته است، بنابراین نیاز است با توجه به مزایای مختلف این فرآیند، شرایط فرزکاری بهینه‌ی این آلیاژ پراهمیت و پرمصرف توسعه داده شود. هدف از تحقیق حاضر، مطالعه اثر فرزکاری سرعت بالا و پارامترهای برشی این فرآیند روی میکروسختی سطح آلیاژ  $Ti_6Al_4V$  می‌باشد. طرح آزمایش عاملی کامل با دو متغیر سرعت برشی و نرخ پیشروی به عنوان پارامترهای طراحی انتخاب شدند. در نهایت شرایط بهینه فرزکاری سرعت بالا بر اساس معیار حداقل سختی استخراج گردید.

### مواد و روش تحقیق

ماده‌ی به کاررفته در این تحقیق، آلیاژ تیتانیوم  $Ti_6Al_4V$  آنیل شده با سختی HV ۳۰۰ بود. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش‌های فرزکاری روی نمونه‌های مکعبی شکل به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  میلیمتر با وجوه سنگ خورده انجام گرفت. ابزار برشی مورد استفاده، تیغه فرز انگشتی سرتخت چهار لبه از جنس کاربید تنگستن با پوشش TiAlN به قطر ۶ میلیمتر، زاویه مارپیچ  $30^\circ$  ساخت شرکت Korloy بود. تمامی تست‌های طرح‌ریزی شده روی ماشین فرز CNC چهار محوره‌ی کنترل همزمان مدل ۷۱۰ Mikron UCP با حداکثر دور اسپیندل ۴۲۰۰۰ rpm انجام شد. چیدمان آزمایش، نحوه بستن قطعه کار و موقعیت نازل‌های پاشش روانکار در شکل ۱ آمده است. روش روانکاری بکاررفته، روانکاری با حداقل سیال برشی با استفاده از روغن معدنی بود. دبی روغن ۲۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار هوا ۶ بار بود. به منظور عملکرد بهتر سیستم روانکاری، از دو نازل پاشش با زاویه  $30^\circ$  نسبت به ابزار بهره گرفته شد.

در ادامه، تست‌های فرزکاری طرح‌ریزی شدند. طرح آزمایش به کاررفته در این تحقیق، روش فاکتوریل کامل<sup>۲</sup> بود. دو پارامتر ورودی سرعت برشی ( $V_c$ ) و پیشروی بر دندانانه ( $f_z$ ) به ترتیب در ۵ و ۲ سطح، به عنوان متغیرهای آزمایش بودند. سایر پارامترهای برش یعنی عمق برش محوری ( $a_p$ ) و عمق برش شعاعی ( $a_e$ )، ثابت و به ترتیب ۰.۵ و ۲ میلیمتر در نظر گرفته شدند. در جدول ۲، پارامترهای ماشین‌کاری به همراه سطوح و مقادیر آن‌ها آمده است. آزمایش‌ها در حالت فرزکاری موافق انجام گرفت. تعداد ۱۰ تست از این طرح آزمایش نتیجه گرفته شد. به منظور جلوگیری از خطای احتمالی، کلیه تست‌ها به صورت تصادفی و با ۳ بار تکرار انجام شدند.

به منظور اندازه‌گیری میکروسختی سطح از دستگاه سختی‌سنج شرکت Bareiss مدل V-test استفاده گردید. در این تحقیق، میانگین میکروسختی ۳ ناحیه مختلف از یک سطح ماشین‌کاری شده به عنوان معیار میکروسختی آن آزمایش مد نظر قرار گرفت. میکروسختی سطح بر حسب سختی ویکرز گزارش شد.

<sup>۱</sup> . Minimum Quantity Lubrication

<sup>۲</sup> . Full Factorial Design

## نتایج و بحث

جدول ۳ مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش را به همراه تمامی مقادیر اندازه گیری شده میکروسختی نشان می دهد. در شکل ۳، بافت سطح فرز کاری شده قبل و بعد از انجام عملیات میکروسختی سنجی نشان داده شده است. عمدتاً تغییرات سختی سطح پس از عملیات ماشین کاری را می توان در سه مرحله ی متوالی مورد بررسی قرار داد. در ابتدا، حرارت موضع، منجر به تغییر فاز می شود. سپس به علت تغییر شکل پلاستیک شدید، تبلور مجدد و تغییر شکل و اندازه دانه رخ می دهد. در نهایت، در اثر واکنش های محیطی سطح با روان کار و هوا، نیتریده شدن و یا اکسیداسیون سطحی اتفاق می افتد [۱۳]. از میان این فعل و انفعالات، مکانیزم اول که ماهیت حرارتی دارد، به عنوان عامل اصلی تغییر میکروسختی شناخته می شود.

در شکل ۴ نتایج میکروسختی با تغییر سرعت برشی در دو نرخ پیشروی آمده است. در تمامی آزمایش ها فارغ از شرایط برشی، سختی سطح ماشین کاری شده بالاتر از سختی اولیه ی ماده بود. با افزایش سرعت برشی تا  $m/min$  ۳۷۵، میکروسختی بالا می رود. در این سرعت برشی و در نرخ پیشروی  $0.08 mm/tooth$ ، ماده حداکثر میزان سخت شدگی را داشته و سختی آن از  $Hv 300$  آلیاژ زمینه (قبل از ماشین کاری) به  $Hv 473$  افزایش می یابد (افزایش ۵۷٪). پس از سرعت برشی  $m/min 375$ ، روند تغییرات میکروسختی، سیر نزولی شدیدی پیدا می کند. به منظور تحلیل بهتر نتایج، نمودار شکل ۴ به دو ناحیه قبل و بعد از این سرعت تقسیم شد. تغییرات ماهیت سطح در این فرآیند ترکیبی از بارهای مکانیکی و حرارتی است [۱۴]. میزان اثرگذاری این دو و تعیین مکانیزم غالب بر شرایط برش ارتباط مستقیمی دارد. در ناحیه اول (سرعت های پایین تر از  $m/min 375$ )، با افزایش سرعت، نرخ تغییر شکل ماده بیشتر شده و به خاطر بروز پدیده کارسختی، سختی پس از ماشین کاری بالاتر می رود. البته حرارت تولیدی نیز در این ناحیه در حال افزایش است که با کارسختی مقابله می کند. از این رو، شیب افزایش سختی روندی نزولی خواهد داشت با این تفاوت که همچنان کارسختی مکانیزم غالب در ناحیه اول است.

در ناحیه دوم (از  $m/min 375$  تا  $m/min 450$ )، به علت سرعت بالای براده برداری و شدید بودن نرخ کرنش ماده، حرارت فرصت کافی برای نفوذ به قطعه کار را پیدا نمی کند و قسمت اعظم آن به همراه براده از سیستم خارج می شود [۱۵]. به عبارتی حرارت موضعی بالا در ناحیه برش، بر پدیده کارسختی غلبه کرده و به علت دمای پایین قطعه، افزایش سختی سطح در این شرایط برشی شدید نخواهد بود.

شکل ۵ تغییرات سختی را بر حسب نرخ پیشروی نمایش می دهد. افزایش میکروسختی با بیشتر شدن نرخ پیشروی به دلیل افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و نیروهای ماشین کاری است. از آن گذشته، افزایش فشار و له کردن ماده از طرف ابزار باعث افزایش کارسختی خواهد شد [۱۶]. در این شکل، وابستگی مقادیر سختی نسبت به نرخ پیشروی مشهود است. در سرعت های برشی بالاتر، شیب تغییرات کمتر شده و از میزان این وابستگی کاسته می شود. در شکل ۶ نیز رویه پاسخ و کانتور تداخل تأثیر نرخ پیشروی و سرعت برشی بر روی میکروسختی آمده است.

## نتیجه گیری

- ۱) در تمامی آزمایش‌ها مستقل از شرایط برشی، سختی سطح ماشین کاری شده بالاتر از سختی اولیه آلیاژ بود.
- ۲) بیشترین لایه سخت شده سطح ماشین کاری در شرایط برشی ( $V_c = 375 \text{ m/min}$  و  $f_z = 0.08 \text{ mm/tooth}$ ) گزارش شد که در مقایسه با سختی اولیه آلیاژ افزایش ۵۷٪ را نشان داد.
- ۳) با افزایش سرعت برشی تا  $375 \text{ m/min}$ ، میکروسختی بالا رفته و پس از آن شدیداً افت می‌کند. این روند به خاطر سرعت بالای براده برداری و شدید بودن نرخ کرنش ماده است که فرصت کافی برای نفوذ حرارت به قطعه کار را نمی‌دهد و قسمت اعظم حرارت از طریق براده دفع می‌شود.

## مراجع

۱. Ezugwu E.O., Bonney J., Yamane Y., "An Overview Of The Machinability Of Aeroengine Alloys", *Journal Of Materials Processing Technology*, ۱۳۴ (۲۰۰۳) ۲۳۳-۲۵۳.
۲. Grzesik W, Advanced Machining Processes Of Metallic Materials, (۲۰۰۸) Elsevier.
۳. Davim J.P., Surface Integrity In Machinig ,(۲۰۰۹) Springer.
۴. Hashimoto F, Guo Y.B, Warren A.W "Surface Integrity Difference Between Hard Turned And Ground Surfaces And Its Impact On Fatigue Life", *CIRP Ann Manuf Technol*, ۵۵ (۲۰۰۶) ۸۱-۸۴.
۵. Akcan, S., Et Al., "Formation Of White Layers In Steels By Machining And Their Characteristics", *Metallurgical And Materials Transactions*, ۲۰۰۲. ۳۳(۴): P. ۱۲۴۵-۱۲۵۴.
۶. Davim, J.P., Machining Of Hard Materials. ۲۰۱۱: Springer.
۷. Axinte, D. And R. Dewes, "High-Speed Milling Of AISI H۱۳ Hot-Work Tool Steel Using Polycrystalline Cubic Boron Nitride Ball-Nose Mills: From Experimental Investigations And Empirical Modelling To Functional Testing Of The Machined Surfaces. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers", *Journal Of Engineering Manufacture*, ۲۰۱۰. ۲۲۴(۱): (P. ۱۵-۲۴).
۸. Su, H., Et Al., " Tool Life And Surface Integrity In High-Speed Milling Of Titanium Alloy TA۱۵ With PCD/PCBN Tools". *Chinese Journal Of Aeronautics*, ۲۰۱۲. ۲۵(۵): P. ۷۸۴-۷۹۰.
۹. Alam, S. And A.A.P. AU. "Surface Texture Investigation In High Speed Flat End Milling Of Ti-۶Al-۴V", *In Proceedings Of The ۲۰۱۰ International Conference On Industrial Engineering And Operations Management*, Dhaka, Bangladesh. ۲۰۱۰.
۱۰. Ulutan, D. And T. Ozel, "Machining Induced Surface Integrity In Titanium And Nickel Alloys: A Review". *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, ۲۰۱۱. ۵۱(۳): P. ۲۵.
۱۱. Pawar, R. And P. Raju. "Surface Integrity Analysis In Dry High Speed Turning Of Titanium Alloys Ti-۶Al-۴V". In *International Conference On Trends In Industrial And Mechanical Engineering (ICTIME'۲۰۱۲)*.

پانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

۱۲. Yao, C.-F., Et Al., "Surface Integrity And Fatigue Behavior For High-Speed Milling Ti-۱۰V-۲Fe-۳Al Titanium Alloy", *Journal Of Failure Analysis And Prevention*, ۲۰۱۴. ۱۴(۱): P. ۱۰۲-۱۱۲.
۱۳. Duan, C., Et Al., "Modeling Of White Layer Thickness In High Speed Machining Of Hardened Steel Based On Phase Transformation Mechanism". *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, ۲۰۱۳. ۶۹(۱-۴): P. ۵۹-۷۰.
۱۴. Anhai Li, "Surface integrity of high-speed face milled Ti-۶Al-۴V alloy with pcd tools", *Machining Science And Technology*, ۱۷:۴۶۴-۴۸۲, ۲۰۱۳
۱۵. Trent E. , Wright P. , Metal Cutting , ۴th Edition , Butterworth-Heinemann Press , ۲۰۰۰.
۱۶. Thakur, D., B. Ramamoorthy, and L. Vijayaraghavan, " Effect of high speed cutting parameters on the surface characteristics of superalloy Inconel ۷۱۸", *practice*, ۲۰۱۰. ۱: p.۵.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد آلیاژ Ti6Al4V

عنصر	Ti	V	Al	N	O	H	C	Fe
درصد وزنی (%)	پایه	۴	۶	۰.۰۵	۰.۲	۰.۰۱	۰.۰۸	۰.۲۵

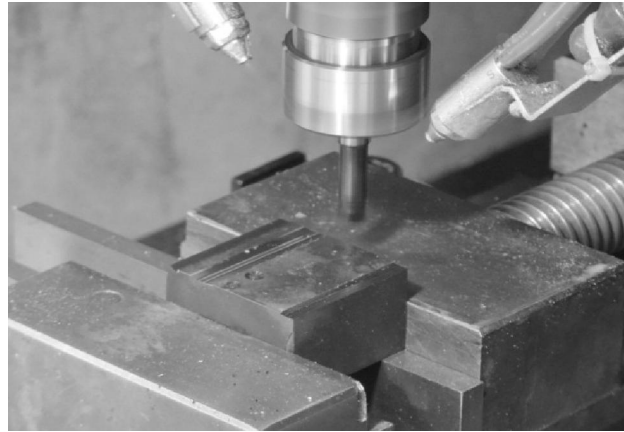
جدول ۲: پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن‌ها

سطوح					پارامتر
۵	۴	۳	۲	۱	
۴۵۰	۳۷۵	۳۰۰	۲۲۵	۱۵۰	سرعت برشی $V_c$ (m/min)
-	-	-	۰.۰۸	۰.۰۴	پیشروی $f_z$ (mm/tooth)
-	-	-	-	۰.۵	عمق برش محوری ( $a_p$ )
-	-	-	-	۲	عمق برش شعاعی ( $a_e$ )

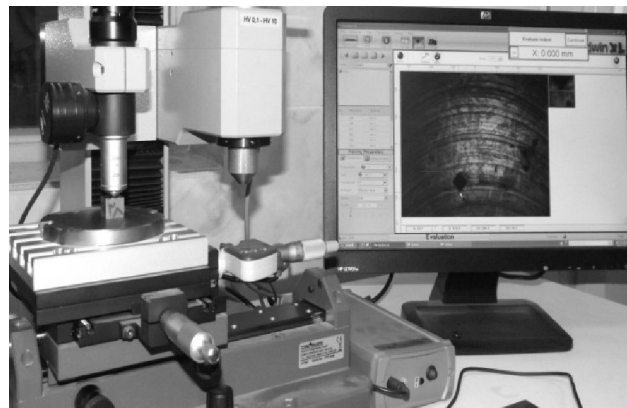
جدول ۳: ماتریس طراحی آزمایش فاکتوریل کامل به همراه نتایج

شماره آزمایش	$V_c$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	میکروسختی $HV_{(0.1)}$
۱	۱۵۰	۰.۰۴	۰.۵	۲	۳۴۲
۲	۱۵۰	۰.۰۸	۰.۵	۲	۳۹۰
۳	۲۲۵	۰.۰۴	۰.۵	۲	۳۸۴
۴	۲۲۵	۰.۰۸	۰.۵	۲	۴۳۲
۵	۳۰۰	۰.۰۴	۰.۵	۲	۴۴۶
۶	۳۰۰	۰.۰۸	۰.۵	۲	۴۶۰
۷	۳۷۵	۰.۰۴	۰.۵	۲	۴۵۴
۸	۳۷۵	۰.۰۸	۰.۵	۲	۴۷۳
۹	۴۵۰	۰.۰۴	۰.۵	۲	۳۶۱
۱۰	۴۵۰	۰.۰۸	۰.۵	۲	۳۷۱

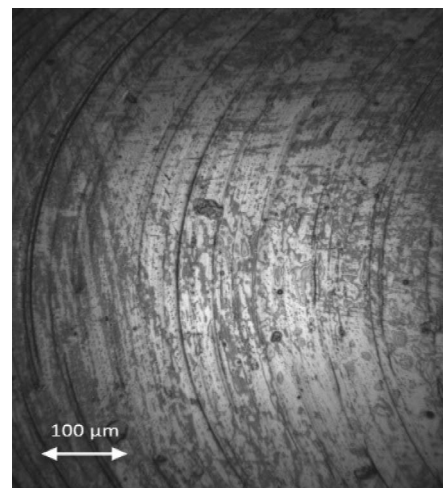
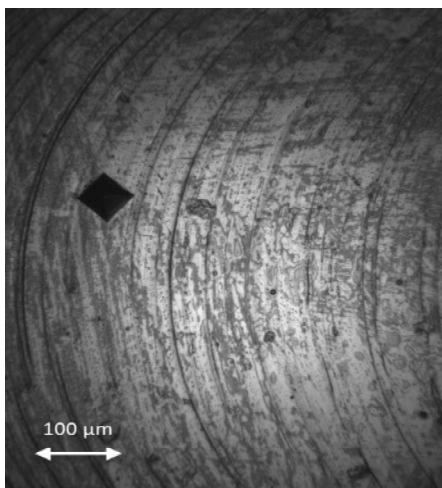




شکل ۱: نحوه قرارگیری قطعه، ابزار و نازل روانکاری در فرزکاری سرعت بالا



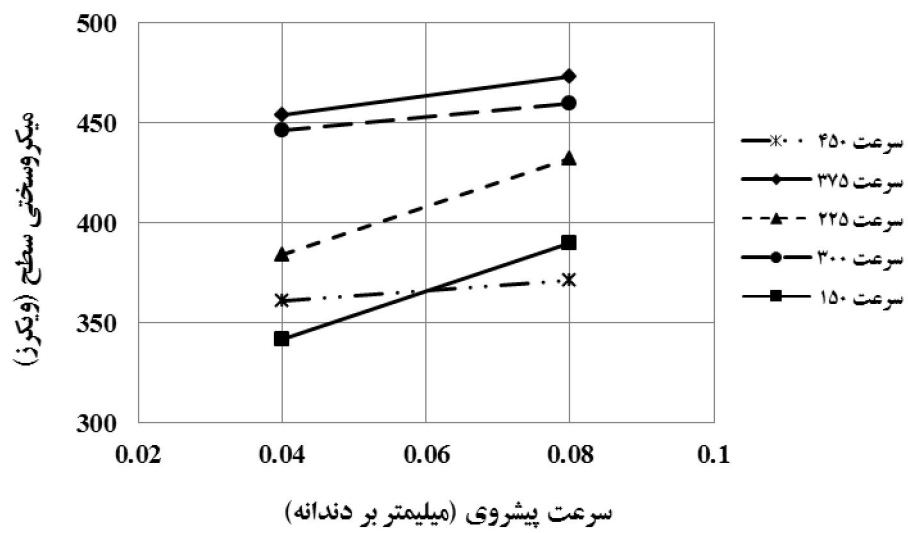
شکل ۲: اندازه گیری میکروسختی سطح فرزکاری شده



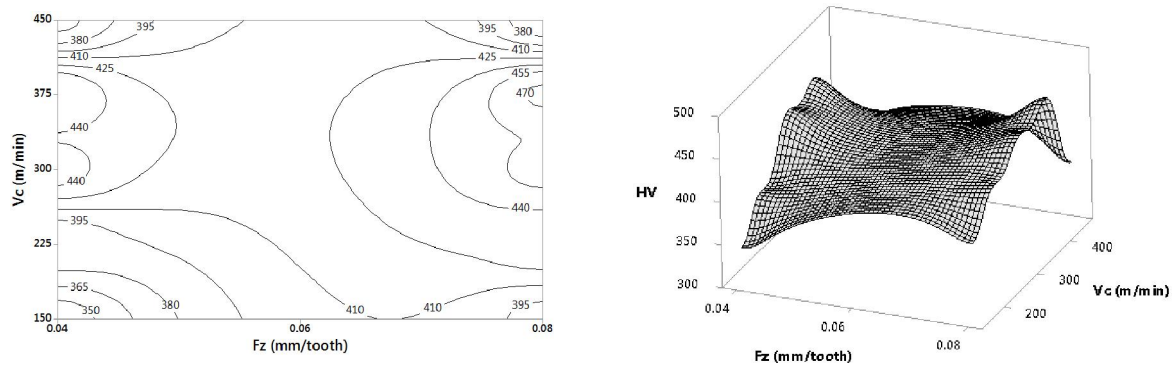
شکل ۳: توپوگرافی سطح قبل و بعد از انجام میکروسختی سنجی



شکل ۴: تغییرات میکروسختی سطح ماشین کاری شده با سرعت برشی



شکل ۵: تغییرات میکروسختی سطح ماشین کاری شده با نرخ پیشروی



شکل ۶: رویه پاسخ و کانتور تأثیر نرخ پیشروی و سرعت برشی بر روی میکروسختی