



# An Empirical Study on the Effect of Feed Rate and Cutting Depth on the Cutting Force, Chip Temperature, Surface Roughness, and Microhardness Variation in Laser-Assisted Turning Compared to Conventional Turning of Waspaloy

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Esrafil H.<sup>1</sup>,  
Amirabadi H.<sup>2\*</sup>,  
Akbari J.<sup>3</sup>,  
Jafarian F.<sup>4</sup>

### How to cite this article

Esrafil H, Amirabadi H, Akbari J, Jafarian F, An Empirical Study on the Effect of Feed Rate and Cutting Depth on the Cutting Force, Chip Temperature, Surface Roughness, and Microhardness Variation in Laser-Assisted Turning Compared to Conventional Turning of Waspaloy. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(06):363-371.

<sup>1</sup> Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran  
<sup>2</sup> Faculty of Engineering, University of Neyshabur, Neyshabur, Iran  
<sup>3</sup> Dep. of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran  
<sup>4</sup> Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran

### \*Correspondence

Address: Faculty of Engineering, University of Neyshabur, Neyshabur, Iran.  
hamirabadi@neyshabur.ac.ir

### Article History

Received: July 23, 2024  
Accepted: August 30, 2024  
ePublished: September 8, 2024

## ABSTRACT

The conventional material removal processes have always run into difficulties in machining hard materials, and nickel-based superalloys are no exception. The inherent properties of these materials usually lead to high tool wear rates and low surface integrity. These concerns justify the need for combining conventional material removal processes with advanced technologies. Laser Assisted Machining is one such process by which, through localized softening of work material prior to the cutting operation, a more efficient material removal process can be realized compared with what can be done by conventional machining. This work studies the effect of machining parameters such as constant Rotational speed at 400 RPM, feed rates of 0.035, 0.07, 0.105 mm/rev, and cutting depths of 0.3, 0.6, and 0.9 mm on variation of cutting force, chip temperature, surface roughness, and microhardness in variation of the workpiece surface. The process is a Laser Assisted Turning (LAT) process compared to conventional Turning (CT) by analyzing the parameters for a Waspaloy. A fiber laser with constant power output of 500 W was used to irradiate the tool material. The angle of contact of the beam with the tip of the tool was fixed at 60°. The workpiece's hardness was  $385 \pm 10$  Vickers initially and had a diameter of 25 mm. It has been revealed that the application of LAT decreases the cutting force up to 16% compared to CT. The workpiece surfaces produced by LAT had higher chip temperatures than CT and were of 42% better quality in terms of surface roughness. In the LAT process, the difference in microhardness values at different points on the workpiece surface was within a much smaller range than in the CT process. The results showed that as the scanning speed of the laser increased on the surface of the workpiece, the thickness of the laser heat-affected zone below the surface of the workpiece decreased.

**Keywords** Laser Assisted Turning (LAT), Surface Roughness, Cutting Forces, Chip Temperature, Microhardness

## CITATION LINKS

1- Advances in laser assisted machining of .... 2- Tool engage investigation in .... 3- An overview on machinability of .... 4- A physically based constitutive model for .... 5- Influence of microstructure on wear behaviour of .... 6- The science and design of .... 7- Super-nickel orthogonal turning operations optimization. 8- Laser assisted machining of difficult to cut materials .... 9- Field-assisted machining of .... 10- Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis. 11- Laser assisted machining of inconel 718 superalloy. 12- Laser assisted machining: an overview. 13- A study on laser assisted machining of Ti10V2Fe3Al alloy with .... 14- Cutting forces and wear in dry machining of .... 15- The evaluation of the effects of control factors on surface roughness in .... 16- Investigation of surface integrity in laser-assisted machining of .... 17- Laser-assisted machining of Inconel 718 with .... 18- Laser-assisted high-speed finish turning of .... 19- Improvement of machinability of Waspaloy via laser-assisted machining. 20- Parametric modeling and optimization of laser scanning parameters during .... 21- The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of .... 22- Pulsed laser-assisted machining of .... 23- Nd: YAG pulsed laser assisted machining of AMS 5708 Waspaloy alloy. 24- Aerospace Material Specification AMS 5708L, 2015. 25- On the evaluation of the global heat transfer coefficient in .... 26- The machinability of nickel-based alloys: a review. 27- Investigation on the effects of damping over the temperature distribution on internal turning bar using .... 28- Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: Comparison of .... 29- High bandwidth thermal microscopy of .... 30- Improving surface integrity in finish machining of .... 31- Surface integrity in ....

## بررسی تجربی تاثیر نرخ پیشروی و عمق برش بر نیروی برشی، دمای براده، زبری و تغییرات میکروسختی سطح قطعه کار در تراشکاری به کمک لیزر و مقایسه با تراشکاری سنتی واسپالوی

حمیدرضا اسرافیلی<sup>۱</sup>، حسین امیرآبادی<sup>۲\*</sup>، جواد اکبری<sup>۳</sup>، فرشید جعفریان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

<sup>۴</sup> مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران

### چکیده

ماشین کاری مواد سخت به ویژه سوپرآلیاژهای پایه نیکل با فرآیندهای براده برداری سنتی همچنان به عنوان یک چالش در نظر گرفته می شود. ویژگی های خاص این مواد اغلب منجر به سایش سریع ابزار و کاهش یکپارچگی سطح می شوند. به همین دلیل، ترجیح داده می شود که فرآیندهای ماشین کاری سنتی با فناوری های دیگر ترکیب شوند تا مشکلات ماشین کاری این مواد برطرف شوند. ماشین کاری به کمک لیزر با گرم کردن موضعی و نرم کردن مواد قطعه کار قبل از برش امکان براده برداری کارآمدتری را نسبت به شرایط مرسوم فراهم می کند. در این پژوهش، با مقایسه تراشکاری به کمک لیزر و تراشکاری سنتی بر روی سوپرآلیاژ واسپالوی تأثیر پارامترهای ماشین کاری در سرعت دورانی ثابت (۴۰۰ دور بر دقیقه)، نرخ پیشروی (۰/۰۳۵، ۰/۰۷ و ۰/۱۰۵ میلی متر بر دور) و عمق برش (۰/۱۳، ۰/۱۶ و ۰/۱۹ میلی متر) بر نیروی برش، دمای براده، زبری سطح و تغییرات میکروسختی روی سطح قطعه کار مورد بررسی قرار گرفت. از لیزر فیبری با توان ثابت ۵۰۰ وات و فاصله زاویه ای تماس پرتو لیزر با نوک ابزار برابر با ۶۰ درجه استفاده شد. سختی اولیه قطعه کار  $380 \pm 10$  ویکرز و قطر آن ۲۵ میلی متر بود. نتایج نشان داد که استفاده از لیزر در مقایسه با تراشکاری سنتی، باعث کاهش نیروی برش به مقدار ۱۶٪ شد. دمای براده در تراشکاری با لیزر نسبت به تراشکاری سنتی بیشتر بود. کاهش نیروی ماشین کاری و افزایش دما باعث افزایش کیفیت زبری سطح به مقدار ۴۲٪ شد. در تراشکاری به کمک لیزر دامنه تغییرات میکروسختی در سطح قطعه کار کمتر از تراشکاری سنتی بود. نتایج نشان داد افزایش سرعت اسکن حرارت لیزر روی سطح قطعه کار باعث کاهش ضخامت ناحیه تحت تاثیر دمای لیزر در زیر سطح قطعه کار شد.

**کلیدواژه ها:** تراشکاری به کمک لیزر، زبری سطح، تغییرات میکروسختی، دمای براده، نیروی برش

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۹

\* نویسنده مسئول: hamirabadi@neyshabur.ac.ir

### ۱- مقدمه

ماشین کاری به کمک لیزر یکی از روش های نوین ماشین کاری است که جهت سهولت در عملیات براده برداری مواد سخت کاربرد دارد<sup>[1]</sup>. سوپرآلیاژهای پایه نیکل در صنعت به عنوان موادی با قابلیت ماشین کاری پایین شناخته شده اند<sup>[2,3]</sup>. واسپالوی (Waspaloy) یک نوع سوپرآلیاژ پایه نیکل است که در دهه ۱۹۵۰ توسط شرکت پرات و ویتنی ساخته شد و عمدتاً برای قطعات توربین هواپیما، دیسک های کمپرسور و شفت ها استفاده می شود.

ترکیبی از خواص کششی و خستگی خوب در واسپالوی در دماهای متوسط باعث شده است برای کاربردهای مذکور جذاب باشد و به عنوان یک ماده سخت که دارای ویژگی های منحصر به فردی است کاربرد آن را در صنایع پیشرفته همچون صنایع هوایی بسیار گسترده کرده است<sup>[4,5]</sup>. به علت سخت شدن رسوب جامد در فاز غنی شده نیکل، پایداری واسپالوی در دمای بالا افزایش یافته است. همچنین ساختار مکعبی مرکز دار و وجود فاز گاما که یک فاز آستنیتی پایه نیکل است و درصد زیادی از کروم، کبالت، مولیبدن و تنگستن موجب افزایش سختی این نوع سوپرآلیاژ شده است. با افزایش میزان رسوبات، جابجایی کاهش می یابد که این موضوع باعث افزایش سختی سوپرآلیاژ می شود<sup>[6]</sup>. در واسپالوی عناصری از قبیل (Ni, Co, Cr, Ti) باعث استحکام و مقاومت در برابر خوردگی بالا می شود که ماشین کاری این ماده را مشکل می کند. قابلیت ماشین کاری پایین واسپالوی در واقع به دلیل ویژگی های ذاتی مختلف آن مانند: هدایت حرارتی کم، تغییر شکل ابزار برش به دلیل سختی و استحکام بالا، سخت شدن سریع قطعه کار هنگام ماشین کاری به دلیل وجود ماتریس آستنیتی، سایش سریع ابزار به دلیل وجود کاربیدهای ساینده سخت در ریزساختار قطعه کار، نفوذ حرارتی پایین ماده قطعه کار و بالا رفتن دمای برش در نوک ابزار، واکنش شیمیائی با مواد ابزار، چسبندگی تراشه به قطعه کار و ابزار و تشکیل لبه های انباشته و جوش خوردگی ماده قطعه کار به لبه های برش است<sup>[2,5,7]</sup>. واسپالوی از طریق فاز گاما پریم و رسوبات کاربیدی، که مقدار آن تقریباً ۲۰ درصد حجمی در مواد پیرسازی شده است، سخت می شود. واسپالوی دارای یک ماتریس آستنیتی با فاز  $\gamma$  است و رایج ترین فازهای ثانویه کاربیدهای فلزی شامل MC و  $M_{23}C_6$  و فاز  $\gamma'$ ، فاز تقویت کننده مکعبی منظم  $Ni_3(Al, Ti)$  است. فازهای کاربید در واسپالوی عمدتاً با قفل کردن مرزهای دانه به تقویت آن کمک می کند، که باعث کاهش لغزش مرز دانه در دمای بالا می شود<sup>[5]</sup>. در این میان روش های مختلف ماشین کاری با استفاده از انرژی خارجی از جمله ماشین کاری به کمک لیزر (LAM- Laser Assisted Machining) توجه پژوهشگران را در زمینه برش فلزات سخت به ویژه سوپرآلیاژهای پایه نیکل به خود جلب کرده است<sup>[8,9]</sup>. ماشین کاری به کمک لیزر ترکیبی از ماشین کاری سنتی و حرارت دهی لیزری است که بر مبنای کاهش مقاومت ماده در دماهای بالا و در نتیجه کاهش نیروی برشی مورد نیاز عمل می کند، که به افزایش سهولت در براده برداری منجر می شود<sup>[10,11]</sup>. مزیت استفاده از لیزر ایجاد گرمای موضعی نقطه برخورد پرتو لیزر به سطح قطعه کار و جلوگیری از ذوب شدن مواد قطعه کار در حین عملیات ماشین کاری است<sup>[12,13]</sup>. انتخاب پارامترهای ماشین کاری به منظور کاهش هزینه های ابزار و زمان ماشین کاری و بدست آوردن دقت ابعادی و مقادیر ایده آل کیفیت سطح از اهمیت بالائی برخوردار است<sup>[14-16]</sup>. بنابراین، بررسی نیروهای ماشین کاری و تاثیرات دمای ایجاد شده توسط لیزر در

فرآیند ماشین‌کاری سوپرآلیاژ پایه نیکل به ویژه واسپالوی، به منظور رسیدن به سطحی مطلوب و بدون ایراد، مورد توجه محققین قرار گرفته است. اندرسون و همکارانش<sup>[10]</sup> به بررسی اقتصادی تراشکاری به کمک لیزر بر روی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداختند. آزمایش‌های تجربی به منظور اندازه‌گیری دمای سطح، محدوده بهینه پارامترها، سایش ابزار و زبری سطح صورت پذیرفت و از دو نوع لیزر Nd-YAG و CO<sub>2</sub> با توان‌های مختلف و از ابزارهای سرامیکی و کاربیدی استفاده شد. جیرماین و همکارانش<sup>[17]</sup> به بررسی یکپارچگی سطح ماشین‌کاری شده با کمک لیزر و مقایسه با روش ماشین‌کاری معمولی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از ابزارهای سرامیکی و کاربیدی پرداخت و نشان داد استفاده از لیزر در فرآیند تراشکاری کاهش ۴۰ درصدی نیروهای برشی را به همراه دارد و نتیجه‌گیری نمودند نوع ابزار نقش زیادی در کاهش نیروهای برشی ندارد لیکن تفاوت معناداری بین ابزارهای سرامیکی و ابزارهای کاربیدی وجود داشت. آتیا و همکارانش<sup>[18]</sup> به بررسی فرآیند تراشکاری سرعت بالا به کمک لیزر و تراشکاری سنتی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداختند. آنها از لیزر Nd:YAG پیوسته با توان ۴ کیلو وات استفاده کردند. نتایج نشان داد نیروی برشی در تراشکاری لیزر در مقایسه با تراشکاری سنتی کاهش قابل توجهی داشت. همچنین کیفیت سطح نهائی ۲۵ درصد بهبود پیدا کرد. دینگ و همکارش<sup>[19]</sup> به بررسی بهبود شرایط فرآیند تراشکاری واسپالوی به کمک لیزر پرداختند. آنها از دو نوع لیزر Nd:YAG با توان ۵۰۰ وات و لیزر CO<sub>2</sub> با توان‌های متغیر استفاده کردند. در این مطالعه از یک مدل عددی به منظور پیش‌بینی دمای نرخ حذف مواد با متغیرهای توان لیزر، سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش استفاده شد. وینکاتسان و همکارش<sup>[20]</sup> به بررسی پارامترهای تاثیر گذار بر حرارت ایجاد شده بر روی سطح قطعه‌کار و بهینه‌سازی آنها در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر برای سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداختند. بر اساس تحقیقات آنها پارامترهای تاثیرگذار در حرارت ایجاد شده بر روی سطح و زیر سطح قطعه‌کار شامل: توان لیزر، زاویه بین ابزار و چشمه لیزر (فاصله زاویه‌ای بین ابزار و لیزر) سرعت برشی و نرخ پیشروی بود. در این تحقیق از لیزر Nd:YAG با طول موج پیوسته و حداکثر توان ۲ کیلو وات استفاده شد. وینکاتسان<sup>[21]</sup> به مطالعه تغییرات نیروی برش، یکپارچگی سطح و عمر ابزار در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر بر روی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخت. در این تحقیق از دو سطح برای توان لیزر (۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ وات)، چهار سطح برای سرعت برشی (۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ متر بر دقیقه)، دو سطح برای نرخ پیشروی (۰/۰۵ و ۰/۱۲۵ میلی‌متر بر دور) و یک سطح برای عمق برش (۰/۵ میلی‌متر) استفاده شد. از ابزار کاربیدی پوشش داده شده و دستگاه لیزر با توان ۲۰۰۰ وات و از نوع Nd:YAG استفاده شد. نتایج نشان داد استفاده از لیزر باعث بهبود زبری سطح و کاهش نیروهای برش و عیوب سطحی در قطعه‌کار می‌شود، همچنین افزایش عمر ابزار در

مقایسه با ماشین‌کاری معمولی مشاهده شد. نتایج به دست آمده نشان داد استفاده از لیزر با توان ۱۲۰۰ وات باعث کاهش ۲/۱ برابری نیروهای برش و ۴۶ درصدی زبری سطح و ۶۶ درصدی بهبود عمر ابزار نسبت به شرایط ماشین‌کاری معمولی شد. اژدری و همکارانش<sup>[22]</sup> با استفاده از لیزر پالسی به بررسی پارامترهای موثر در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸ با هدف مطالعه بر روی انرژی مخصوص برش، دمای سطح قطعه‌کار، زبری سطح قطعه‌کار، سایش ابزار، شکل براده و میکروسختی پرداختند. در این تحقیق از لیزر پالسی Nd:YAG با طول موج ۱/۰۶ میکرومتر استفاده شد. پارامترهای تاثیر گذار در این فرآیند شامل: توان لیزر، دوره زمانی پالس لیزر، فرکانس لیزر، سرعت برشی و نرخ پیشروی بود. در شرایط بهینه تراشکاری به کمک لیزر با توان ۴۰۰ وات، فرکانس ۸۰ هرتز، سرعت پیشروی ۲۴ متر بر دقیقه کاهش ۳۵ درصدی انرژی مخصوص برش و بهبود ۲۲ درصدی زبری سطح نسبت به تراشکاری سنتی مشاهده شد. شریفی و همکارانش<sup>[23]</sup> با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG به بررسی تراشکاری واسپالوی پرداختند. در این تحقیق با استفاده از طراحی آزمایش یک مدلی رگرسیونی با متغیرهای توان لیزر، فرکانس پالس، سرعت برشی و نرخ پیشروی به منظور تعیین دمای براده پیشنهاد شد. بر اساس نتایج به دست آمده، شرایط بهینه تراشکاری به کمک لیزر برای واسپالوی زمانی است که توان لیزر ۴۰۰ وات، فرکانس ۸۰ هرتز، سرعت برشی ۲۴ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۰۶ میلی‌متر در دور باشد. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد استفاده از انرژی لیزر در بهبود عملیات ماشین‌کاری قطعات با قابلیت ماشین‌کاری پایین نقش مهمی دارد. با این حال، بسیاری از مطالعات قبلی به نقاط ضعفی نظیر عدم تاثیر پارامترهای فرآیند تراشکاری شامل نرخ پیشروی و عمق برش، محدودیت در نوع و توان لیزرهای استفاده شده (لیزر با توان‌های بالا و یا ترکیبی) و کمبود بررسی‌های جامع در مورد تأثیر متقابل پارامترهای ماشین‌کاری با ماشین‌کاری سنتی اشاره نداشته‌اند. همچنین، اغلب این تحقیقات به ارزیابی دقیق نیروهای ماشین‌کاری، دمای براده تشکیل شده و تأثیر پارامترهای نرخ پیشروی و عمق برش بر سلامت نهایی سطح و همچنین تاثیر حرارت پرتو لیزر در زیر سطح قطعه‌کار قبل از براده‌برداری پرداخته نشده است.

این تحقیق به بررسی نیروی برش، دمای براده، زبری سطح و تغییرات میکروسختی سطح قطعه‌کار در سرعت دورانی ثابت (۴۰۰ دور بر دقیقه)، نرخ پیشروی و عمق برش متفاوت در تراشکاری به کمک لیزر با استفاده از لیزر فیبری کم توان و مقایسه با تراشکاری سنتی و بررسی ناحیه تحت تاثیر حرارت پرتو لیزر در زیر سطح قطعه‌کار قبل از براده‌برداری پرداخته است. سختی سطح قطعه‌کار مورد آزمایش  $385 \pm 10$  ویکرز و قطر قطعه‌کار ۲۵ میلی‌متر بود.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی قطعه‌کار مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. قطعه‌کار مورد استفاده میلگرد به قطر ۲۵ میلی‌متر بود. نمونه‌های آزمون تجربی جهت ایجاد رسوب فاز گاما پریم (۲) شامل: انحلال، پیرسازی و رسوب‌سختی عملیات حرارتی شد<sup>[24]</sup>. سختی نمونه‌ها از  $270 \pm 5$  ویکرز به  $380 \pm 10$  ویکرز افزایش یافت و سپس عملیات تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر انجام شد. تمامی آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام گردید و هر آزمایش ۳ مرتبه تکرار شد.

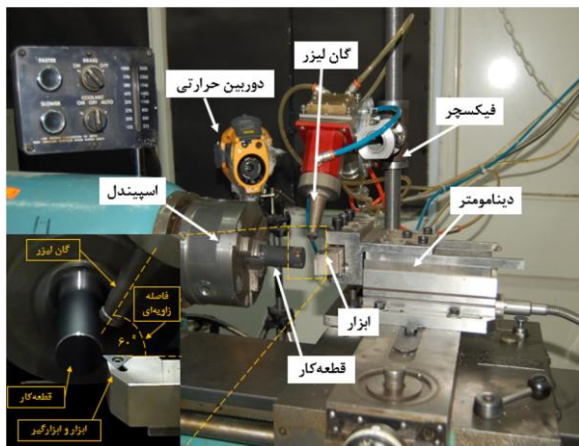
در این پژوهش از دستگاه لیزر فیبری پیوسته با توان اسمی حداکثری ۶۰۰ وات استفاده شد. به منظور موقعیت‌دهی مناسب گان لیزر روی سطح قطعه‌کار یک فیکسچر مخصوص با قابلیت ۶ درجه آزادی طراحی و ساخته شد و گان لیزر روی آن نصب شد. فیکسچر طراحی شده قابلیت موقعیت‌دهی پرتو لیزر را به منظور ایجاد فاصله زاویه‌ای پرتو لیزر با نوک ابزار از ۹۰ درجه تا ۳۰ درجه با گام‌های ۱۰ درجه را داشت. فیکسچر طراحی شده توانائی تنظیم پرتو لیزر بر روی سطح قطعه‌کار و نوک ابزار در جهت محورهای طولی، عرضی و ارتفاع ماشین تراش و همچنین گردش در حول محورهای مذکور با قابلیت قفل شدن در موقعیت دلخواه را داشت. از دستگاه پاورمتر هوا خنک مدل Ophir Nova II به منظور اطمینان از توان خروجی لیزر استفاده شد. از دستگاه ماشین تراش هاردینگ (Harding) مدل HLV-H، با حداکثر توان اسپیندل ۱/۱۲ کیلووات و دور متغیر از ۱۲۵ الی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی متغیر از ۲/۵ الی ۱۹۶ میلی‌متر بر دقیقه مستقل از یکدیگر و پیشروی شعاعی ابزار با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر استفاده شد. نیروهای ماشین‌کاری توسط دینامومتر کیستلر مدل ۹۱۲۱ اندازه‌گیری شد. قبل از انجام آزمایش‌ها از کالیبره بودن دستگاه اطمینان به عمل آمد. به منظور داده‌برداری نیروهای ماشین‌کاری از آمپلی‌فایر ۵۰۷۰ کیستلر به همراه کارت داده‌برداری A۵۶۹۷ کیستلر و نرم افزار داینور (DynoWare) استفاده شد. برای اندازه‌گیری دمای براده، از دوربین حرارتی (فروسرخ) فلوک (Fluke) مدل TI۴۰۰ با بازه دمائی ۲۰- الی ۱۲۰۰+ درجه سانتیگراد با دقت  $\pm 2$  درجه سانتیگراد استفاده شد. تحلیل دمائی با استفاده از نرم‌افزار مربوط به دوربین حرارتی به نام اسمارت ویو (SmartView) انجام شد<sup>[27]</sup>. از ترمومتر تماسی جهت اطمینان از کالیبره بودن دوربین حرارتی (فروسرخ) استفاده شد. به منظور به حداقل رساندن اثرات ضریب تابش از رنگ گواش سیاه مات جهت ایجاد پوشش روی سطح قطعه‌کار قبل از عملیات ماشین‌کاری استفاده شد. عملیات تراشکاری با استفاده از ابزار برشی کاربیدی بدون پوشش و بدون براده شکن ساخت شرکت سندویک (Sandvik) انجام شد. شعاع نوک ابزار ۰/۴ میلی‌متر بود. عدم وجود براده شکن در ابزار، امکان بررسی هندسه لبه برشی ابزار را با دقت بیشتری فراهم می‌کند<sup>[28]</sup>. هر آزمایش منحصراً با یک لبه ابزار انجام شد. پس از انجام عملیات ماشین‌کاری صافی سطح

جدول ۱) مشخصات فیزیکی سوپرآلیاژ واسپالوی<sup>[25]</sup>

مشخصات فیزیکی	دما (سانتیگراد)	مقدار	واحد
چگالی	۲۱	۸/۱۹	گرم بر سانتیمتر مکعب
محدوده ذوب	۱۳۳۰-۱۳۶۰	-	سانتیگراد
مدول الاستیسیته	۲۱	۲۱۱	گیگاپاسگال

جدول ۲) عناصر تشکیل دهنده سوپرآلیاژ واسپالوی<sup>[26]</sup>

عناصر تشکیل دهنده	درصد وزنی (حد بالا)	درصد وزنی (حد پایین)
Nickel	فلز پایه	فلز پایه
Chromium	۲۱/۰۰	۱۸/۰۰
Cobalt	۱۵/۰۰	۱۲/۰۰
Molybdenum	۵/۰۰	۳/۵۰
Aluminum	۱/۶۰	۱/۰۰
Titanium	۳/۲۵	۲/۶۰
Iron	۲/۰۰	---
Manganese	۱/۰۰	---
Silicon	۰/۷۵	---
Carbon	۰/۱۰	۰/۰۲
Boron	۰/۰۱	۰/۰۰۳
Zirconium	۰/۱۲	۰/۰۲
Copper	۰/۵۰	---
Sulfur	۰/۰۳۰	---



شکل ۱) چیدمان آزمایش‌های تجربی

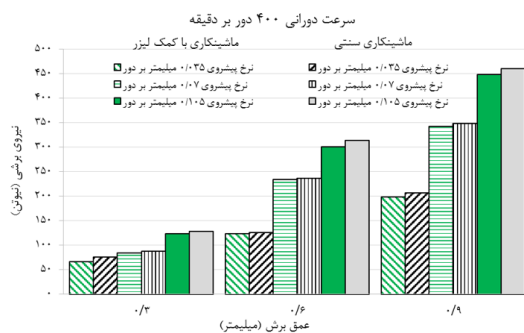
تمامی قطعات با استفاده از زبری سنج مدل Tr-200 اندازه‌گیری شد. شاخص Ra به عنوان معیار صافی سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. چیدمان آزمایش‌های تجربی در شکل ۱ نشان داده شده است.

## ۳- تراشکاری به کمک لیزر و تراشکاری سنتی

در این تحقیق برای بررسی نتایج حاصل از تراشکاری به کمک لیزر و تراشکاری سنتی، در شرایطی که سرعت دورانی ثابت بود از دو پارامتر متغیر شامل نرخ پیشروی و عمق برش و سه پارامتر ثابت

جدول ۳) پارامترهای تراشکاری به کمک لیزر و تراشکاری سنتی

سطوح	پارامترها		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	۴۰۰	--	--
نرخ پیشروی (میلی متر بر دور)	۰/۰۳۵	۰/۰۷	۰/۱۰۵
عمق برش (میلی متر)	۰/۳	۰/۶	۰/۹
توان لیزر (وات)	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
فاصله نقطه کانونی پرتو لیزر از سطح قطعه کار (میلی متر)	۱۲	۱۲	۱۲
فاصله زاویه ای محل برخورد پرتوی لیزر روی سطح قطعه کار با نوک ابزار (درجه)	۶۰	۶۰	۶۰



شکل ۲) مقایسه تاثیر مقادیر نرخ پیشروی و عمق برش مختلف بر نیروی برشی در تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر

کمترین مقدار نیروی برشی برای تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر به ترتیب ۷۶ و ۶۱ نیوتن در نرخ پیشروی ۰/۰۳۵ میلی متر بر دور و عمق برش ۰/۳ میلی متر مشاهده شد. همچنین، بیشترین مقدار نیروی برشی به ترتیب ۴۶۰ و ۴۴۸ نیوتن در نرخ پیشروی ۰/۱۰۵ میلی متر بر دور و عمق برش ۰/۹ میلی متر ثبت شد. در تمامی آزمایش‌ها، نیروی برش در تراشکاری به کمک لیزر کمتر از تراشکاری سنتی است. این کاهش نیرو می‌تواند به دلیل ایجاد حرارت موضعی و نرم شدن ماده قطعه کار در ناحیه برش باشد (شکل ۳) که باعث کاهش مقاومت ماده در برابر برش می‌شود.

با افزایش عمق برش، نیروی برشی در هر دو روش تراشکاری افزایش یافت. این افزایش در تراشکاری سنتی بیشتر از تراشکاری به کمک لیزر بود. به عنوان مثال، نیروی برش در تراشکاری سنتی در نرخ پیشروی ۰/۰۳۵ میلی متر بر دور با افزایش عمق برش از ۷۶ به ۲۰۷ نیوتن و در تراشکاری به کمک لیزر از ۶۱ به ۱۹۹ نیوتن افزایش یافت. افزایش نرخ پیشروی نیز منجر به افزایش نیروی برشی در هر دو روش تراشکاری شد. برای مثال، در عمق برش ۰/۶ میلی متر، نیروی برشی در تراشکاری سنتی از ۱۲۶ به ۳۱۴ نیوتن و در تراشکاری به کمک لیزر از ۱۲۴ به ۳۰۱ نیوتن افزایش یافت.

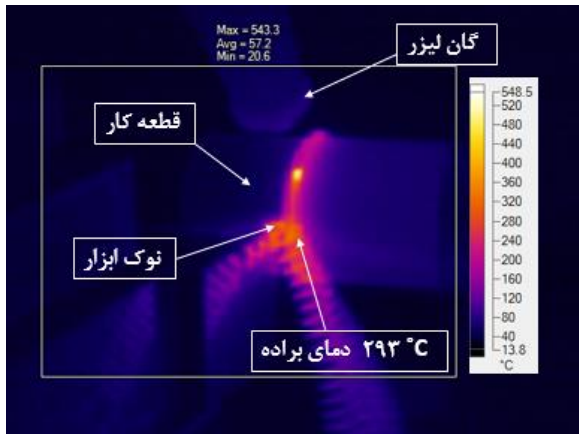
شامل توان لیزر، فاصله زاویه ای محل تماس پرتو لیزر روی سطح قطعه کار با نوک ابزار و فاصله محل برخورد پرتو لیزر روی سطح قطعه کار تا نقطه کانونی پرتو لیزر استفاده شد. تعداد ۹ آزمون با سه بار تکرار برای هر کدام (تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر) انجام شد. پارامترهای ماشین کاری سنتی بر اساس جنس قطعه کار، جنس ابزار و نوع عملیات ماشین کاری (عملیات پایانی) انتخاب گردید. همچنین به دلیل خواص ماده قطعه کار و رسیدن به بیشترین حرارت ایجاد شده توسط پرتو لیزر روی سطح قطعه کار، از حداکثر توان کاری تجهیز که معادل ۵۰۰ وات و فاصله زاویه ای ۶۰ درجه (شکل ۱) استفاده شد. جدول ۳ پارامترهای تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر را نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش شامل نیروی برش، تاثیر حرارت پرتو لیزر زیر سطح قطعه کار، دمای براده، زبری و تغییرات میکروسختی روی سطح قطعه کار ماشین کاری شده بود.

### ۳-۱- نیروهای ماشین کاری

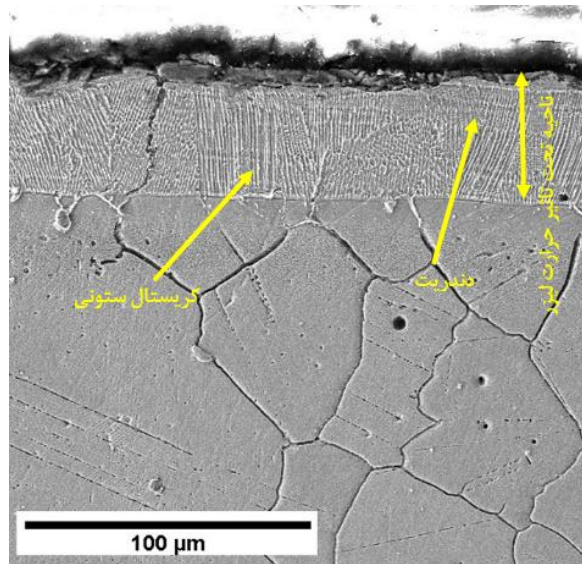
نیروهای ماشین کاری با استفاده از دینامومتر کیستلر اندازه گیری شد. شکل ۲ نتایج آزمایش‌های تجربی و تاثیر پارامترهای ماشین کاری شامل نرخ پیشروی و عمق برش بر نیروی برشی را در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر برای نرخ‌های پیشروی ۰/۰۳۵، ۰/۰۷ و ۰/۱۰۵ میلی متر بر دور و عمق‌های برش ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ میلی متر و مقایسه با تراشکاری سنتی نشان می‌دهد.

در هر دو روش با افزایش نرخ پیشروی، نیروی برشی افزایش می‌یابد که این افزایش ناشی از افزایش نرخ براده برداری به دلیل افزایش طول تماس ابزار و قطعه کار و اثر کرنش سختی بین ماده قطعه کار و ابزار برشی در زمان ماشین کاری است. همچنین با افزایش عمق برش، نیروی برشی افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل افزایش ضخامت براده تشکیل نشده و افزایش حجم براده تشکیل شده است.

در تراشکاری به کمک لیزر به دلیل نرم شدگی ماده قطعه کار بر اثر حرارت پرتو لیزر مقدار نیروی برش نسبت به تراشکاری سنتی کمتر می‌شود. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر حرارت پرتو لیزر در زیر سطح قطعه کار در سرعت دورانی ثابت (۴۰۰ دور بر دقیقه) و نرخ پیشروی متفاوت (۰/۰۳۵، ۰/۰۷ و ۰/۱۰۵ میلی متر بر دور) سطح قطعه کار توسط پرتو لیزر بدون اعمال عمق برش اسکن شد. شکل ۳ تاثیر حرارت پرتو لیزر در زیر سطح قطعه کار قبل از فرآیند تراشکاری را نشان می‌دهد. در شکل ۳-الف ملاحظه می‌شود بر اثر حرارت پرتو لیزر روی سطح قطعه کار ساختار کریستالی ستونی و دندریتی در زیر سطح تشکیل می‌شود که باعث کاهش سختی قطعه کار می‌گردد. در شکل ۳-ب با افزایش سرعت اسکن (سرعت پیشروی) به دلیل کاهش جذب انرژی حرارتی پرتو لیزر روی سطح قطعه کار ضخامت ناحیه تحت تاثیر کاهش می‌یابد.



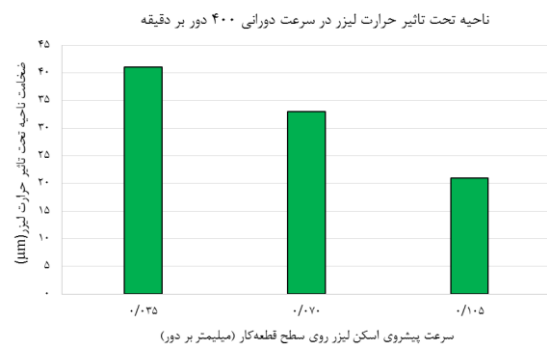
شکل ۴) تحلیل دما با استفاده از نرم افزار SmartView در سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۱۰۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۰/۶ میلی‌متر، توان لیزر ۵۰۰ وات و فاصله زاویه‌ای ۶۰ درجه



(الف)



شکل ۵) مقایسه تاثیر مقادیر متفاوت نرخ پیشروی و عمق برش بر دمای براده در تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر



(ب)

نسبت به تراشکاری سنتی افزایش یافت. با افزایش عمق برش به ۰/۶ میلی‌متر، این مقادیر به ترتیب به ۱۰۴، ۲۴ و ۲۶٪ رسید. زمانیکه عمق برش ۰/۹ میلی‌متر بود، دمای براده به ترتیب ۹۶، ۳۱ و ۳۱٪ افزایش یافت.

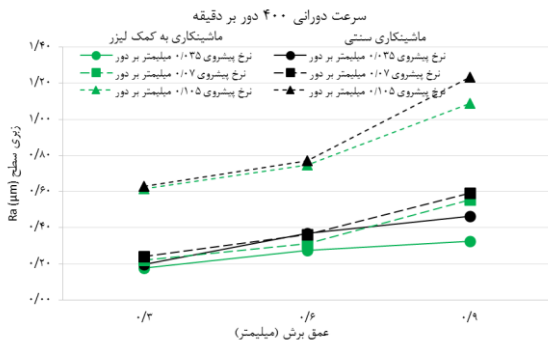
نتایج نشان داد که در هر دو روش تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر، اثر نرخ پیشروی کمتر از اثر عمق برش است. این موضوع به دلیل افزایش هم‌زمان نرخ پیشروی و عمق برش است که باعث ایجاد اصطکاک بیشتر بین ابزار و قطعه‌کار در ناحیه تماس ابزار و براده شده و نهایتاً باعث افزایش دما می‌شود. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش عمق برش، دمای براده افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش دما در شرایطی رخ داد که تمامی متغیرها در حالت بیشینه خود قرار داشتند. تغییرات دمای براده برای ماشین‌کاری سنتی در محدوده ۱۰۴ الی ۲۴۷ درجه سانتی‌گراد و برای ماشین‌کاری به کمک لیزر در محدوده ۱۸۹ تا ۳۲۴ درجه سانتی‌گراد ثبت شد.

شکل ۳) تاثیر حرارت لیزر روی سطح قطعه‌کار قبل از عملیات تراشکاری. الف) ناحیه تحت تاثیر حرارت لیزر، ب) ضخامت ناحیه تحت تاثیر لیزر در سرعت دورانی ثابت و نرخ پیشروی متفاوت

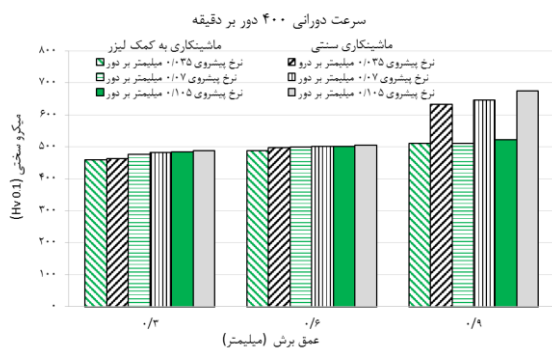
### ۳-۲- دمای ماشین‌کاری

در فرآیند تراشکاری، اندازه‌گیری و مقایسه دمای ماشین‌کاری معمولاً بر اساس حداکثر دمای ثبت شده بر روی صفحه براده‌ای ابزار صورت می‌گیرد [29]. در این پژوهش، به دلیل عدم دسترسی به ناحیه تماس ابزار و براده و ناحیه اولیه برش، دمای براده با استفاده از دوربین حرارتی فرورسرخ اندازه‌گیری شد. شکل ۴ تصویر ثبت شده توسط دوربین حرارتی از عملیات تراشکاری به کمک لیزر را نشان می‌دهد. این عملیات در شرایطی انجام شد که سرعت دورانی ۴۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۱۰۵ میلی‌متر بر دور، عمق برش ۰/۶ میلی‌متر، توان لیزر ۵۰۰ وات و فاصله زاویه‌ای ۶۰ درجه بود.

شکل ۵ مقایسه تغییرات دمای براده در تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر را نشان می‌دهد. در تراشکاری به کمک لیزر دمای براده در عمق برش ۰/۳ میلی‌متر در نرخ‌های پیشروی ۰/۰۳۵، ۰/۰۷ و ۰/۱۰۵ میلی‌متر بر دور به ترتیب ۸۱، ۹۰ و ۹۶٪



شکل ۶) مقایسه تاثیر مقادیر متفاوت نرخ پیشروی و عمق برش بر کیفیت زبری سطح قطعهکار در تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر



شکل ۷) مقایسه تاثیر مقادیر متفاوت نرخ پیشروی و عمق برش بر سختی سطح قطعهکار در تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر

میکروسختی از سطح ماشین کاری شده را در شرایطی نشان می دهد که سرعت دورانی ۴۰۰ و عمق برش و نرخ پیشروی متفاوت است. همان طور که ملاحظه می شود سختی روی سطح قطعه کار ماشین کاری شده بیشتر از سختی قبل از ماشین کاری است. دلیل این افزایش را می توان به واسطه افزایش نیروهای برشی و افزایش حجم براده تولید شده و کرنش سختی ایجاد شده دانست. در تراشکاری به کمک لیزر به دلیل کاهش نیروی برش و افزایش دما، سختی سطح قطعه کار کمتر از تراشکاری سنتی است. همچنین، در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر، یکنواختی سختی روی سطح قطعه کار بیشتر از تراشکاری سنتی است که تاثیر مستقیم در استحکام و عملکرد قطعه نهائی دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر پارامترهای تراشکاری شامل نرخ پیشروی و عمق برش بر نیروی برش، دمای براده، زبری سطح و تغییرات میکروسختی روی سطح قطعات ماشین کاری شده در تراشکاری به کمک لیزر و تراشکاری سنتی بر روی واسپالوی مقایسه و بررسی شد. همچنین به منظور رسیدن به سطحی مطلوب ضخامت ناحیه تحت تاثیر حرارت پرتو لیزر در زیر سطح بررسی شد. نتایج نشان داد تاثیر استفاده از لیزر به عنوان یک منبع حرارتی متمرکز تاثیرات

#### ۳-۳- زبری سطح

زبری سطح قطعات ماشین کاری شده توسط دستگاه زبری سنج مدل TR-200 انجام شد. از ۳ ناحیه مختلف روی سطح ماشین کاری شده آزمایش زبری سنجی گرفته شد [30]. هر آزمایش شامل پنج سیکل و هر سیکل ۲/۵ میلی متر بود.  $R_a$  به عنوان شاخص ارزیابی زبری سطح مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۶ مقایسه تغییرات میانگین زبری سطح در سرعت دورانی ثابت، نرخ پیشروی و عمق برش متفاوت در تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر را نشان می دهد. در هر دو فرآیند، با افزایش نرخ پیشروی و عمق برش، کیفیت زبری سطح کاهش یافت. در شرایطی که نرخ پیشروی ۰/۳۵ میلی متر بر دور و عمق برش ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ میلی متر بود، کیفیت زبری سطح در ماشین کاری به کمک لیزر به ترتیب به میزان ۱۲، ۳۶ و ۴۲٪ نسبت به ماشین کاری سنتی بهبود یافت. در نرخ پیشروی ۰/۰۷ میلی متر بر دور، این مقادیر به ترتیب ۱۱، ۱۷ و ۷٪ بود. با افزایش نرخ پیشروی به ۰/۱۰۵ میلی متر بر دور، کیفیت زبری سطح در ماشین کاری به کمک لیزر نسبت به ماشین کاری سنتی به ترتیب ۲، ۳ و ۱۳٪ افزایش یافت. با توجه به نتایج بدست آمده می توان گفت در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر به دلیل افزایش دمای ماشین کاری و کاهش استحکام ماده قطعه کار و کاهش نیروی برش از سایش ابزار کاسته می شود که این امر باعث افزایش کیفیت سطح می گردد.

#### ۳-۴- تغییرات میکروسختی روی سطح قطعه کار

در فرآیند تراشکاری، ترکیب کرنش های بالا، نرخ کرنش و دما باعث تغییرات ریزساختاری در زیر سطح قطعه کار شده و در نتیجه سختی قطعه کار تغییر می کند [31]. در واسپالوی بارهای ترمومکانیکی ناشی از فرآیند برش سبب پدیده های متالورژیکی مانند تغییر شکل دانه ها، تغییر در چگالی جابجایی و منطقه تجمع آنها، تبلور مجدد دینامیکی که خود باعث تشکیل ریزساختارهای جدید می شود و همچنین تغییرات فاز را به همراه دارد. به طور معمول، لایه آسیب دیده دارای ازدیاد طول دانه در جهت برش، تشکیل لایه سفید و تبلور مجدد دینامیکی است. در شرایط ماشین کاری برخی از دانه ها شروع به تبلور مجدد می کنند، که منجر به تقویت و سخت شدن ماده قطعه کار می شود [4]. در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر حرارتی که توسط پرتو لیزر روی سطح قطعه کار ایجاد می شود باعث تغییر دمای ماشین کاری می گردد. سختی روی سطح قطعه کار ماشین کاری شده به واسطه افزایش دما، تغییر در نیروهای برشی و افزایش حجم براده تولید شده و کرنش سختی، تغییر می کند. در این تحقیق با استفاده از دستگاه میکروسختی سنجی ساخت شرکت کوپا، عملیات میکروسختی ویکرز با اعمال ۱۰۰ گرم نیرو انجام شد. از سه ناحیه مختلف روی سطح ماشین کاری شده آزمایش میکروسختی انجام شد. شکل ۷ مقایسه میانگین اندازه

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف) بابت همکاری در انجام آزمایش‌ها به عمل می‌آورند.

**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان این تحقیق اقرار می‌نمایند که تمامی نتایج مندرج در این مقاله حاصل تحقیق صورت گرفته توسط ایشان و نتایج به دست آمده از آن می‌باشد.

**منابع مالی:** کلیه هزینه‌ای انجام شده جهت انجام این تحقیق از منابع شخصی صورت گرفته است.

**تعارض منافع:** در این مقاله هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

### منابع

- 1- You K, Yan G, Luo X, Gilchrist MD, Fang F. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Oct 1;58:677-92.
- 2- Del Prete A, de Vitis AA, Filice L, Caruso S, Umbrello D. Tool engage investigation in nickel superalloy turning operations. *Key Engineering Materials*. 2012 Apr 4;504:1305-10.
- 3- Bharat N, Bose PS. An overview on machinability of hard to cut materials using laser assisted machining. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;43:665-72.
- 4- Imbrogno S, Rinaldi S, Umbrello D, Filice L, Franchi R, Del Prete A. A physically based constitutive model for predicting the surface integrity in machining of Waspaloy. *Materials & Design*. 2018 Aug 15;152:140-55.
- 5- Olovsjö S, Nyborg L. Influence of microstructure on wear behaviour of uncoated WC tools in turning of Alloy 718 and Waspaloy. *Wear*. 2012 Apr 5;282:12-21.
- 6- Schaffer JP, Saxena A, Antolovich SD, Sanders TH, Warner SB. *The science and design of engineering materials*. Chicago: Irwin; 1995.
- 7- Del Prete A, Primo T, Franchi R. Super-nickel orthogonal turning operations optimization. *Procedia CIRP*. 2013 Jan 1;8:164-9.
- 8- Venkatesan K, Ramanujam R, Kuppan PJ. Laser assisted machining of difficult to cut materials: research opportunities and future directions-a comprehensive review. *Procedia Engineering*. 2014 Jan 1;97:1626-36.
- 9- Zhang J, Zheng Z, Huang K, Lin C, Huang W, Chen X, Xiao J, Xu J. Field-assisted machining of difficult-to-machine materials. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2024 Mar 8;6(3):032002.
- 10- Anderson M, Patwa R, Shin YC. Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006 Nov 1;46(14):1879-91.
- 11- Tavakoli Manshadi S. Laser assisted machining of inconel 718 superalloy.
- 12- Chrystolouris G, Anifantis N, Karagiannis S. Laser assisted machining: an overview.
- 13- Rahman Rashid RA, Sun S, Palanisamy S, Wang G, Dargusch MS. A study on laser assisted machining of Ti10V2Fe3Al alloy with varying laser power. The

مطلوبی در عملکرد فرآیند تراشکاری واسپالوی ایجاد کرد و نتایج زیر حاصل شد.

- ضخامت لایه تحت تاثیر حرارت پرتو لیزر کمتر از مقدار کمینه عمق برش بود. می‌توان گفت دلیل کاهش استحکام ماده قطعه‌کار ایجاد کریستال ستونی و فاز دندربیتی در ناحیه تحت تاثیر حرارت پرتو لیزر بود. با افزایش سرعت اسکن (نرخ پیشروی) ضخامت لایه تحت تاثیر حرارت پرتو لیزر کاهش یافت.

- نیروی برش در تراشکاری به کمک لیزر نسبت به تراشکاری سنتی کاهش یافت. کاهش نیروی برش به دلیل گرمای موضعی ایجاد شده توسط پرتو لیزر، نرم شدگی در سطح قطعه‌کار و کاهش استحکام ماده قطعه‌کار بود. بیشترین تغییرات نیروی برش در تراشکاری به کمک لیزر نسبت به تراشکاری سنتی مقدار ۱۶٪ در نرخ پیشروی ۰/۰۳۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۰/۳ میلی‌متر مشاهده شد.

- در تراشکاری به کمک لیزر دمای براده نسبت به تراشکاری سنتی افزایش یافت. بیشترین افزایش دمای براده در تراشکاری به کمک لیزر نسبت به تراشکاری سنتی مقدار ۱۰۴٪ در نرخ پیشروی ۰/۰۳۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۰/۶ میلی‌متر بود.

- کیفیت زبری سطح در تراشکاری به کمک لیزر به طور قابل توجهی بهبود یافت. بیشترین تغییرات بهبود کیفیت زبری سطح در تراشکاری به کمک لیزر نسبت به تراشکاری سنتی مقدار ۴۲٪ در عمق برش ۰/۹ میلی‌متر و نرخ پیشروی ۰/۰۳۵ میلی‌متر بر دور بود.

- در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر با تغییر در مقادیر نرخ پیشروی و عمق برش سختی یکنواخت‌تری روی سطح قطعه‌کار نسبت به تراشکاری سنتی مشاهده شد. همچنین در تراشکاری سنتی، به دلیل افزایش نیروی برش و کاهش دما در ناحیه برش سختی سطح قطعه‌کار بیشتر از تراشکاری به کمک لیزر بود. در تراشکاری سنتی تاثیر عمق برش در سختی بیشتر از نرخ پیشروی بود. بیشترین تغییرات سختی در تراشکاری سنتی نسبت به تراشکاری به کمک لیزر ۲۹٪ در عمق برش ۰/۹ میلی‌متر و نرخ پیشروی ۰/۱۰۵ میلی‌متر بر دور مشاهده شد.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این پژوهش بدینوسیله کمال تشکر و سپاسگزاری خود را از جناب آقای مهندس علی‌دادی مدیر عامل محترم شرکت دانش بنیان مهندسی ارتعاشات نوآوران پایش جهت در اختیار قرار دادن دوربین حرارتی، جناب آقای مهندس اکبری مدیر عامل محترم شرکت دانش بنیان المان صنعت سیستم بابت انجام عملیات حرارتی سوپرآلیاژ وسپالوی، جناب آقای مهندس بیات (دانشجوی مقطع دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف)، جناب آقای مهندس صفری (دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف) و جناب آقای مهندس اعظمی (مسئول کارگاه ماشین‌کاری



- 29- Davies MA, Cooke AL, Larsen ER. High bandwidth thermal microscopy of machining AISI 1045 steel. *CIRP Annals*. 2005 Jan 1;54(1):63-6.
- 30- Jafarian F, Amirabadi H, Fattahi M. Improving surface integrity in finish machining of Inconel 718 alloy using intelligent systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014 Mar;71:817-27.
- 31- Jawahir IS, Brinksmeier E, M'saoubi R, Aspinwall DK, Outeiro JC, Meyer D, Umbrello D, Jayal AD. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals*. 2011 Jan 1;60(2):603-26.
- International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014 Sep;74:219-24.
- 14- Devillez A, Schneider F, Dominiak S, Dudzinski D, Larrouquere D. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. *Wear*. 2007 Mar 15;262(7-8):931-42.
- 15- Motorcu AR, Kuş A, Durgun I. The evaluation of the effects of control factors on surface roughness in the drilling of Waspaloy superalloy. *Measurement*. 2014 Dec 1;58:394-408.
- 16- Xu D, Liao Z, Axinte D, Sarasua JA, M'Saoubi R, Wretland A. Investigation of surface integrity in laser-assisted machining of nickel based superalloy. *Materials & Design*. 2020 Sep 1;194:108851.
- 17- Germain G, Lebrun JL, Braham-Bouchnak T, Bellett D, Auger S. Laser-assisted machining of Inconel 718 with carbide and ceramic inserts. *International Journal of Material Forming*. 2008 Apr;1:523-6.
- 18- Attia H, Tavakoli S, Vargas R, Thomson V. Laser-assisted high-speed finish turning of superalloy Inconel 718 under dry conditions. *CIRP Annals*. 2010 Jan 1;59(1):83-8.
- 19- Ding H, Shin YC. Improvement of machinability of Waspaloy via laser-assisted machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013 Jan;64:475-86.
- 20- Venkatesan K, Ramanujam R, Kuppan P. Parametric modeling and optimization of laser scanning parameters during laser assisted machining of Inconel 718. *Optics & Laser Technology*. 2016 Apr 1;78:10-8.
- 21- Venkatesan K. The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of inconel 718 using Nd: YAG laser source. *Journal of Advanced Research*. 2017 Jul 1;8(4):407-23.
- 22- Tadavani SA, Razavi RS, Vafaei R. Pulsed laser-assisted machining of Inconel 718 superalloy. *Optics & Laser Technology*. 2017 Jan 1;87:72-8.
- 23- Sharifi Z, Shoja-Razavi R, Vafaei R, Hashemi SH. Nd: YAG pulsed laser assisted machining of AMS 5708 Waspaloy alloy. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2018 Mar;5:16-30.
- 24- S. International, "SAE International, Aerospace Material Specification AMS 5708L, 2015.," in. ed, 2015.
- 25- Umbrello D, Filice L, Rizzuti S, Micari F. On the evaluation of the global heat transfer coefficient in cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007 Sep 1;47(11):1738-43.
- 26- Ezugwu EO, Wang ZM, Machado AR. The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999 Feb 15;86(1-3):1-6.
- 27- Paramasivam B. Investigation on the effects of damping over the temperature distribution on internal turning bar using Infrared fusion thermal imager analysis via SmartView software. *Measurement*. 2020 Oct 1;162:107938.
- 28- Polvorosa R, Suárez A, de Lacalle LL, Cerrillo I, Wretland A, Veiga F. Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: Comparison of Alloy 718 and Waspaloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017 Apr 1;26:44-56.