

# Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(6) (2022) 271-274 DOI: 10.22060/mej.2022.20462.7234

# Experimental Study and Finite Element Simulation of Cutting Tool Temperature in Laser Assisted Machining

S. M. Nikouei, M. R. Razfar, M. Khajehzadeh\*

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: The present paper has been dedicated to finite element simulation and experimental study of cutting tool temperature during laser-assisted machining. To achieve this objective, a finite element model of the processes has been developed for Inconel 718 super alloy and the results have been verified by experimental measurements of cutting forces and cutting tool temperature. In this regard, first of all, a finite element model of the laser-assisted turning process was developed and then an experimental setup was designed and manufactured. Finally, a series of experimental tests were arranged to achieve a proper range of process parameters and also to measure cutting forces and cutting tool temperatures during the machining process. Experimental results were then used to verify the results of the finite element model. Using the developed model, the effect of laser source power, cutting speed, and feed on cutting tool temperature were studied. According to the achieved results, using a laser heat source, in the range without microstructural effects, will lead to a 25% reduction in the average main component of cutting force and an 80% reduction in the average maximum temperature of the cutting tool in comparison to conventional turning.

# **Review History:**

Received: Aug. 24, 2021 Revised: Jan. 09, 2022 Accepted: Feb. 19, 2022 Available Online: Mar. 05, 2022

### **Keywords:**

Laser assisted machining Cutting temperatures Finite element simulation Continuous wave laser

# **1-Introduction**

Laser assisted machining is a process that uses a laser source, Fig. 1, to increase workpiece local temperature and thereby decrease the strength of the material which is to be removed; therefore lower values of cutting forces and cutting temperatures are expected [1].

According to the previous studies [1-2], thermomechanical aspects of the workpiece have been widely studied by numerical and experimental techniques, but limited works have considered theoretical and experimental aspects of cutting tool temperature in laser-assisted machining processes. Therefore, in this research work, a finite element model has been developed to study the effects of laser power, cutting speed, and feed on cutting tool temperature in Laser-Assisted Machining (LAM) of Inconel 718.

# 2- Methodology

In this research, using Deform 3D, a coupled thermomechanical finite element model has been developed to study cutting tool temperature, Fig. 2.

Because in the LAM process, the laser beam is focused on the workpiece, it can be assumed that due to the laser heat flux entering the workpiece, the upper surface of the workpiece is preheated and is affected by a constant temperature  $(T_{Laser})$ ,

so according to the mathematical formulation introduced in Kashani et al. [2], to determine the temperature of different points on the workpiece being exposed to laser radiation, in proportion to the coexistence of laser power, cutting speed and feed, the surface temperature of the un-deformed chip is calculated and is considered as the boundary condition



Fig. 1. Experimental setup of laser assisted machining.

\*Corresponding author's email: mo.khajehzadeh@aut.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 2. Applying boundary conditions and laser heat source on the workpiece in the finite element model.

Table 1. Physica	properties of Inconel 7	18	[3]	
------------------	-------------------------	----	-----	--

Elastic Module	Tensile Strength	Density
GPa	MPa	kg/m <sup>3</sup>
177	655	8220
Specific Heat	Melting Point	Poison ratio
520 J/kgK	1593 K	0.273

#### Table 2. Johson-Cook constants for Inconel 718 [3].

0.5189 1.2861 0.0085 699 1108	п	т	С	B (MPa)	A (MPa)
	0.5189	1.2861	0.0085	699	1108

governing the surface of the workpiece in the Finite Element Model (FEM) model according to Fig. 2.

In order to validate the finite element model, the cutting tool temperature in the experimental and simulation modes is compared; for this purpose, a specific point with coordinates (0.97, 4.3) mm is considered on the cutting tool rake face and the thermocouple is embedded at the mentioned point and the



Fig. 3. FEM and Experimental Results on the effect of laser power and feed on Main Cutting Force (Vc=1.86 m/s).

time history of temperature at this point is compared using the experimental method and finite element model.

In this research, Inconel 718 superalloy has been selected as workpiece material, Table 1; the elastic-plastic behavior of this material can be described by the Johnson-Cook model. Therefore, Johnson-Cook parameters including A, B, C, m, and n are gathered in Table 2.

# **3- Results and Discussion**

## 3-1-Main cutting force

As shown in Fig. 3, the use of 350 and 500W laser powers have respectively reduced the cutting forces by 11.5 and 23%



Fig. 3. FEM and Experimental Results on the effect of laser power and feed on Main Cutting Force (Vc=1.86 m/s).

compared to conventional turning. This decrease is justified by the decrease in material flow stress with increasing temperature.

# 3-2-Cutting tool temperature

As a general trend, with increasing laser power, the cutting tool temperature decreases; this decrease is justified by the decrease in material flow stress with increasing temperature and finally decreasing temperature in the primary cutting zone. Therefore, the cutting tool temperature decreases due to the lower amount of heat generation in cutting zones, Fig. 4.

# **4-** Conclusion

The following conclusions can be achieved:

1. A finite element model of the laser-assisted machining process was developed and there is a good agreement between experimental results and the finite element model.

2. By increasing laser power, the main component of



Fig. 3. FEM and Experimental Results on the effect of laser power and feed on Main Cutting Force (Vc=1.86 m/s).

cutting force decreases.

3. By increasing laser power, the cutting tool temperature decreases.

# References

- P.A. Rebro, Y.C. Shin, F.P. Incropera, Design of operating conditions for crackfree laser-assisted machining of mullite, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(7-8), (2004) 677-694.
- [2] M.M. Kashani, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian, R.S. Razavi, Analytical prediction of the temperature field in laser assisted machining, Procedia CIRP, 46 (2016) 575-578.
- [3] H.K. Farahani, M. Ketabchi, S. Zangeneh, Determination of Johnson–Cook plasticity model parameters for Inconel718, Journal of Materials Engineering and Performance, 26(11) (2017) 5284-5293.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. M. Nikouei, M. R. Razfar, M. Khajehzadeh, Experimental Study and Finite Element Simulation of Cutting Tool Temperature in Laser Assisted Machining, Amirkabir J. Mech Eng., 54(6) (2022) 271-274.

DOI: 10.22060/mej.2022.20462.7234



This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۶ سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۳۴۱ تا ۱۳۵۶ DOI: 10.22060/mej.2022.20462.7234

# مطالعه تجربی و شبیهسازی المان محدود توزیع درجه حرارت در ابزار برش در فرایند ماشینکاری به کمک لیزر

سيد محمد نيكوئي، محمدرضا رازفر، محسن خواجهزاده\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

**تاریخچه داوری:** دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰ ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

**کلمات کلیدی:** ماشینکاری بهکمک لیزر درجه حرارت برش المان محدود لیزر پیوسته

**خلاصه:** پژوهش حاضر به بررسی تجربی و شبیه سازی المان محدود توزیع درجه حرارت ابزار برش در فرایند ماشینکاری به کمک لیزر اختصاص یافته است. رویه در نظر گرفته شده مشتمل بر ایجاد یک مدل المان محدود و صحهگذاری نتایج آن با آزمونهای تجربی اندازه گیری نیرو و درجه حرارت برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ است. در این ارتباط، در مرحله نخست شبیه سازی فرایند تراشکاری به کمک لیزر مورد مطالعه قرار گرفت. سپس طراحی و ساخت تجهیزات لازم برای انجام فرایند تراشکاری به کمک لیزر انجام شد و در نهایت مجموعهای از آزمایش های تجربی با هدف اندازه گیری نیرو و درجه حرارت صورت گرفت و محدودهای مناسب برای پارامترها، استخراج گردید. در ادامه از نتایج بدست آمده به منظور صحهگذاری نتایج شبیه سازی استفاده شد. تأثیر توان لیزر، سرعت برش و پیشروی بر توزیع درجه حرارت در ابزار برش مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مدل المان محدود با نتایج تجربی صحه سنجی شد. بر ماس نتایج حاصل، استفاده از لیزر پیوسته در محدودهای که منجر به تغییر ساختار کریستالی نشود، ضمن کاهش ۲۵ در مر مولفهی نیروی اصلی برش، کاهش دمای ابزار برشی را به دنبال داشت. متوسط درجهی حرارت ابزار در تراشکاری به کمک لیزر سرعت برش و مولفهی نیروی اصلی در تراشکاری سنتی است.

# ۱ – مقدمه

عمل برش فلزات حاصل حرکت نسبی بین ابزار برش و قطعه کار است که در نتیجه یآن مقداری از فلز، به عمق برش و به شکل براده از قطعه کار جدا می شود. در ماشینکاری، حرارت زیادی در سطح مشترک ابزار و براده ایجاد می شود. تغییر شکل در ناحیه ی بسیار کوچکی اتفاق افتاده و حرارت تولید شده، هم ابزار و هم قطعه کار را تحت تأثیر قرار می دهد. افزایش دما می تواند روی فرسایش و عمر ابزار، سلامت سطحی و دقت ابعادی قطعه کار اثرگذار باشد. از طرف دیگر اندازه گیری و پیش بینی دما به خاطر نازک بودن صفحه ی برش، مانع شدن براده و ماهیت شرایط تماسی آن (که در آن دو جسم با هم در تماس بوده و یکی از آن ها متحرک است)، بسیار سخت و پیچیده است.

در حال حاضر پیش بینی درجه حرارت فرایندهای ماشینکاری، به خاطر تأثیری که بر فرسایش ابزار و محدودیتهای بهرهوری سامانه ماشینکاری دارد، به موضوعی با اهمیت تبدیل شده است. به عنوان نمونه نرخ فرسایش

ابزار بهشدت به درجهی حرارت سطح تماس براده و ابزار بستگی دارد از اینرو درجه حرارت، پس از چَتر، یکی از ملاحظات اساسی بوده و احتمالاً مهمترین محدودیت در انتخاب پارامترهای ماشینکاری نظیر سرعت برش و پیشروی در ماشینکاری بعضی از مواد از قبیل تیتانیوم و آلیاژهای پایه نیکل از قبیل اینکونل ۲۱۸ به حساب میآید. در این مواد به خاطر هدایت حرارتی کم، قسمت عمدهای از حرارت تولید شده در حین فرآیند ماشینکاری به ابزار برشی جریان یافته و بنابراین علاوه بر تنشهای مکانیکی، ابزارهای برشی متحمل تنشهای حرارتی قابلتوجهی نیز خواهند شد [۱].

تنشهای حرارتی سبب تسریع در خستگی و فرسایش ابزار میشوند. علاوه بر آن، چنانچه درجه حرارت ابزار از یک حد معین بیش تر شود، ابزار به خاطر فقدان نیروی اتصال کافی بین بلورههای ساختار آن، بهسرعت دچار فرسایش میشود [۲].

در کاربردهای مرسوم مواد صنعتی، افزایش دمای قطعه کار سبب کاهش تنش تسلیم شده لذا، ماشینکاری به کمک منبع حرارتی یکی از راهکارهای ماشینکاری مواد سخت است. در این روش پس از این که قطعه کار به کمک

\* نویسنده عهدهدار مکاتبات: mo.khajehzadeh@aut.ac.ir

منبع حرارتی گرم می شود، بالطبع با نرم شدن قطعه کار، تنش تسلیم ماده و سختی آن کاهش می یابد و منجر به برش راحت تر ماده و کاهش نیروهای ماشینکاری و بهبود شرایط ماشینکاری خواهد شد [۳].

یکی از راهکارهای ماشینکاری قطعات سخت، استفاده از حرارت در فرآیند ماشینکاری است. لیزر و پلاسما بهعنوان منبع حرارتی برای ماشینکاری به کمک حرارت به کار میروند. لیزر ویژگیهای مناسب تری نظیر تمرکز انرژی بالا برای نقطهای به قطر کمتر از سه میلیمتر و کنترل پذیری قابل توجه دارد [۴].

رُزی و همکاران ( [۵] برای اولین بار ضمن ارائهی مدلی سهبعدی عددی برای تراشکاری به کمک لیزر توانستند اثر حرارتی لیزر بر روی قطعه کار را به صورت عددی و تجربی رفتارشناسی نمایند و اثر پارامترهایی نظیر توان لیزر، گپ بین کلگی لیزر و قطعه کار و سرعت انتقالی بین لیزر و قطعه کار و عمق برشی بر روی میدان حرارتی ایجادشده بر روی قطعه کار را به صورت گذرا و متغیر بازمان بررسی نمایند و میزان اثرگذاری هریک از این پارامترها بر روی میدان دمایی قطعه کار را به صورت مجزا بررسی کنند. آن ها در این یژوهش دریافتند که ماکزیمم دمای قطعه کار متأثر از اشعهی لیزر در محل اندازه گیری با افزایش سرعت دورانی قطعه کار به دلیل افزایش امکان انتقال حرارت همرفت افزایش می یابد. میزان جذب انرژی براده تغییر شکل نیافته با کاهش توان لیزر کاهش می یابد و از سوی دیگر کاهش فاصله گپ بین لیزر و قطعه کار یا افزایش سرعت انتقالی بین قطعه کار و کلگی لیزر منجر به کاهش دمای برادهی تغییرشکل نیافته می شود. شار حرارتی ماکزیمم لیزر و به دنبال آن دمای سطح قطعه کار با افزایش شعاع اشعه یلیزر، کاهش مى يابد. افزايش عمق برش اثر قابل ملاحظه اى بر روى توزيع دمايي محل درگیری ابزار و قطعه کار در این فرآیند نداشته است.

به دلیل تنظیم نادرست پارامترهای ابزار و ماشینکاری، معمولاً اتلاف هزینه سبب عدم بهینه بودن فرآیند ماشینکاری می شود. حال با ورود منبع حرارتی متمرکز، انتخاب نامناسب پارامترهای تأثیرگذار بر منبع حرارتی، علاوه بر اتلاف هزینه، احتمالاً منجر به بروز آسیب در ساختارهای بلورهای خواهد شد و اساس فرآیند را به زیر سؤال می برد. برای تنظیم تجربی پارامترهای منبع حرارتی متمرکز معمولاً مجموعهای از فرایندهای سعی و خطا برای رسیدن به مقادیر مطلوب پارامترهایی از قبیل توان لیزر، شعاع مناسب محل اثر منبع حرارتی و محل قرارگیری آن به منظور رسیدن به نقطهی نرم شدگی مطلوب مادهی مورداستفاده مورد نیاز است. ربرا و همکاران<sup>۲</sup> [۶] در پژوهشی

عددی و تجربی به بررسی اثر استفاده از لیزر در تراشکاری قطعه کار سرامیکی مولیتی<sup>۳</sup> پرداختند، آنها به دنبال این بودند اثر لیزر را با استفاده از شبیهسازی عددی در آزمونهای تجربی به نحوی پیاده کنند که هیچگونه ترکی در ماشینکاری قطعه کار مولیتی رخ ندهد و در نهایت با توسعه مدل عددی و اعمال بازه یپارامترهای آن در آزمونهای تجربی، محدوده توان لیزر پیوسته بین ۱۷۰ تا ۱۹۰ وات، شرایطی را برای آزمون آنها ایجاد کرد که علاوه بر تأمین عدم آسیب به قطعه کار، ماشینکاری بدون ترک قطعه کار با کم ترین میزان سایش ابزار محقق شد.

سامانتا و همکاران<sup>۴</sup> [۲] در پژوهشی به بررسی تجربی و المان محدود تنش پسماند در فرآیند میکرو ماشینکاری به کمک لیزر بر روی اینکونل ۶۲۵ پرداختند. آنها در این مطالعه، ضمن ارائهی روشی جدید در نرمافزار دیفرم سهبعدی، اثر حرارتی لیزر بر روی قطعه کار را مدلسازی المان محدود کردند. در این پژوهش استفاده از لیزر ضمن کاهش ۲۵ درصدی نیروی برشی، تنش پسماند فشاری حاکم بر سطح قطعه کار را به میزان ۵۰ درصد نسبت به حالت سنتی را موجب شده بود.

کاشانی و همکاران<sup>4</sup> [۸] بهمنظور حصول مدلی تمام تحلیلی قطعهی کار متأثر از لیزر در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر بهنحوی که بتوان رفتار حرارتی لایههای زیرین سطح قطعه کار را نیز دنبال کرد، پژوهشی را انجام داده و نهایتاً با بررسی اثر پارامترهای برشی و پارامترهای لیزر از قبیل هندسه نوک کلگی لیزر و ضریب جذب آن، تطابق مطالعات تحلیلی خود با نتایج تجربی را مورد بررسی قرار دادند. با مدل توسعه یافته در این پژوهش میتوان دمای نقاط روی سطح قطعه ی کار و نقاط داخلی قطعه کار متأثر از تشعشع تفنگ لیزر را به دست آورد. در این مطالعه با بهره گیری از مدل المان محدود مناسب، نتایج شبیه سازی المان محدود و آزمون های تجربی به صورت میانگین تطابق ۹۰ درصدی داشته اند.

کُسِلوریس و همکاران <sup>۶</sup>[۹] در مطالعهای مبتنی بر مدلسازی المان محدود، به بررسی اثر پارامتر توان لیزر بر روی نیروی برش در فرآیند تراشکاری قطعه فولادی اِچ ۱۳ پرداختهاند. نهایتاً پژوهش آنها گویای این مورد است که با به کارگیری لیزر پیوسته، حداکثر کاهش ۱۵ درصدی در نیروی برش رخ خواهد داد و از این طریق شرایط ماشینکاری قطعهی فولادی اِچ ۱۳بهبود پیدا می کند.

<sup>1</sup> Rozzi et al.

<sup>2</sup> Rebro et al.

<sup>3</sup> Mullite

<sup>4</sup> Samanta et al.

<sup>5</sup> Kashani et al.

<sup>6</sup> Kaselouris et al.

کاشانی و همکاران [۱۰] در پژوهشی تجربی دیگر به منظور تخمین دقیق ضریب جذب سطحی اشعهی لیزر بر روی قطعه کار فولاد ۳۰۴ در حال تراشکاری، فرآیند ماشینکاری به کمک لیزر را مورد بررسی قرار دادهاند. در این پژوهش مشخص شده است که پارامترهای ماشینکاری یعنی پیشروی و سرعت برشی بر روی ضریب جذب اثرگذار هستند. بنابراین در هنگام گزارش ضریب جذب باید اطلاعات سینماتیک فرآیند و همچنین اطلاعات مربوط به مواد، وضعیت سطح، طول موج لیزر و زاویهی تابش نیز بیان شوند. کاربرد این پژوهش زمانی اهمیت مییابد که برای مطالعهی حرارتی رفتار قطعه کار متأثر از اشعهی لیزر، اثر انتقال حرارتی تشعشعی نیز مورد تاکید قرار می گیرد.

داشتن درک روشنی از رفتار حرارتی قطعهی کاری که تحت تابش ليزر قرار گرفته برای توسعهی اصول سیستماتیک تعیین سطوح لازم پیش گرمایش حائر اهمیت است و متغیرهای برش در ماشین کاری به کمک لیزر را بهینه میکند. برای دستیابی به این هدف، بخاطر محدودیتهای ابزاری و روشهای اندازه گیری غیرتهاجمی، روشهای آزمایشی عمدتاً غیر عملی هستند. در مقابل، روشهای عددی گزینههای تحلیلی دقیق، منعطف و مقرون به صرفهای هستند که میتوانند درک خوبی نسبت به اثر حرارتی گذرای پیش گرمایش لیزر در قطعهی چرخان را دهد. برای همین منظور، ندیم و همکاران ([۱۱] به شبیه سازی و بررسی تحلیلی پیش گرمایش و رفتار حرارتی یک قطعهی استوانهای چرخان در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر پرداختهاند. به منظور پوشش محدودیتهای تحلیلی قبلی، مدل این پژوهش فرآیندهای حرارتی پیچیده مرتبط به جذب گرما در ناحیه برخورد لیزر، توزیع حرارتی در قطعهی کار و خنک شدن سطح استوانه بخاطر چرخش را نیز در نظر گرفته شده است. در این پژوهش یک شبیه سازی عددی مبتنی بر حجم محدود انجام شده که رفتار حرارتی ناشی از پیش گرمایش لیزر در سطح یک استوانهی چرخان را بررسی و تحلیل میکند. این مدل از نظر دقت بالای پیشبینی اعتبار سنجی شده و میتواند در شرایط عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان یک نتیجهی مهم، این مدل شبیهسازی دادههایی را برای تعیین قدرت و سرعت انتشار لیزر، سرعت دوران قطعه کار و مواد ماشین کاری جهت دستیابی به توزیع حرارتی مناسب، در اختیار قرار میدهد. با انجام تحلیلهای پارامتری کامل و دادههای حاصله، یک پیش بینی کنندهی پارامتری پیش گرمایش در این فرآیند به دست آمد.

روستایی و همکاران [۱۲] تأثیر گرمایش لیزر در فرآیند تراشکاری

به کمک لیزر روی سرامیک سیلیس ریخته گری شده<sup>۳</sup> را با انجام تحلیل عددی و بصورت تجربی بررسی کردهاند. یک تحلیل انتقال حرارت گذرای سه بعدی ناشی از گرمایش لیزر با استفاده از روش المان محدود انجام گرفته و توزیع دما در قطعات استوانهای بدست آمده و در نرمافزار آباکوس شبیه سازی شده است. همپوشانی پالس، یک پارامتر مهم بوده که خواص سطحی که پالسهای لیزر به آن برخورد میکند را تحت تأثیر قرار میدهد. بنابراین، تأثیر همپوشانی پرتوی لیزر در توزیع دما و جذبپذیری قطعهی کار سیلیس ریخته گری شده بررسی شده که این بررسی و فرمول بندی آن برای نخستین بار انجام گرفته است. در این پژوهش بهترین شرایط عملیاتی برای تراشکاری به کمک لیزر زمانی حاصل می شود که نرخ پارامترهای همپوشانی و توان لیزر بالاترین حد خود را داشته باشند. نتایج حاصل از مدل تحلیلی گرمایش لیزر تحت شرایط مختلف، با تستهای آزمایشی مقایسه شدهاند. مدل انتقال حرارتی که از تحلیلهای عددی بدست آمد و از طریق آزمایشها با تطابق بیش از ۹۰ درصد تأیید شده، ابزاری برای بررسی تأثیر پارامترهای لیزر و شرایط برش در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر را در اختیار قرار میدهد تا بتوان پارامترهای این فرآیند را بهینه کرد.

ماشین کاری سیلیس گرما دیده بصورت مرسوم و در دمای عادی، بخاطر سختی و شکنندگی آن مشکل است. سونگ و همکاران ٔ [۱۳] در پژوهشی، دقت و بهبود قابلیت ماشین کاری سیلیس گرما دیده با گرمایش ناشی از پرتوی لیزر را نسبت به ماشین کاری معمولی بصورت تجربی نشان داده و ارزیابی کردند. با انجام تستها مشخص گردید که در شرایط یکسان، سایش متوسط ابزار در ماشین کاری لیزری حدود ۳۸/۷۹ درصد نسبت به ماشین کاری معمولی بهبود یافته است. نیروی برش در ابزار برش نیز ۶/۲ تا ۵۳/۶۱ درصد کاهش یافته است. همچنین، بخاطر سایش کمتر و در نتیجه نوسان پایین تر در برش، زبری سطح ماشین شده تا حداکثر ۶۵/۸۶ درصد كاهش يافته است. نتايج نشان مىدهند كه نسبت دورهى پالس ليزر، فاكتور اصلی برای دستیابی به حداقل زبری است. درصد مشارکت فاکتورهای نسبت دورهی پالس، سرعت برش، پیشروی و عمق برش برای رسیدن به حداقل زبری بهترتیب ۳۴/۴۴، ۲۸/۸۹، ۲۴/۴۴ و ۱۲/۲۲ درصد است. همچنین مقادیر بهینه این فاکتورها برای انجام ماشین کاری لیزری به صورت نسبت دورهی پالس ۵۰ درصد، سرعت دورانی ۵۴۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۱۵/۰ میلیمتر بر دور و عمق برش ۸ میکرومتر گزارش شده است.

همانگونه که اشاره شد، عمر ابزار به عنوان یک عامل بسیار مهم

<sup>1</sup> Nadim et al.

<sup>2</sup> Roostai et al.

<sup>3</sup> SCFC

<sup>4</sup> Song et al.

در بهرموری فرآیند ماشینکاری همواره مورد توجه بوده، لذا تعقیب رفتار پارامترهای اثرگذار بر روی این متغیر بسیار حائز اهمیت بوده و یکی از این پارامترهای مهم تاثیرگذار بر عمر ابزار که نقش تعیینکننده دارد، دمای ابزار است. این متغیر به صورت خاص خود را در ماشینکاری مواد سخت نشان خواهد داد. بنابر پژوهشهای مورد مطالعه فوق، جنبههای مکانیکی فرآیند تراشکاری به کمک لیزر پیوسته و همچنین جنبههای حرارتی حاکم بر قطعه کار در پژوهشهای مختلف به صورت نظری، عددی و تجربی صورت گرفته است اما مطالعهای نظری و تجربی بر روی دمای ابزار در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر پیوسته کمتر انجام شده، لذا با تأکید بر این وجه از فرآیند مذکور، جوانب مختلف دمای حاکم بر ابزار در فرآیند تراشکاری به کمک منبع حرارتی، در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

# ۲- شبیهسازی المان محدود فرآیند تراشکاری به کمک لیزر

در این پژوهش، یک مدل حرارتی- مکانیکی کوپل شده با استفاده از نرم افزار دیفرم<sup>۱</sup> برای آنالیز فرآیند تراشکاری به کمک لیزر توسعه داده شده است، شکل ۱.

در شکل ۱ (ب)، درجه حرارت در نقطه X از ماده در حین فرایند برش متعامد، به عنوان تابعی از زمان رسم شده است. نقطه X در حرکت خود به سمت ابزار، به منطقه تغییر شکل اولیه میرسد و از طریق هدایت گرما از ناحیه تغییر شکل اولیه گرم میشود تا مطابق شکل ۱ (ب)، درجه حرارت آن شروع به افزایش کند. سپس نقطه X در قطعه کار باقی مانده و در اثر اصطکاک سطح آزاد ابزار با سطح ماشینکاری شده، درجه حرارت آن مجدداً افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود میرسد. در نهایت نقطه X از ناحیه اصطکاک سطح آزاد ابزار و براده دور میشود و درجه حرارت آن تارسیدن به درجه حرارت آن تا رسیدن به

در شکل ۱ (ج)، درجه حرارت در نقطهای از ابزار برش، واقع بر سطح براده، به عنوان تابعی از زمان رسم شده است. حرارت تولید شده در سطح مشترک ابزار– براده از نقطه نظر عمر ابزار (گودال فرسایش) اهمیت زیادی داشته و در بسیاری از مراجع، با مدل اصطکاکی توصیف میشود. در نتیجه با فرض پایدار بودن فرایند برش، منبع حرارتی اصطکاکی در سطح تماس براده و ابزار، با گذر زمان به یک انتقال حرارت حالت پایدار میل می کند و مجانب منحنی درجه حرارت زمان، معیاری از درجه حرارت در نقطه مورد مطالعه است.

1 Deform 3D

به دلیل اینکه در شبیهسازی دو بعدی المان محدود قطاعی کوچک از محیط قطعه کار استوانه ای مورد مطالعه می گیرد و همچنین اشعه ی لیزر به صورت متمرکز به قطعه کار تابانده می شود، می توان فرض کرد در اثر ورود شار حرارتی لیزر به قطعه کار، سطح بالایی قطعه کار متأثر از یک دمای ثابت به صورت پیشگرم است، لذا باتوجه به فرمولاسیون ریاضی معرفی شده در پژوهش کاشانی و همکاران [۸]، جهت تعیین دمای نقاط مختلف قطعه کار در حال تراشکاری در معرض اشعه ی لیزر، متناسب با هم نشینی پارامترهای توان لیزر، سرعت برشی و نرخ پیشروی، دمای سطح براده ی تغییر شکل نیافته محاسبه می شود و به عنوان شرایط مرزی حاکم بر سطح قطعه کار در مدل المان محدود مطابق با شکل ۲ در نظر گرفته می شود.

به منظور صحه گذاری مدل المان محدود ارائه شده، دمای ابزار در حالت تجربی و شبیه سازی مورد مقایسه قرار می گیرد. برای این منظور نقطهای مشخص به مختصات (۴/۳، ۰۰/۹۷) بر روی سطح برادر در نظر گرفته می شود و ترمو کوپل در نقطه مذکور جانمایی می شود و تاریخچه ی زمانی درجه حرارت در این نقطه با استفاده از روش تجربی و المان محدود با یکدیگر مقایسه می شود.

در شبیهسازی برش فلزات، مدل اصطکاک ثابت کولمب، ضریب اصطکاک را در کل منطقهی تماس براده و ابزار ثابت فرض میکند. مدل کولمب عمدتاً در شرایطی استفاده میشود که در آن مقدار نیروی عمودی کوچک بوده و لذا بهواسطهی مقادیر کوچک تنش، ماده تسلیم نخواهد شد. بنابراین این مدل بهصورت رابطه (۱) بیان میشود:

$$\tau = \mu \sigma_n \tag{1}$$

که در آن  $\tau$  تنش اصطکاکی،  $\sigma_n$  تنش نرمال  $\mu$  ضریب اصطکاک است. در ماشینکاری در پیشرویها و سرعتهای برشی پایین، ضریب اصطکاک متأثر از پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی خواهد بود.

با توجه به اینکه ابزار و تأثیر ماشینکاری بر روی میدان دمایی حاکم بر آن، حائز اهمیت است، در این شبیهسازی ابزار تنگستن کار باید بهصورت صلب مدلسازی شده است. خواص فیزیکی تنگستن کارباید تاکنون موضوع مطالعهی پژوهشهای مختلفی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، این خواص از نتایج مرجع [۱۴] استخراج شده و در جدول ۱ گردآوری شده است. ماده موردمطالعه در این پژوهش سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ است. رفتارالاستو-پلاستیک قطعه کار از مدل جانسون-کوک تبعیت میکندخواص





Fig. 1. Finite Element Model of Orthogonal Cutting.



شکل ۲. نحوهی اعمال شرایط مرزی و نحوه اعمال اثر منبع حرارتی بر قطعه در مدل المان محدود. Fig. 2. Applying boundary conditions and heat source in finite element model.

جدول ۱. خواص فیزیکی تنگستن کارباید [۱۴].

جرم حجمی	ضريب پوآسن	مدول الاستيك
kg/m <sup>°</sup>		GPa
140	+/YY	۵۸۰
گرمائی ویژه	هدایت حرارتی	انبساط حرارتی
N/mm <sup>r</sup> °C	W/m°C	$\times 1 \cdot K^{-1}$
۲۲.	٣.	۵/۴

Table 1. Physical Properties of WC [14].

# جدول ۲. خواص فيزيكي قطعهكار [1۵].

Table 2. Physical Properties of workpiece [15].

جرم حجمی	استحكام كششى	مدول الاستيك
kg/m <sup>r</sup>	MPa	GPa
844.	۶۵۵	144
ضريب پوآسن	دمای ذوب	ظرفیت گرمایی ویژه
•/٣٧٣	1898 K	sr. J/kgK

جدول ۳. مقادیر ثوابت جانسون کوک برای قطعهکار [۱۵].

Table 3. Johnson Cook Constants of Workpiece [15].

$T_m(^{\circ}C)$	n	m	С	B(MPa)	A(MPa)
۱۵۹۳	۰/۵۱۸۹	1/7881	•/••٨۵	۶۹۹	۱۱۰۸

فیزیکی جنس قطعه کار از پژوهش جانسون و کوک [1۵] استخراج شده است که در جدولهای ۲ و ۳ مقادیر آنها گزارش شده است. پارامترهای A، A و n ثابتهای ماده بوده که با توجه به جنس قطعه کار تعیین می شوند. همچنین درجه حرارت  $T_m$  نقطه ذوب قطعه می باشد.

شرایط مرزی حاکم بر مسئله، نقش قابل توجهی در مطالعه ی درجه حرارت ابزار در شبیه سازی المان محدود فرآیند تراشکاری به کمک لیزر را دارد؛ لذا صورت بندی صحیح شرایط مرزی حاکم بر شبیه سازی دررسیدن به فیزیک واقعی فرآیند حائز اهمیت است همان طور که در شکل ۲ مشخص است، انتقال حرارت همرفت لبه برش اصلی و سطح آزاد ابزار با محیط در

نظر گرفته می شود و شرایط مرزی انتهای ابزار با دمای ثابت در نظر گرفته می شود. هم چنین انتقال حرارت همرفت آزاد با محیط برای سطح قطعه کار و سطح گذرا در قطعه کار در نظر گرفته می شود. دمای انتهای قطعه کار ازنظر به اسپیندل نیز برابر با محیط اطراف تعریف می شود. انتهای قطعه کار ازنظر سینماتیکی ثابت در نظر گرفته می شود و حرکت نسبی ابزار و قطعه کار در شبیه سازی المان محدود، به ابزار نسبت داده می شود. نکته ی قابل توجه در در شبیه سازی حرارتی المان محدود فرآیند این است که اثر انتقال حرارت تشعشعی از قطعه کار در نظر گرفته نمی شود. از سوی دیگر انتقال حرارت



شکل ۳. مقایسه نتایج المان محدود درجه حرارت ابزار در نقطهای به مختصات (۹/۷ و ۴/۳) در دو حالت تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر با مشخصات توان لیزر ۲۰۰ وات، سرعت برشی ۱/۳۱ متر بر ثانیه و پیشروی ۲۰/۰ میلیمتر بر دور.

Fig. 3. Comparison of cutting tool temperature profile extracted from finite element model for point (4.3,0.97) in conventional turning and laser assisted turning (Power 200 and 300W) (Vc=1.31 m/s and af=0.08 mm/rev).

مورد مطالعه قرار نگرفته است که این موارد خود از منابع بروز خطا در شبیهسازی المان محدود خواهند بود.

دمای ابزار به صورت استخراج دمای مختصات نقطهای از ابزار که متناظر با محل قرارگیری نوک ترموکوپل در آزمایشهای تجربی است، انجام میگیرد، بنابراین میتوان رفتار دمایی هر نقطه ی دلخواه از ابزار را به صورت تابعی از زمان دنبال کرد. در شکل ۳ نمودار دمای نقطهای از ابزار به مختصات (۴/۹۰، ۴/۹۷) برحسب زمان، در دو حالت تراشکاری سنتی و تراشکاری به لیزر با توان ۲۰۰ وات و پارامترهای برشی، سرعت برشی ۱/۳۱ متر بر ثانیه و پیشروی ۲۰۰۸ میلی متر بر دور نشان دادهشده است.

برای مش بندی صحیح قطعه کار، تأثیر اندازه یالمان ها بر دقت شبیه سازی بررسی می شود. برای این منظور، به ازای پارامترهای حرارتی و برش ثابت تعدادی شبیه سازی المان محدود با اندازه یالمان مختلف انجام شد و تنش مؤثر نقطه ی معینی از قطعه کار در زمان ثابت (نقطه ای به مختصات (۸۹/۸، ۳/۵۵) در زمان ۲۰۰۱ ثانیه از شروع شبیه سازی) در شبیه سازی ها استخراج می شود. نتایج بررسی تأثیر اندازه ی المان ها بر دقت

شبیهسازیها در شکل ۴ ارائهشده است. نهایتاً مش با اندازهی نسبی۶۰۰/۰ در ناحیهی درگیری ابزار و قطعه کار، متناسب با ۶۵٪ تراکم در سطح واحد درگیری انتخاب شده است.

# ۳– روش مطالعه تجربی ۳– ۱– تجهیزات تراشکاری به کمک لیزر

برای انجام آزمایشهای تجربی از دستگاه تراش و منبع لیزر موجود در آزمایشگاه تحقیقات ماشینکاری دانشگاه صنعتی شریف استفادهشده است. توان موتور الکتریکی این دستگاه ۵/۵کیلووات و حداکثر دور اسپیندل آن برابر با ۲۰۰۰ دور بر دقیقه است. سوپر آلیاژ اینکونل ۲۱۸ بهعنوان قطعه کار در این پژوهش انتخابشده است. این سوپر آلیاژ با توجه به کاربرد در صنایع توربینسازی و حتی صنایع هوافضا، یکی از مواد با استحکام بالا است. با توجه به آزمایش های مقدماتی صورت گرفته، ابزارهای اینسرتی از جنس تنگستن کاربید انتخاب شدند. ابزار با گرید SCMT۱۲۰۴۱۲ از شرکت سکو تهیه شد.

بهمنظور حرارت دادن قطعه کار از دستگاه لیزر ۶۰۰ وات پیوسته از نوع



شكل ۴. تأثير اندازهي المانها بر دقت شبيهسازي المان محدود.



جدول ۴. مشخصات فنی ترموکوپل اندازه گیری دما.

Table 4. Technical charactristics of thermocoupls used in temperature measurement.

محدوده	مشخصه
۲۰۰- الی ۱۳۷۰ درجه سانتیگراد	محدوده اندازهگیری درجه حرارت
۰/۳± درجهی سانتیگراد	دقت
±۰/۱ درجهی سانتی گراد	رزولوشن
یک ثانیه	پاسخ زمانی
k-type(NiCr_Ni)	نوع ترموکوپل

فايبر ساخت شركت مركز علوم و فنون ملى ليزر استفاده شده است.

برای اندازه گیری مؤلفههای نیرویی، از دستگاه دینامومتر ساخت کیستلر به مدل ۹۱۲۱ استفاده شده است. آمپلیفایر ۵۰۷۰ کیستلر به همراه کارت دادهبرداری ۹۵۶۹۷ کیستلر در این پژوهش مورد استفاده قرارگرفته است. سیگنال حاصل از اندازه گیری به یک ولتاژ الکتریکی تبدیل میشود. اندازه این ولتاژ دقیقاً متناسب با نیروی وارده به قطعه کار است. سیگنال آنالوگ آمپلیفایر به کارت دادهبرداری منتقل شده و نهایتاً از طریق اتصال کارت دادهبرداری به یک کامپیوتر و با استفاده از نرمافزار داینو ویر <sup>۲</sup> نیروهای

در این پژوهش درجه حرارت ابزار با استفاده از دستگاه تستو ۲–۷۳۵ در حالتی که پروب آن در ابزار برشی کار گذاشته شده، مورد مطالعه قرار می گیرد. خروجی دستگاه در نرمافزار کامفورت<sup>۲</sup> X۳۵ مورد تجربه و تحلیل قرار می گیرد. مشخصات عملکردی این دستگاه در جدول ۴ آمده است.

چیدمان ستاپ تجربی این پژوهش و شماتیک آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

ماشینکاری قابل ثبت کردن است.

<sup>1</sup> Dynoware



شکل ۵. چیدمان تجهیزات تراشکاری به کمک لیزر. Fig. 5. Setup for laser assisted machining.

# ۳– ۲– آزمایشهای تجربی مدلسازی ضریب اصطکاک

طراحی آزمایش در این بخش از پژوهش، مشتمل بر سه سطح برای هر یک از متغیرهای سرعت برش و پیشروی است. مقادیر مربوط به این دو متغیر مستقل به همراه مقادیر نیروهای اندازه گیری شده و همچنین ضرایب اصطکاک متناظر برای این ۵ آزمایش در جدول ۵ گزارش شده است.

برای اندازه گیری مؤلفه های نیرویی و قبل از انجام آزمایش های ماشینکاری نیاز است، صحت و دقت دستگاه اندازه گیری نیروی وارده بر

دینامومتر با جرمهایی با وزن مختلف بررسی شود. مقادیر ضریب اصطکاک پس از اندازه گیری مؤلفههای برشی و پیشروی نیرو (گزارش شده در جدول ۵) از رابطهی (۲) تعیین می شود:

$$\mu = \frac{F_t + F_C \tan(\alpha_n)}{F_C - F_t \tan(\alpha_n)} \tag{(Y)}$$

# ۳- ۳- طراحی آزمایشها

در هنگام مطالعهی نیمه تجربی درجهی حرارت در تراشکاری به کمک لیزر، تأثیر پارامترهای توان لیزر پیوسته، سرعت برشی و پیشروی موردمطالعه قرار می گیرد. در این مطالعه برای هر یک از پارامترهای مذکور سه سطح در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب با طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل در مجموع ۲۷ آزمایش انجام و در هر آزمایش درجه حرارت اینسرت برشی در نقطهی نصب ترموکوپل اندازه گیری می شود. عمق برشی ثابت و برابر با یک میلی متر در نظر گرفته می شود. سطوح پارامترهای مورد مطالعه در جدول ۶ آمده است.

# **۴ – نتایج و بحث** ۴ – ۱ – نیروهای برشی

در شکل ۶ نتایج حاصل از مطالعهی تجربی و المان محدود مؤلفهی اصلی نیروی برش نشان داده شده است.

هدف از مطالعهی مؤلفه نیروی اصلی برش، بررسی صحت مطالعات تجربی و المان محدود است. بر اساس نتایج حاصل شده، شبیهسازی المان محدود نیرو در انطباقی مناسب با نتایج مطالعهی تجربی قرار دارد و درصد انطباق ۸۵ درصدی بین نتایج مطالعات المان محدود و مطالعات تجربی برقرار بوده است.

همان طور که در شکل ۶ پیداست استفاده از توان لیزر ۳۵۰ وات موجب کاهش ۱۱/۵ درصدی نیروهای برش نسبت به حالت تراشکاری سنتی شده و با افزایش توان لیزر پیوسته به ۵۰۰ وات، این کاهش نیرو به ۲۳درصد، نسبت به تراشکاری سنتی رسیده است. این کاهش در اثر کاهش تنش جریان ماده با افزایش دما، توجیه میشود. افزایش توان لیزر پیوسته بالطبع افزایش دمای لایهی مرزی سطحی قطعه کار متأثر از منبع حرارت را ایجاد می کند، لذا با افزایش دمای بیش تر لایهی مرزی سطحی قطعه کار، کاهش تنش جریان در اثر افزایش حرارت در ماده بیشتر بوده و منجر به کاهش بیشتر استحکام برشی ماده خواهد شد. البته باید در نظر داشت که افزایش

# جدول ۵. پارامترهای تجربی مدلسازی ضریب اصطکاک.

ضریب اصطکاک (µ)	$(F_h^{})$ مؤلفه پیشروی (	مؤلفه اصلی ( $F_c$ )	$(V_{_{c}}% )$ سرعت برش (	$(a_{\!_f})$ پیشروی (
	Ν	Ν	m/s	mm/rev
•/&•	۸./۵	181	1/31	•/•٨
•/49	۶۵/۳	147	۲/۶۱	•/•٨
•/69	۱۱۹	201	1/31	•/14
•/۴٨	٨۵/٢	144	۲/۶۱	•/14
•/ <b>&amp;</b> ¥	١٣٢	٢٣١	1/88	•/۲•

Table 5. Experimental parameters for modeling friction coefficient.

# جدول ۶. متغيرها و سطوح أنها.

# Table 6. Variables and their levels.

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
توان لیزر (W)	۲	۳۵۰	۵۰۰
سرعت برش (m/s)	١/٣٠	۱/٨۶	۲/۶۱
پیشروی (mm/rev)	•/•٨	•/1۴	•/٢•

توان لیزر در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر تا حدی مجاز است که منجر به تغییرات ریزساختاری در سطح قطعه کار نشود و اساساً ساختار بلورهای ماده را عوض ننماید، ازاینرو این محدودیت متالورژیکی سبب محدودیت در افزایش توان لیزر پیوسته خواهد شد.

طبق بررسی صورت گرفته تا درجه حرارت ۶۲۰ درجه سانتیگراد، آلیاژ اینکونل ۷۱۸ دچار تغییرات ریزساختاری نخواهد شد و لذا باتوجه به نحوهی انتخاب پارامترهای برشی و لیزر و بر اساس ارزیابی تئوری دمای برادهی تغییر شکل نیافته در این پژوهش ماکزیمم ۳۰۰ درجهی سانتیگراد است.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، علاوه بر تأثیر توان لیزر، که افزایش آن موجب کاهش نیروی برش می شود، همانند تراشکاری سنتی، در یک روند عمومی با افزایش سرعت برشی، مؤلفه ی اصلی نیروی ماشینکاری کاهش می یابد. این رفتار را می توان این گونه تحلیل کرد که با افزایش سرعت برش، مقدار حرارتی که به براده وارد می شود، بیشتر می شود و سهم ابزار کاهش می یابد. بنابراین با افزایش دمای براده ی تغییر شکل نیافته، نیروهای برشی کاهش می یابند.

مطابق شکل ۷ هر دو فرآیندهای تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک

لیزر، افزایش پیشروی سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته را افزایش خواهد داد و درنتیجه چون نیروی برش بهعنوان ضریبی از سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته است، مقدار نیروی برش بهصورت تقریباً خطی افزایش خواهد یافت.

# ۴- ۲- درجه حرارت برش

نتایج حاصل از مطالعه ماکزیمم دمای ابزار برش در فرآیند تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر به همراه تأثیر پارامترهای توان لیزر، سرعت برشی و پیشروی در شکل ۸ نمایش دادهشده است.

در یک روند عمومی با افزایش توان لیزر، دمای ابزار کاهش پیدا می کند [۸ و ۱۰]. این کاهش در اثر کاهش تنش جریان ماده با افزایش دما و نهایتاً کاهش دما در ناحیه اول برش توجیه می شود. افزایش توان لیزر بالطبع افزایش دمای لایه ی مرزی سطحی قطعه کار متأثر از منبع حرارت را ایجاد می کند، لذا با افزایش دمای بیش تر لایه ی مرزی سطحی قطعه کار، کاهش تنش جریان در اثر افزایش حرارت در ماده بیشتر بوده و ضمن کاهش بیشتر استحکام برشی ماده با کاهش دمای صفحه ی برش منجر به کاهش دمای







ابزار خواهد شد.

Pe است.  $K_{ch} e$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی ابزار و براده هستند.  $V_c$  است. برش، عدد پکلت نامگذاری شده که در کسر معرفی شده ی آن،  $V_c$  سرعت برش، a منصف قطر بزرگ بیضی در تقریب ناحیه تماس براده و ابزار است. همچنین  $\xi$  عدد نفوذ حرارتی براده است که برابر با ضریب هدایت حرارتی براده تقسیم بر حاصلضرب چگالی در ظرفیت گرمایی ویژه می باشد.

طبق رابطهی (۳) که در فرآیند برش متعامد برقرار است [۱۶] با افزایش سرعت برش، عدد پکلت بزرگتر میشود و ۷۷ کاهش مییابد. یعنی در سرعتهای برشی بالا، قسمت عمدهی حرارت توسط براده حمل میشود. در این رابطه ۷۷ به صورت مستقیم متناسب با شار حرارتی منتقل شده به ابزار





(الف) پیشروی ۰/۰۸ میلیمتر بر دور (a) feed = 0.08 mm/rev





شکل ۷. نتایج شبیه سازی المان محدود و آزمون های تجربی تأثیر توان لیزر و پیشروی بر نیروی برش در سرعت برشی ۱/۸٦ متر بر ثانیه.

Fig. 7. The results of Finite Element Method (FEM) model and experimental tests for the effects of laser power and feed on main component of cutting force (Vc=1.86 m/s).

کاهش دمای ابزار با افزایش توان لیزر در سرعت برشی بالاتر نسبت بهسرعت برشی پایین ر (به عنوان مثال در سرعت ۱/۸۶ متر بر ثانیه نسبت به سرعت ۱/۳۱ متر بر ثانیه) بیش تر است. این بیش تر بودن مقدار کاهش دما را می توان این گونه تحلیل کرد که با افزایش سرعت برشی، دمای لایهی مرزی سطح قطعه کار متأثر لیزر نسبت به سرعت پایین تر، افزایش دمای

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{k_{ch}}{k_t}\sqrt{1 + Pe}}$$

$$Pe = \frac{V_c a}{2\zeta}$$

$$a = 0.5l_{cn}$$
(7)



(ب) پیشروی ۱/۸۶ میلیمتر بر دور و سرعت ۱/۸۶ متر بر ثانیه

# (b) feed = 0.14 mm/rev and cutting speed = 1.86 m/s









(a) feed = 0.14 mm/rev and cutting speed = 1.31 m/s





شکل ۸. تأثیر توان لیزر، سرعت برش و پیشروی بر ماکزیمم درجه حرارت ابزار برش.



کم تری دارد؛ این امر منجر به افزایش دمای کمتری در ناحیه ی اول برش در سرعت برشی بالاتر شده است. از سوی دیگر با افزایش سرعت برشی، عدد پکلت معرفی شده در رابطه ی (۳) افزایش یافته و این خود سبب کاهش سهم ابزار در ناحیه ی ثانویه برش خواهد بود. بنابراین درست است که با افزایش سرعت برشی، داده شد، کاهش دمای ابزار افزایش مییابد، اما به دلیل آنچه پیش تر توضیح داده شد، کاهش دمای ابزار در اثر افزایش توان لیزر پیوسته در سرعت برشی بالاتر می بالاتر و مار حرارتی ورودی به ابزار درارتی و مراح دارتی و مراح می بالاتر می بالاتر و مار می باده می باد، اما به دلیل آنچه پیش تر توضیح بالاتر بیشتر می باشد (۸ افزایش می باد اوان لیزر پیوسته در سرعت برشی ورودی به ابزار افزایش یا و درنتیجه حرارت برش در هردوی فرآیندهای تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک منبع حرارتی افزایش خواهد یافت.

# ۵- نتیجهگیری

تحقیق حاضر به مطالعهی المان محدود و تجربی دمای ابزار در فرآیند تراشکاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک لیزر پیوسته و مقایسهی آن باحالت تراشکاری سنتی پرداخت. عمدهی نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

(الف) استفاده از لیزر پیوسته بهنحوی که تغییرات دمایی در قطعه کار موجب تغییر ساختارهای بلورهای جنس قطعه کار نشود، ضمن کاهش نیروهای ماشینکاری در فرآیند، موجب کاهش دمای ابزار خواهد شد که این مورد خود سبب افزایش طول عمر ابزار می شود.

(ب) استفاده از لیزر پیوسته از طریق تغییر در تنش جریان ماده یقطعه کار و مشخصات فیزیکی-حرارتی جنس قطعه کار، سبب کاهش افزایش دمای صفحه ی برش شده و از طریق این سازو کار، منجر به کاهش دمای ابزار خواهد شد. استفاده از لیزر پیوسته ماکزیمم، کاهشی به میزان ۱۹٪ (سرعت برشی ۱/۸۶ متر برثانیه، پیشروی ۲۰۸۸ میلیمتر بر دور و توان ۵۰۰ وات) در دمای ابزار، نسبت به حالت تراشکاری سنتی داشته است.

(ج) کاهش دمای ابزار با افزایش توان لیزر پیوسته در سرعت برشی بالاتر نسبت به سرعت برشی پایین تر، بیش تر است. به عنوان مثال در پیشروی ثابت ۱/۱۴ میلی متر بر دور کاهش دمای ابزار در سرعت برشی ۱/۸۶ متر بر ثانیه ۱۹٪ بوده که این مقدار در سرعت ۱/۳۱ متر بر ثانیه به ۱۳٪ رسیده است. این بیش تر بودن مقدار کاهش دما را می توان این گونه تحلیل کرد که با افزایش سرعت برشی، دمای لایهی مرزی سطح قطعه کار متأثر از منبع جرارت نسبت به سرعت پایین تر، افزایش دمای کم تری دارد؛ این امر منجر به افزایش دمای کمتری در ناحیه ی اول برش در سرعت برشی بالاتر شده. از سوی دیگر با افزایش سرعت برشی، عدد پکلت معرفی شده در رابطهی

(۳) افزایشیافته و این خود سبب کاهش سهم ابزار در ناحیه ی ثانویه برش خواهد بود. بنابراین درست است که با افزایش سرعت برشی، دمای ابزار افزایش مییابد، اما به دلیل آنچه پیشتر توضیح داده شد، کاهش دمای ابزار در اثر افزایش توان لیزر پیوسته در سرعت برشی بالاتر بیشتر بوده است.

# تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بدینوسیله کمال تشکر و سپاسگزاری خود را از مسئولین آزمایشگاه تحقیقات ماشینکاری دانشگاه صنعتی شریف آقایان دکتر موحدی و دکتر اکبری جهت در اختیار گذاشتن تجهیزات انجام آزمونهای تجربی را به عمل می آورند.

# منابع

- [1] G. Punugupati, K.K. Kandi, P.S. Bose, C.S. Rao, Laser assisted machining: a state of art review, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 149 (2016), 012014.
- [2] S.M. Hashemi, M.A. Akhavan-Behabadi, An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO–base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39(1) (2012) 144-151.
- [3] S. Sun, M. Brandt, M.S. Dargusch, Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials—a review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50(8), (2010) 663-680.
- [4] L.N. Lo' pez de Lacalle, J.A. Sa' nchez, A. Lamikiz, A. Celaya, Plasma assisted milling of heat-resistant superalloys, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126(2), (2004) 274-85.
- [5] J.C. Rozzi, F.E. Pfefferkorn, F.P. Incropera, Y.C. Shin, Transient, three-dimensional heat transfer model for the laser assisted machining of silicon nitride: I. Comparison of predictions with measured surface temperature histories, International journal of heat and mass transfer, 43(8), (2000) 1409-1424.
- [6] P.A. Rebro, Y.C. Shin, F.P. Incropera, Design of operating conditions for crackfree laser-assisted machining of

234(3) (2020) 559-70.

- [12] H. Roostai, M.R. Movahhedy, R. Shoja Razavi, Experimental and numerical study of low frequency pulsed Nd: YAG laser heating of slip cast fused silica ceramics for laser assisted turning process considering laser beam overlapping, Scientia Iranica, 26(1) (2019) 394-407.
- [13] H. Song, J. Dan, X. Chen, J. Xiao, J. Xu, Experimental investigation of machinability in laser-assisted machining of fused silica, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 97(1-4) (2018) 267-78.
- [14] M. Khajehzadeh, M. Akhlaghi, M.R. Razfar, Finite element simulation and experimental investigation of tool temperature during ultrasonically assisted turning of aerospace aluminum using multicoated carbide inserts, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 75(5-8) (2014) 1163-75.
- [15] H.K. Farahani, M. Ketabchi, S. Zangeneh, Determination of Johnson–Cook plasticity model parameters for Inconel718, Journal of Materials Engineering and Performance, 26(11) (2017) 5284-5293.
- [16] M. Khajehzadeh, M.R. Razfar, Theoretical modeling of tool mean temperature during ultrasonically assisted turning. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 230(4) (2016) 675-93

mullite, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(7-8), (2004) 677-694.

- [7] A. Samanta, M. Teli, R. Singh, Experimental characterization and finite element modeling of the residual stresses in laser-assisted mechanical micromachining of Inconel 625, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. Journal of Engineering Manufacture, 231(10), (2017) 735-1751.
- [8] M.M. Kashani, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian, R.S. Razavi, Analytical prediction of the temperature field in laser assisted machining, Procedia CIRP, 46 (2016) 575-578.
- [9] E. Kaselouris, A. Baroutsos, T. Papadoulis, N.A. Papadogiannis, M. Tatarakis, V. Dimitriou, A Study on the Influence of Laser Parameters on Laser-Assisted Machining of Aisi H-13 Steel, Key Engineering Materials, 827 (2020) 92-97.
- [10] M.M. Kashani, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian, R.S. Razavi, In-process determination of laser beam absorption coefficient for laser-assisted turning processes, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(5-8) (2017) 2929-38.
- [11] N. Nadim, O.A. Shams, T.T. Chandratilleke, A. Pramanik, Preheating and thermal behaviour of a rotating cylindrical workpiece in laser-assisted machining, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم S. M. Nikouei, M. R. Razfar, M. Khajehzadeh, Experimental Study and Finite Element Simulation of Cutting Tool Temperature in Laser Assisted Machining, Amirkabir J. Mech Eng., 54(6) (2022) 1341-1356.



DOI: 10.22060/mej.2022.20462.7234