

تأثیر اعمال گرمای القایی و ارتعاش فراصوتی بر کیفیت سطحی قطعه کار ماشینکاری شده و نیروی برش در تراشکاری هیبریدی فولاد سخت شده

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران،
 masoud.fasihi1988@gmail.com

مسعود فصیحی*

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، nategh@modares.ac.ir

محمد جواد ناطق*

چکیده

مواد سخت ماشینکاری شونده‌ای مثل فولاد سخت شده و سوپر آلیاژها بدلیل خصوصیات فیزیکی نظیر نرخ استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی عالی، مقاومت خزش و خستگی خوب و دمای کاری بالا، مواد شناخته شده و پرکاربردی در صنعت هایی از جمله هوا-فضا، پزشکی، دریایی و غیره می‌باشد که ماشینکاری آن‌ها همواره از دغدغه‌های اصلی در کاربرد این مواد بوده است. در این مقاله قابلیت ماشینکاری ماده CK45 سخت شده در ۴ فرآیند تراشکاری سنتی، به کمک گرمادهی القایی، به کمک ارتعاش فراصوتی و تراشکاری ترکیبی گرم و فراصوتی تحت آزمایش و مقایسه قرار گرفته است. روش گرمادهی در این مقاله از نوع القایی می‌باشد که طراحی و ساخت آن هزینه بسیار پایین تری در مقایسه با تامین تجهیزات گرمادهی دیگر از جمله لیزر یا قوس پلاسما و ایمنی بالاتری در مقایسه با روش شعله آتش یا کوره المنتی دارد. نتیجه حاصله عبارت از این است که تراشکاری ترکیبی گرمایی و فراصوتی بیشترین بهبود کیفیت سطح و کاهش نیروهای برشی را در مقایسه با دیگر روش های مورد آزمون ارائه می‌دهد. همچنین بررسی نحوه تشکیل براده نشان می‌دهد که بیشترین تاثیرپذیری کیفیت سطح مربوط به تراشکاری ترکیبی گرمایی و ارتعاش فراصوتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: گرمای القایی، ارتعاش فراصوتی، تراشکاری ترکیبی، کیفیت سطح، شکل گیری براده، نیروی برشی.

The Application Effect of Induction Heat and Ultrasonic Vibrations on, Surface Quality and Cutting force of Machined Work piece in Hybrid Machining

M. Fasihi
M. J. Nategh

Department of Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran
 Department of Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

Abstract

Hard to cut materials such as hardened steel and super alloys are well known and popular in transportation, aerospace, marine and medical industries, due to their strength, high corrosion and fatigue resistance and high working temperature. However, their low-machinability is one of the major problems in using them. In this article we examine machinability of the hardened CK45 steel in four processes including; conventional turning, hot turning, ultrasonic assisted turning and hot ultrasonic assisted turning as a hybrid machining. The results of these four processes are compared with each other. The heating technique is induction type which has much lower construction cost compared to other techniques such as laser beam and plasma arc. It has been illustrated in the present study that combining the heating technique with ultrasonic vibration has the most effect in improving surface quality and reducing cutting forces compared to other turning process. The chip formation under the heat and ultrasonic vibration and its influence on the surface quality have also shown that hybrid process has the most affection.

Keywords: Induction heat, Ultrasonic vibration, Hybrid machining, Surface quality, Chip formation, Cutting force.

می‌کند. افزایش دمای قطعه کار تا دمای کمتر از تبلور مجدد^۱ ماده باعث تشکیل راحتتر براده و کاهش ضربه های وارده به ابزار، و در نتیجه کاهش پدیده لرزه و بهبود صافی سطح قطعه کار و افزایش عمر ابزار می‌شود. استفاده از این روش در مورد سرامیک‌ها باعث تبدیل سازوکار براده‌برداری از شکست ترد به تغییر شکل پلاستیک می‌شود. در دماهای بالاتر سرامیک‌ها رفتار برشی شبیه به فلزات از خود نشان می‌دهند[3]. چندین روش گرمادهی برحسب ماشینکاری وجود دارد از جمله: گرمادهی با شعله، قوس پلاسما، لیزر، جریان القایی و برقی (در اینجا منظور از برقی روش‌های قوس الکتریکی^۲ و تماس الکتریکی از طریق عبور فرکانس بالا از ابزار برشی^۳، می‌باشند). انتخاب روش

۱- مقدمه

ماشینکاری به کمک گرما در سال ۱۹۷۳ بر اساس تجهیزات پلاسما می‌شود در آن زمان به کار گرفته شد. این روش بعد از تکمیل تجهیزات مرتبط، در سال ۱۹۷۷ گسترش قابل توجهی یافت[۱]. دلایل اصلی استفاده از این روش عبارت بودند از غلبه بر مشکلات ناشی از لزوم استفاده از سرعت برشی و پیشروی کم که باعث افزایش زمان ماشینکاری و متعاقباً افزایش هزینه ماشینکاری می‌شود؛ و همچنین غلبه بر مشکلات ناشی از تولید نیروی برشی زیادی که روی یاتاقان های ماشین ابزار و راهگاه‌ها در هنگام ماشینکاری مواد آلیاژهای چقرمه و سخت وارد می‌شود [2]. در فرآیند ماشینکاری به کمک گرمادهی، گرما یا به صورت موضعی به وسیله یک یا چند منبع گرمایی خارجی به قطعه کار اعمال می‌شود و یا کل قطعه کار را گرم

¹ Recrystallization

² Electric arc heating

³ Electric contact heating using high frequency feeding through cutting tool

گرمادهی علاوه بر جنس قطعه کار، به شکل آن نیز بستگی دارد. اتخاذ روش مناسب گرمادهی مهم بوده و روش نامناسب باعث ایجاد تغییرات ساختاری ناخواسته در قطعه کار و افزایش هزینه خواهد شد [4,5]. به همین دلایل، گرمایش القایی به انتخاب اول در کاربردهای صنعتی، خانگی و پزشکی تبدیل شده است (بعنوان نمونه از کاربرد این سیستم در لوازم خانگی اجاق‌های گرمایش القایی است. از این سیستم برای بهبود زمان گرمایش و بازده استفاده می‌کنند. در این روش، سطوح گرم نمی‌شوند. بنابراین اگر دست خود را بالای این اجاق قرار دهید، احساس گرم بودن به شما منتقل نمی‌شود. این مورد باعث تمیزی و امنیت بیشتر خواهد شد). پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری‌های کلیدی از جمله الکترونیک قدرت، تکنیک‌های کنترل و طراحی دستگاه‌های مغناطیسی، توسعه سیستم‌هایی با هزینه مناسب و کیفیت بالا را ممکن می‌کند. به همین دلیل است که این فناوری در عصر معاصر، در حوزه‌های فراوانی استفاده می‌شود [6,7]. بنابراین هدف از ماشین کاری به کمک گرما، بالا بردن دمای قسمت مورد ماشین کاری و در نتیجه کاهش سختی آن است. با نفوذ گرما به عمق ناحیه برشی، نیروی لازم جهت برش ماده کاهش می‌یابد و در نتیجه شرایط ماشین کاری بهبود می‌یابد. اگرچه نیروی تراشکاری به واسطه پیش گرم کردن قطعه کار کاهش می‌یابد و احتمال وقوع سایش خراشان^۱ و لب‌پریدگی کاهش می‌یابد. اما دمای نوک ابزار در این فرآیند افزایش می‌یابد. بنابراین یکی از بزرگترین معایب ماشین کاری به کمک گرما، افزایش دمای ابزار می‌باشد می‌تواند مشکلاتی نظیر افزایش چسبندگی (ایجاد لبه انباشته)، افزایش احتمال تغییر شکل پلاستیک نوک ابزار و نفوذ گرمای عناصر آلیاژی ابزار به درون قطعه کار، ایجاد کند. لذا جهت پوشش و بررسی این بخش از معایب تراشکاری گرمای، سازوکار تراشکاری به کمک ارتعاش فراصوتی (به دلیل سازوکار تماس متناوب ابزار برشی با سطح منطقه برشی) بعنوان فرآیند مکمل استفاده می‌شود. تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی با فرکانس و دامنه ثابت، یکی از روش‌های نوین برای ماشینکاری مواد سخت و ترد است. این فرآیند را می‌توان از زیرمجموعه ماشینکاری به کمک ارتعاشات (VAM) دانست. سیستم‌های VAM خود به دو گروه تشدید و غیر تشدید تقسیم بندی می‌شوند، در سیستم‌های غیر تشدید مجموعه ابزار در یک یا ترکیبی از دو مد ارتعاشی کار می‌کند، دامنه ارتعاشی معمولاً کمتر از $6\mu\text{m}$ و فرکانس ارتعاشی معمولاً بالای ۲۰ کیلوهرتز است. در نوع تشدید، سیستم در فرکانس مد اول ارتعاش طبیعی می‌کند و معمولاً دامنه بیشتر می‌باشد. حال اگر جهت ارتعاش ابزار تنها در یک بعد باشد، آنرا (1D VAM) گویند و با اضافه شدن یک بعد دیگر به ارتعاشات، سیستم تبدیل به دوبعدی (2D VAM) با حرکت بیضوی خواهد شد. برخورد متناوب بین سطح براده ابزار و ماده جدا نشده، از مشخصه های این فرآیند است، که ضخامت براده متفاوت را در دو حالت فوق به همراه دارد [8,9]. چند مورد از نمونه کارهای تحقیقاتی انجام شده در زمینه تراشکاری گرمای و ترکیبی به شرح زیر است:

پنجه پور و همکاران [10] بر روی ماشینکاری به کمک لیزر فولاد یاتاقان AISI 52100 با سختی ۵۴ راکول سی، به کمک لیزر با توان

۷۵۰ وات، مطالعه کرده‌اند. در این مطالعه نتیجه گرفته شد که نرخ براده برداری ماشینکاری به کمک لیزر حدوداً ۱۰ برابر روش سنتی است. افزایش دما باعث کاهش تنش تسلیم و سختی قطعه کار می‌شود. در نتیجه مقاومت در برابر تغییر شکل کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۲ محمد و همکاران [11] تراشکاری آلیاژ Ti15V3Cr3Al3Sn را با ابزار کارباید در حالت ارتعاشی و معمولی بررسی کردند. آن‌ها با گرم کردن یا نکردن قطعه کار، دما را نیز به متغیرهای آزمایش اضافه کردند. برای این کار از گرم‌کن برقی $1/1$ کیلوواتی استفاده کردند که قطعه کار را تا ۳۰۰ درجه سلسیوس گرم می‌کرد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اعمال ارتعاش التراسونیک باعث کاهش زبری سطح و نیروهای برش می‌شود. لذا بهترین کیفیت سطح و کمترین نیروها در برش ارتعاشی قطعه کار گرم شده حاصل می‌شود. لازم به توضیح است که روش گرما-دهی در این پژوهش از نوع المنتی یعنی گرما تابشی می‌باشد که از معایب آن می‌توان به داغ شدن تمام ابزار و تجهیزات اطراف آن، عدم پایداری و تسلط کامل در کنترل میزان گرمادهی و نیاز به باز کردن تجهیزات گرمادهی بعد از هر بار گرمایش قبل از شروع تراشکاری اشاره کرد. همچنین در نتیجه این گزارش عنوان شده است که صافی سطح نهایی قطعه در تراشکاری به کمک گرما نسبت به دو حالت تراشکاری به روش معمولی و تراشکاری به کمک ارتعاش فراصوتی بهبود یافته است که ادعای دوم، محل بحث اصلی است چرا که در تراشکاری به کمک گرما به دلیل تماس ممتد ابزار برشی با سطح منطقه برشی، کیفیت سطح نهایی در مقایسه با تراشکاری به کمک ارتعاش فراصوتی کمتر است. فرحناکیان و همکاران [12] روی ماشینکاری به کمک لیزر چدن سفید با درصد کروم بالا AS2027 GRADE CR27 مطالعه کردند. در این مطالعه ماشینکاری به کمک لیزر پاک با توان 2.5 کیلووات بررسی شد. در نتیجه گیری‌ها بیان شده که ماشینکاری به کمک لیزر می‌تواند کمک شایانی در این زمینه انجام دهد. مشاهده شد که لیزر باعث می‌شود ماده راحت‌تر ماشینکاری شود. در ماشینکاری به کمک لیزر این ماده حداکثر کاهش نیروی برش ۲۴ درصدی و حداکثر کاهش نیروی پیشروی ۲۲ درصدی به دست آمد. کوپان و همکاران [13] بر روی فولاد ابزار SKD 11 با سختی ۴۵ راکول سی، ماشینکاری به کمک لیزر انجام داده‌اند و میزان سایش ابزار توسط میکروسکوپ نوری اندازه گیری شده است. طبق نتایج این مطالعه کمترین نیروی تراش در لیزر با توان ۱۰۰۰ وات، سرعت تراش ۱۰۰ متر بر دقیقه و پیشروی 0.03 میلی متر بر دور مشاهده شده است. همچنین ماشینکاری به کمک لیزر این ماده موجب کاهش ۴۰ درصدی نیروهای برشی نسبت به ماشینکاری سنتی شده است. نکته مهم این است که در زمینه تراشکاری مواد سخت تراش پرکاربرد، عموماً از روش گرما-دهی لیزری استفاده می‌شود که نتیجه مورد نظر یعنی سهولت تراشکاری را به دست می‌دهد ولی هزینه بسیار بالایی در تامین تجهیزات این روش گرمادهی مورد نیاز است که در اکثر مواقع قابل توجیه برای کارگاه‌های تراشکاری نمی‌باشد. در این پژوهش، تراشکاری فولاد سخت شده CK45 به کمک اعمال گرمایش به قطعه و ارتعاش فراصوتی به نوک ابزار به عنوان یک تراشکاری هیبریدی مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج آن با نتایج فرآیندهای تراشکاری سنتی، تراشکاری به کمک گرما و تراشکاری به کمک ارتعاش فراصوتی مقایسه می‌شود. تراشکاری به کمک گرمادهی و ارتعاش فراصوتی از جمله فرآیندهایی

¹ Abrasive wear

جریان القایی با عنوان دستگاه گرمادهی القایی امکان پذیر است که در این پژوهش این دستگاه بطور کامل طراحی و ساخته می‌شود. برای این کار باید ۴ پارامتر اصلی سازوکار تعیین و سپس طراحی و ساخت دستگاه تکمیل شود. این ۴ پارامترها عبارتند از: (۱) جنس قطعه کار؛ فلزات با توجه به مقاومت در برابر عبور جریان، زمان گرمایش متفاوتی دارند؛ (۲) بیشینه مقدار تغییر دمای مورد نیاز که کمتر از آن بوسیله یک ولوم و پتانسیومتر قابل تنظیم است؛ (۳) محاسبه ظرفیت مازول گرمایشی بر اساس روابط زیر [14]:

$$P_w = mc \frac{T_f - T_{in}}{t} \quad (1)$$

$$m = \frac{\pi D^2}{4} l \rho \quad (2)$$

که در آن P_w توان لازم برای رسیدن به دمای مورد نظر، m جرم ماده گرما داده شده، c ظرفیت گرمای ویژه ماده، T_f و T_{in} به ترتیب مقادیر میانگین دمای اولیه و دمای نهایی ماده، t زمان مورد نظر، D قطر قطعه کار آزمایشی، l طول منطقه تحت گرما ماده و ρ چگالی ماده تحت گرما است که در اینجا با توجه به جنس ماده و مشخصات مورد نیاز و زمان گرما دهی و جایگذاری در فرمول مذکور، توان کوره ۱ کیلووات بدست آمده است.

(۴) طراحی سیم پیچ القاگر بر اساس هندسه و جنس قطعه کار، میزان گرمایش و زمان گرمادهی با در نظر گرفتن توان ظرفیت گرمایشی دستگاه برای تهیه لوله مسی و ایجاد سیم پیچ مناسب (تابانیدن بوسیله فیکسچر) انجام می‌شود. اجزای القایی با توان‌های مختلف (P_w) بصورت آماده در بازار وجود دارند که با توجه به ظرفیت گرمایش مورد نیاز قابل تامین هستند. مهم ترین پارامترهای تعیین کننده قدرت گرمایش القایی ذکر شد که با توجه به آن‌ها و از طریق روابط (۱) و (۲) توان لازم محاسبه می‌شود. اجزای گرم‌کن طراحی شده در شکل ۱ نشان داده شده است که عبارتند از: سیم‌پیچ مسی، کابل‌های تغذیه، منبع تغذیه، کنترلر، جعبه محافظ، فن‌های خنک‌کاری، و فیلتر گردگیر، و اجزای قطع و وصل و تنظیم جریان.

یکی از معایب مهم ماشینکاری داغ، افزایش دمای ابزار می‌باشد که می‌تواند مشکلاتی نظیر افزایش چسبندگی (ایجاد لبه انباشته)، افزایش احتمال تغییر شکل پلاستیک نوک ابزار و نفوذ گرمای عناصر آلیاژی ابزار به درون قطعه کار ایجاد کند. لذا جلوگیری از افزایش دمای بیش از حد نوک ابزار نقش کلیدی در این فرآیند تراشکاری ایفا می‌کند [15].

تجهیزات مورد استفاده جهت تولید ارتعاش فراصوتی این مجموعه، تشکیل یافته از یک ژنراتور ساخت شرکت اسکچمن^۲ با مدل ES20، که برق شهر را تبدیل به برقی با فرکانس 20+0.5 KHz می‌نماید [16]. بیشترین توان دستگاه ۲ کیلووات بوده، امکان تنظیمات دامنه و تعیین فرکانس تشدید فراهم شده است و ترانس‌دبوسر پیزوالکتریکی از نوع لانگوین، که با دریافت جریان خروجی از ژنراتور با تحریک پیزوالکتریک‌ها^۳ شروع به ارتعاش مکانیکی می‌کند. هورن استوانه‌ای با مخروط تحتانی برای همگرایی ارتعاشات از جنس تیتانیوم، انتخاب شده

است که در ماشینکاری مواد مهندسی به کار می‌رود تا در کنار هم مشکلات ناشی از سرعت برشی و پیشروی کم و همچنین مشکلات ناشی از ایجاد نیروهای ماشینکاری بالا را تا حد زیادی مرتفع کند. استفاده و ساخت تجهیزات گرمادهی از جمله لیزر یا قوس پلاسما با وجود عملکرد خوب دارای هزینه بسیار بالایی هستند. لذا روش گرما-دهی مد نظر، سازوکار القایی می‌باشد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش با ترکیب گرمادهی به سطح قطعه کار و مرتعش کردن ابزار برشی در تراشکاری سنتی، تراشکاری هیبریدی جهت بررسی قابلیت ماشینکاری فولاد سخت شده CK45 با سختی ۴۵ راکول سی انجام می‌شود. چهار فرآیند تراشکاری سنتی، تراشکاری به کمک گرما، تراشکاری به کمک ارتعاش فراصوتی و تراشکاری به کمک گرما و ارتعاش فراصوتی بصورت مجزا بر روی مناطق برش مشخص شده بر روی قطعه کار با داده‌های ورودی یکسان انجام می‌شود و نتایج آن‌ها در دو زمینه نیروهای برشی و کیفیت سطح قطعه مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. یعنی در فرآیندهای تراشکاری گرمای، فراصوتی و ترکیبی گرما-فراصوتی تمام آزمون‌های فرآیند البته آن‌هایی که تکراری نیستند، جداسازی می‌شود.

با توجه به انتخاب دو فرآیند گرمادهی قطعه و اعمال ارتعاش فراصوتی به نوک ابزار بعنوان فرآیندهای کمکی اصلی، دو پارامتر دما T و دامنه a به عنوان پارامترهای ورودی متغیر در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای ورودی عبارتند از: دمای گرمادهی (T ، °C)، دامنه ارتعاش (μ) فرکانس ارتعاش (f (KHz) نرخ پیشروی (F (mm/rev) سرعت برشی (V (m/min)، عمق برش d (mm) و پارامترهای خروجی مورد بررسی عبارتند از: نیروهای برشی (F_x, F_y, F_z) در سه جهت Z در راستای سرعت برش (ارتعاش ابزار)، X در راستای سرعت پیشروی (feed) و Y در راستای عمق بار (شعاعی)، کیفیت سطح نهایی قطعه تحت تاثیر تراشکاری هیبریدی و بررسی نحوه تشکیل براده.

همان‌گونه که پیشتر گفته شد روش انتخابی در این پژوهش گرما-دهی از نوع القایی می‌باشد. گرمایش القایی^۱ از جمله فناوری‌هایی است که مزایای فراوانی دارد؛ از جمله بازده بالا، گرمایش سریع، تمیزی کار، کنترل دقیق و امنیت بالا در مقایسه با روش‌های شعله‌ای یا گازی و هزینه بسیار پایین تر در مقایسه با روش‌های لیزر یا قوس پلاسما. دو فاکتور اساسی برای گرمادهی القایی نیاز است: یک میدان متغیر مغناطیسی، هادی الکتریسته که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد (قطعه مورد نظر). در یک سیستم ساده گرمایش القایی، منبع تغذیه، یک جریان متناوب به سلف یا القاگر (معمولا از جنس مس) ارسال می‌کند. ماده‌ی مدنظر جهت افزایش دما داخل این سیم‌پیچ قرار داده می‌شود. سلف یا القاگر، مانند سیم‌پیچ اولیه یک ترانسفورماتور عمل می‌کند و ماده هدف مانند سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور خواهد بود، با این تفاوت که اتصال کوتاه شده است. هنگامی که یک قطعه فلزی داخل القاگر قرار گیرد، جریان‌های گردابی در حال چرخش در قطعه القا می‌شود. میدان متغیر مغناطیسی از طریق دستگاه تولید کننده

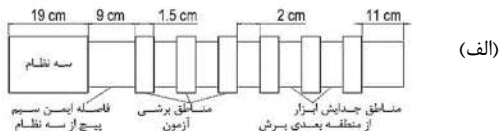
² Steckmann

³ Piezoelectric

¹ Induction Heating

مشخصات فیزیکی در دمای محیط (بصورت میانگین)	
مدول الاستیسیته	$190-210 (\times 10^3 \text{ N/mm}^2)$
چگالی	$7.84 (\frac{\text{g}}{\text{cm}^3})$
رسانایی گرمایی	$15.1 (\frac{\text{W}}{\text{m.K}})$

با توجه به اینکه آزمایشات بر روی یک قطعه کار همگن و یکسان باید انجام شود و هر کدام از آزمون‌ها باید دو بار انجام شوند تا نتایج قابلیت اعتماد داشته باشند، لذا تقسیم بندی مناطق برش و تصویر قطعه در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- مناطق برش قطعه آزمون
(الف) نقشه اندازه گذاری (ب) تصویر قطعه

برای انتخاب بهترین ابزار برش با مطالعه مقالات پیشین، هندهه ابزار مناسب مشخص شد و گرید و جنس آن باید متناسب با سختی قطعه کار از کاتالوگ ابزارهای درون گذار انتخاب شود. ابزار مورد مصرف با کد مشخصات شکل ۳ می‌باشد.



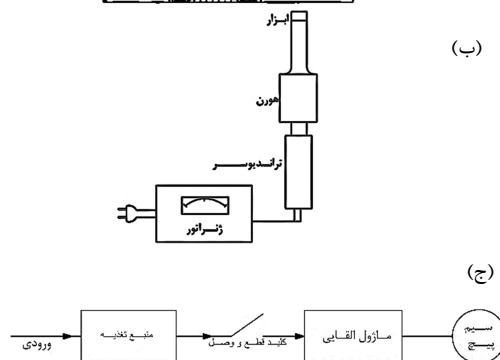
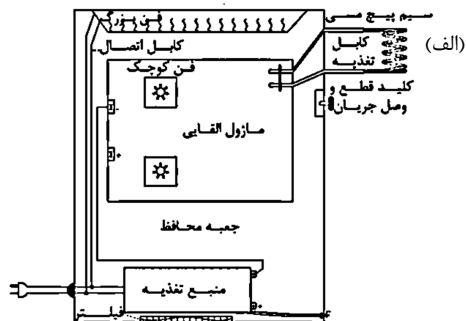
شکل ۳- ابزار CBN تراشکاری و کد ابزار VCGT 160404 CBN

مشخصات ساختاری ابزار در جدول ۲ [18] ارائه شده است:

جدول ۲- Tool type: CBN

۱۵۰۰-۱۴۰۰	مقاومت گرمایی / $W/^{\circ}C$
۸۰۰-۵۰۰	مقاومت فشاری / Mpa
۹	چقرمگی شکست / $Mpa.m^{1/2}$
۵۰۰۰-۳۵۰۰	سختی (HV)
۳۰۰-۲۰۰	رسانایی گرمایی / $(\frac{W}{m.K})$
۳/۵ - ۴/۸	انبساط گرمای / $(10^{-6}K)$
۶۵-۵۵	سختی مجاز قطعه کار
۲۰۰-۸۰	سرعت برش / $(\frac{m}{min})$

است. اتصال ابزار به هورن نیز چون بایستی حالت تقارنی می‌داشت، دقیقاً در مرکز نوک آن پیچ گردید. در انتهای ترانسدیوسر یک رزوه M10 جهت اتصال هورن به آن می‌باشد. لذا بایستی ابتدای هورن سوراخکاری شده و سپس با قلاویز رزوه شود. عمق سوراخ رزوه شده در هورن باید به اندازه‌ای باشد که کف ترانسدیوسر و ابتدای هورن به خوبی روی هم قرار گیرند و محکم بهم وصل گردند. از طرفی سوراخ نباید زیاد عمیق باشد تا از استحکام آن بکاهد و شرایط ارتعاشی را تغییر دهد. اختلاف زیاد در امپدانس صوتی میان اجزا سیستم ارتعاشی باعث اتلاف انرژی در مرز میان آن‌ها می‌گردد. برای جلوگیری از ورود هوا میان اجزا دستگاه ارتعاش (ترانسدیوسر، هورن استوانه‌ای) و ارتباط کامل میان آن‌ها می‌توان از گریس، کاغذ آلومینیومی و یا پلیمرهایی که از نظر امپدانس صوتی به اجزا دستگاه ارتعاشی نزدیک هستند استفاده نمود. در این پژوهش از گریس استفاده گردید. شماتیک تجهیزات و دیاگرام برقی در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- طرحواره تجهیزات

(الف) دستگاه گرمایش القایی (ب) دستگاه مولد فراصوتی

(ج) دیاگرام برقی فرآیند گرمایش القایی

مشخصات قطعه تحت آزمون در جدول ۱ [17] آمده است.

جدول ۱- مشخصات قطعه آزمون

نام های تجاری	
Brand Name	SIQUAL 1191
Ravne	CK45
AISI/SAE	1045
ترکیبات شیمیایی (در وزن به درصد)	
C	0.46
Si	Max 0.4
Mn	0.65
Cr	Max 0.40
Mo	Max 0.10
Ni	Max 0.40

نمای از بالای تراشکاری ترکیبی به کمک گرمادهی القایی و ترکیبی با ارتعاش فراصوتی را در یک چیدمان تنظیمی نمایش می‌دهد.



شکل ۴- تراشکاری ترکیبی به کمک حرارت دهی و ارتعاش فراصوتی

ترتیب روش اجرای تراشکاری ترکیبی به کمک گرمادهی سطح قطعه و اعمال ارتعاش فراصوتی به نوک ابزار به شرح زیر است:

در این آزمایش، سطح منطقه برش قطعه (شماره ۲۲ شکل ۵) بوسیله سیم پیچ گرمادهی (شماره ۲۳ شکل ۵) که متصل به دستگاه گرمادهی است، گرم می‌شود. سپس ارتعاش فراصوتی بوسیله مولد مخصوص از دستگاه مربوطه به ابزار برش (شماره ۲۱ شکل ۵) در حین تراشکاری اعمال می‌شود. افزودن گرما به سطح قطعه و اعمال ارتعاش به نوک ابزار موجب می‌شود که ماشینکاری بصورت نرم انجام شود. بدین ترتیب که ابتدا قطعه کار روی سه نظام ماشین تراش بسته و تنظیم موقعیت می‌شود. سیم پیچ متصل به دستگاه گرمادهی بوسیله یک فیکسچر در موقعیت مرکز قطعه به سمت سه نظام قرار داده و حفظ می‌شود. تجهیزات ارتعاش فراصوتی به ابزار در موقعیت آماده قرار می‌گیرد. سطح منطقه برش قطعه بوسیله سیم پیچ گرمادهی گرما دهی می‌شود که اندازه گرمادهی با ولوم دوپل (همان تنظیم کننده ولتاژ خروجی) تعبیه شده بر روی دستگاه گرما دهی و زمان گرم کردن تنظیم می‌شود. سپس دمای خروجی بوسیله یک دماسنج تماسی یا تابشی (ترموکوپل تماسی یا دماسنج لیزری) اندازه گیری می‌شود تا گرما سطح قطعه به دمای مد نظر برسد. دستگاه گرمادهی همزمان با روشن کردن مولد فراصوتی، خاموش شده و ارتعاش به نوک ابزار برش اعمال می‌شود (ابزار برشی مرتعش می‌شود). ابزار برش عملیات براده برداری را انجام می‌دهد. نکات مهم اجرای این فرآیند عبارتند از: درجه گرمادهی، دامنه ارتعاش فراصوتی، جنس قطعه کار و جنس ابزار برش. همچنین میزان گرمادهی بسته به جنس ماده قطعه کار متفاوت است.

پیشروی بر دور / (mm/rev)	۰/۰۵ - ۰/۲
عمق برش / (mm)	۰/۰۵ - ۰/۴

دو پارامتر ورودی متغیر اصلی عبارتند از:

- دمای پیش گرم در سه سطح در نظر گرفته شده است. موضوع مهم در انتخاب این دماها مطالعات گذشته، همچنین حداقل دمای پیش گرم که در آن کاهش نیروها به صورت کاملا مشهود و حداکثر دمایی که موجب تغییر ریز ساختار ماده نشود، می‌باشد. بر اساس مشخصات دمای تمپر و سختی برای CK45، حداکثر دمای مجاز جهت عدم ورود به دمای تمپر و سختی 45HRC در بازه 300°C می‌باشد که جهت اطمینان بیشینه دمای گرمایش را 250°C در نظر گرفتیم. سه سطح دمای پیش گرم قطعه به ترتیب ۲۵، ۱۵۰ و ۲۵۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده اند.
 - دامنه ارتعاش فراصوتی a در سه سطح دامنه a_1 ، a_2 و a_3 یعنی ۰، ۶ و ۸ میکرون برای این پژوهش انتخاب شده است که بتوان روند اثرگذاری این پارامتر را نیز به صورت کامل مشخص نمود.
- روش مورد استفاده در این پژوهش جهت بررسی کیفیت سطح ماشینکاری شده، از نوع تماسی و پروفایلومتر سوزنی می‌باشد [19]. دستگاه مورد استفاده از برند میتوتویو مدل SJ-201P ساخت کشور ژاپن است. در این اندازه گیری سه پارامتر R_a ، R_z و R_q بعنوان خروجی از دستگاه گرفته شد. در مطالعه حاضر، میانگین زبری سطح R_a برای نشان دادن سطح پایان سطوح ماشینکاری مورد توجه بیشتری قرار دارد زیرا بیشترین استفاده در صنایع تولیدی را دارد. لازم به توضیح است که قبل از انجام هر تست اندازه گیری زبری، سطح مورد نظر تمیز و آماده برای اندازه برداری می‌شود. واحد اندازه گیری بر حسب میکرون متر است. نمونه پروفایل دریافتی دستگاه از نوع R-Profile می‌باشد که تفاوت آن با نوع P-Profile در نحوه فیلتر کردن شکل زبری است که در حالت R-Profile با فیلتر بیشتری داده برداری انجام می‌شود [20]. در این پژوهش در مجموع ۹ تست غیر تکراری انجام شد که یعنی ۹ سطح جهت سنجش زبری سطح می‌بایست انجام شود.

۳- انجام آزمایشات

باتوجه به تجهیزات مورد استفاده در هر بخش و جهت جلوگیری از باز و بسته کردن یا جابجایی این تجهیزات در ۴ فرآیند تراشکاری، سعی شده است که آن دسته از فرآیندهایی که از نظر تغییر پارامتری و تجهیزات مورد نیاز نزدیکی بیشتری به هم دارند پشت سرهم مورد آزمون قرار گیرند بدین صورت که ابتدا تراشکاری سنتی و به کمک ارتعاش فراصوتی در چیدمان‌های تنظیمی پیوسته انجام می‌شود. سپس تراشکاری به کمک گرما و ترکیبی گرما و ارتعاش فراصوتی در چیدمان‌های بعدی تحت آزمون قرار می‌گیرند. همانطور که پیش تر شرح داده شد مناطق برشی برای فرآیندهایی که تغییر چیدمان برای تجهیزات ماشینکاری نیاز ندارند در کنار هم آزمایش می‌شوند، شکل ۴.

روش انجام تست‌ها به این گونه بوده است که تمام پارامترهای آزمایش‌هایی که نیاز به تغییر چیدمان ندارند در کنارهم در نظر گرفته شده‌اند بعنوان نمونه فرآیندهای تراشکاری سنتی و فراصوتی پشت سر

جدول ۳- پارامترهای ماشینکاری برای ۴ فرآیند

No.	Feed (mm/r)	Speed (RPM)	Depth of cut (mm)	Frequency (KHz)	Amplitude (μm)	Heat rate (°C)
1	0.1	150	0.3	20	a1	T1
2	0.1	150	0.3	20	a1	T1
3	0.1	150	0.3	20	a2	T1
4	0.1	150	0.3	20	a3	T1
5	0.1	150	0.3	20	a1	T1
6	0.1	150	0.3	20	a2	T1
7	0.1	150	0.3	20	a3	T1
8	0.1	150	0.3	20	a1	T1
9	0.1	150	0.3	20	a1	T2
10	0.1	150	0.3	20	a1	T3
11	0.1	150	0.3	20	a1	T2
12	0.1	150	0.3	20	a2	T2
13	0.1	150	0.3	20	a3	T2
14	0.1	150	0.3	20	a1	T3
15	0.1	150	0.3	20	a2	T3
16	0.1	150	0.3	20	a3	T3

Amplitude: $a_1=0\mu$, $a_2=6\mu$, $a_3=8\mu$
 Heating Temperature: $T_1=25^\circ\text{C}$, $T_2=150^\circ\text{C}$, $T_3=250^\circ\text{C}$

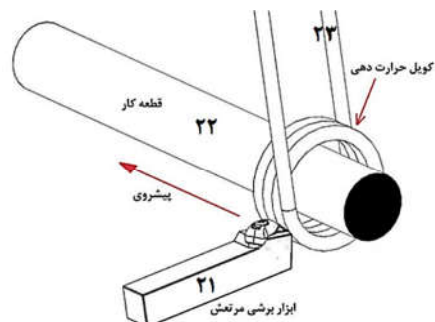
هم و بعد از آن فرآیندهای گرمادهی و ترکیبی گرم-فراصوتی تحت آزمون قرار گرفته‌اند. باتوجه به تمامی حالات موجود در مجموع ۹ تست غیر تکراری در ماشین کاری برای ۲ حالت دما و دامنه ارتعاش متفاوت وجود دارد. که برای رسیدن به جواب مطمئن و اطمینان از تکرارپذیری تست‌ها، ۲ مرتبه آن‌ها را تکرار کرده که در مجموع ۲۷ تست برای تمامی پارامترهای گفته شده انجام می‌شود.

۴-۱- نیروهای برشی

نیروی برآیند تراش که بر ابزار برش اثر می‌کند به سه مؤلفه زیر تجزیه می‌شود:

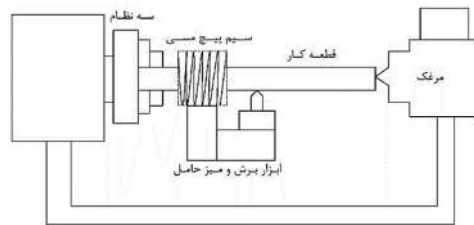
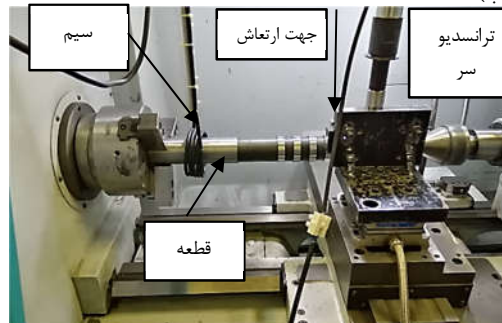
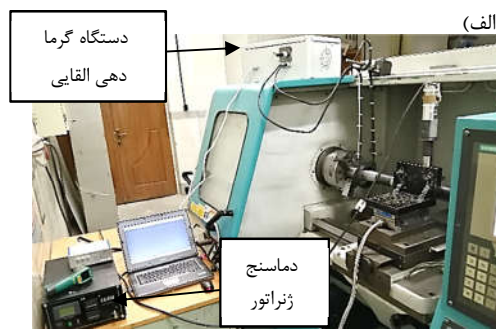
- مؤلفه مماسی: در امتداد سرعت تراش بوده و مؤلفه اصلی می‌باشد حاصل ضرب این نیرو در سرعت تراش توان لازم جهت دوران را ارائه می‌دهد
- مؤلفه محوری: در امتداد حرکت پیشروی ابزار بوده و به
- نیروی پیشروی موسوم است حاصل ضرب این نیرو در سرعت پیشروی معرف میزان توان مصرفی مورد نیاز در مکانیزم پیشروی می‌باشد
- مؤلفه شعاعی: در امتداد شعاع قطعه کار بوده و به نیروی شعاعی معروف است

در این پژوهش هر سه نیرو مورد بحث و نتیجه‌گیری انجام می‌گیرد. برای تصویر کردن نیروهای شعاعی و محوری و مماسی در جهت‌های اصلی مختصات یعنی XYZ مطابق شکل شماره ۷ بدست می‌آیند [21].



شکل ۵- طرحواره فرآیند تراشکاری ترکیبی به کمک گرمادهی و ارتعاش فراصوتی

تجهیزات موردنیاز در ۴ فرآیند تراشکاری و طرحواره چیدمان ماشینکاری در شکل شماره ۶ مشخص شده است.



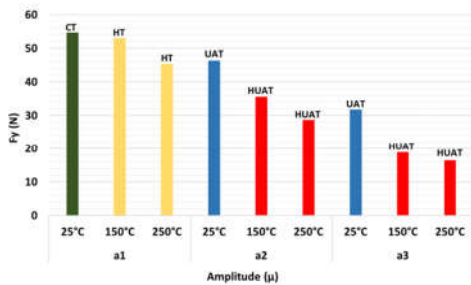
شکل ۶- تجهیزات و طرحواره چیدمان (الف) نمای کلی تجهیزات (ب) تجهیزات داخل ماشین (ج) طرحواره چیدمان

پارامترهای ماشینکاری در جدول ۳ ارائه شده است.

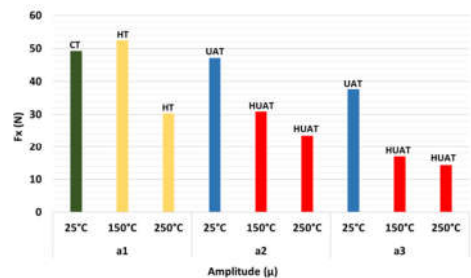
۴- نتایج و بحث

این نمودار مقدار نیروی برشی در فرآیند HT در دمای ۱۵۰ درجه می- باشد که نسبت به فرآیند UAT در دمای ۲۵ درجه در حدود ۲ درصد بیشتر است. به همین ترتیب مقدار نیروی برشی در دامنه بیشینه و دمای ۲۵ درجه از مقدار آن در دامنه و دمای بیشینه در حدود ۵۴ درصد بیشتر شده است که این اختلاف کاهشی نیرو، تاثیر ترکیب ارتعاش فراصوتی در کنار گرما را نشان می‌دهد.

در ادامه نمودار نیروهای برشی F_x و F_y نیز بررسی می‌شود. در نمودار شکل ۹ و ۱۰، نیروهای برشی F_y بررسی شده است و همانند نمودار شکل ۷، با افزایش دامنه ارتعاش و گرما، نیروها کاهش یافته اند. نیروهای F_y (نیروی شعاعی) و F_x (نیروی در راستای پیشروی) در فرآیند HUAT نسبت به تراشکاری سنتی در بیشینه حالت خود به ترتیب ۶۹ و ۷۰ درصد کاهش می‌دهند.



شکل ۹- نیرو برشی F_y با سرعت اسپیندل ۱۵۰، پیشروی ۰/۱، عمق برش ۰/۳ و سه بازه دمایی $T_1=25^\circ\text{C}$, $T_2=150^\circ\text{C}$, $T_3=250^\circ\text{C}$ و دامنه $a_1=0\mu$, $a_2=6\mu$, $a_3=8\mu$

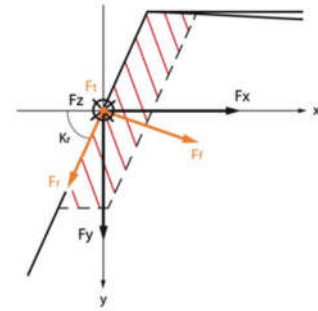


شکل ۱۰- نیرو برشی F_z با سرعت اسپیندل ۱۵۰، پیشروی ۰/۱، عمق برش ۰/۳ و سه بازه دمایی $T_1=25^\circ\text{C}$, $T_2=150^\circ\text{C}$, $T_3=250^\circ\text{C}$ و دامنه $a_1=0\mu$, $a_2=6\mu$, $a_3=8\mu$

۲-۴- بررسی کیفیت سطح

تحلیل زبری سطح به‌عنوان یک خروجی مستقیم در عملیات ماشینکاری دارای اهمیت بسیار زیادی است. به‌طورکلی مباحث مربوط به زبری سطح بسیار حیاتی است به‌این دلیل که اثر مستقیم بر عمر قطعات به‌خصوص عمر خستگی مواد و همچنین قیمت تمام‌شده‌ی یک قطعه دارد [22] و کیفیت ماشینکاری تابع مستقیمی از پارامترهای ورودی است [23].

روش مورد استفاده در این پژوهش از نوع تماسی و پروفایلومتر سوزنی می‌باشد [24]. دستگاه مورد استفاده از برند میتوتویو مدل SJ-201P ساخت کشور ژاپن است. در این اندازه‌گیری سه پارامتر R_a , R_z و R_q به‌عنوان خروجی از دستگاه گرفته شد. در مطالعه حاضر، میانگین زبری سطح R_a برای نشان دادن سطح پایان سطوح



شکل ۷- تصویر کردن نیروهای برش به دستگاه مختصات XYZ

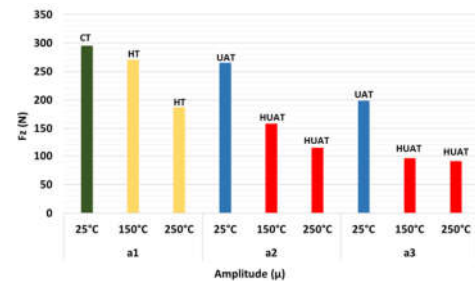
از شکل ۷ و روابط زیر برای تصویر کردن نیروهای شعاعی و محوری و مماسی در جهت‌های اصلی مختصات یعنی XYZ استفاده می‌شود. تا نیروهایی که دینامومتر نشان خواهد داد به جهت مورد نیاز و اصلی برش تبدیل شوند از این رو از ماتریس تبدیل زیر استفاده خواهد شد.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin k_r & -\cos k_r & 0 \\ \cos k_r & \sin k_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_r \\ F_t \\ F_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

مهم‌ترین نیرو به لحاظ تاثیرپذیری پارامترهای ورودی در بخش نیروی برش مربوط به راستای ارتعاش یعنی F_z می‌باشد. نمودار شکل ۸ بیشینه نیروی برشی در راستای مولفه Z را نشان می‌دهد. فرآیندهای تراشکاری به اختصار در زیرنویس هر گراف نیرویی اشاره شده است که به شرح جدول ۴ می‌باشد:

جدول ۴- فرآیندهای تراشکاری

CT	تراشکاری معمولی یا سنتی
HT	تراشکاری به کمک گرما دهی
UAT	تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی
HUAT	تراشکاری ترکیبی به کمک گرما دهی و ارتعاش فراصوتی



شکل ۸- نیرو برشی F_z با سرعت اسپیندل ۱۵۰، پیشروی ۰/۱، عمق برش ۰/۳ و سه بازه دمایی $T_1=25^\circ\text{C}$, $T_2=150^\circ\text{C}$, $T_3=250^\circ\text{C}$ و دامنه $a_1=0\mu$, $a_2=6\mu$, $a_3=8\mu$

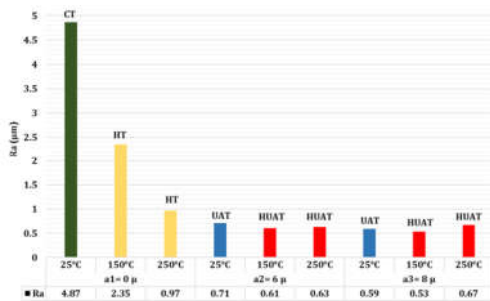
نیروی برشی در راستای ارتعاش ابزار F_z در ۴ فرآیند اجرا و نتایج در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. همانطور که در نمودار مشخص است با افزایش گرما و دامنه ارتعاش نیرو کاهش می‌یابد. بهترین نتیجه زمانی رخ داده که گرما و ارتعاش فراصوتی ترکیب شده اند یعنی فرآیند HUAT که نیرو در این فرآیند نسبت به بالاترین مقدار خود در تراشکاری سنتی در حدود ۷۰ درصد کاهش داشته است. نکته مهم در

ماشینکاری مورد توجه بیشتری قرار دارد زیرا بیشترین استفاده در صنایع تولیدی را دارد. لازم به توضیح است که قبل از انجام هر تست اندازه گیری زبری، سطح مورد نظر تمیز و آماده برای اندازه برداری می‌شود. واحد اندازه گیری بر حسب میکرون متر است. نمونه پروفایل دریافتی دستگاه از نوع R-Profile می‌باشد که تفاوت آن با نوع P-Profile در نحوه فیلتر کردن شکل زبری است که در حالت R-Profile با فیلتر بیشتری داده برداری انجام می‌شود [21]. در این پژوهش در مجموع ۹ تست غیر تکراری انجام شد که یعنی ۹ سطح جهت سنجش زبری سطح می‌بایست انجام شود. که تصاویر سنجش سطوح در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بدلیل بلند بودن طول قطعه و نیاز به ثابت نگه داشتن قطعه کار در طول اندازه گیری، از خمیرهای پلیمری استفاده شده است.

در نمودار شکل ۱۲ پارامتر R_a نمایش داده شده است و همان طور که از روی نمودار مشخص است افزودن دما موجب کاهش زبری میانگین سطح در مقایسه با تراشکاری سنتی می‌شود و از طرفی در تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی نیز افزایش دامنه فراصوتی موجب کاهش زبری می‌شود. بیشترین کاهش زبری در بین سه فرآیند تراشکاری سنتی، به کمک گرمایش القایی و به کمک ارتعاش فراصوتی مربوط به ارتعاش فراصوتی است. زمانی که گرما القایی و ارتعاش فراصوتی ترکیب می‌شوند این کاهش باز هم نمایان می‌شود اما نکته اصلی در اینجا زمانی مشخص می‌شود که افزایش گرما زیاد با دامنه ارتعاش بالا لزوماً نتیجه همگرایی نمی‌دهد و در اینجا بیشترین کاهش مربوط به فرآیند تراشکاری ترکیبی گرما و فراصوتی در بازه دمایی ۱۵۰ درجه و دامنه ۸ میکرون می‌باشد که کاهش ۸۹ درصدی در مقایسه با تراشکاری سنتی دارد. در نمودار شکل ۱۳ پارامتر R_q نمایش داده شده است و همان طور که از روی نمودار مشخص است همانند نمودار شکل ۱۲ بیشترین کاهش مربوط به فرآیند تراشکاری ترکیبی گرما و فراصوتی در بازه دمایی ۱۵۰ درجه و دامنه ۸ میکرون می‌باشد. در نهایت نمودار شکل ۱۴ پارامتر R_z نمایش داده شده است که مشخص کننده میانگین بیشترین زبری در قلعه‌ها می‌باشد. همان طور که از روی نمودار مشخص است همانند نمودار شکل ۱۲ بیشترین کاهش مربوط به فرآیند تراشکاری ترکیبی گرما و فراصوتی در بازه دمایی ۱۵۰ درجه و دامنه ۸ میکرون می‌باشد.

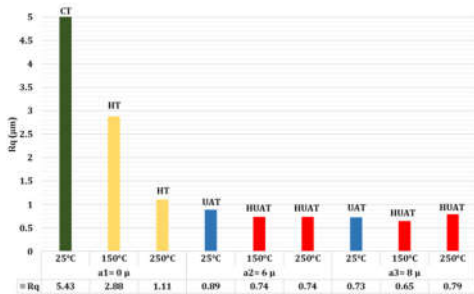
مفهوم واگرایی دامنه ارتعاش فراصوتی با افزایش نرخ گرمادهی بدین معناست که اگر چه گرما بر روی بهبود کیفیت سطح در مقایسه با تراشکاری سنتی تاثیر گذار است بطوریکه فرآیند HT در درمای بیشینه کاهش زبری ۸۰ درصدی در مقایسه با نوع سنتی دارد اما افزایش بیش از حد دمای گرمادهی مشکلاتی از قبیل امکان ایجاد تغییر در ریزساختار قطعه کار، اکسیداسیون سطحی، تغییر در صافی سطح نهایی یا افزایش زبری سطح و حتی افزایش سایش ابزار در اثر لبه انباشته را در پی خواهد داشت. به همین دلیل است که بهترین کیفیت سطح در این پژوهش در دامنه بیشینه و نرخ گرما ۱۵۰ درجه (در اینجا که در هر آزمایش بسته به شرایط ماده متفاوت است) پدیدار شده است.

تمام موارد مذکور برای دو پارامتر دیگر کیفیت سطح یعنی R_q و R_z نیز صدق می‌کند. گرما دهی سطح منطقه برش در بهبود کیفیت سطح اثر مثبتی دارد و همانطور که در نمودارها مشخص است نسبت به تراشکاری سنتی بهبود رخ داده است اما دمای زیاد تاثیر مثبت بر روی کیفیت سطح ندارد از طرف دیگر در کاهش نیروهای برشی، اثر افزایش دما بیشتر از اثر افزایش دامنه ارتعاش فراصوتی است بنابراین هدف بهره بری از مزایای دو پارامتر دما و دامنه در کنار یکدیگر بعنوان یک فرآیند تراشکاری ترکیبی نوین می‌باشد.



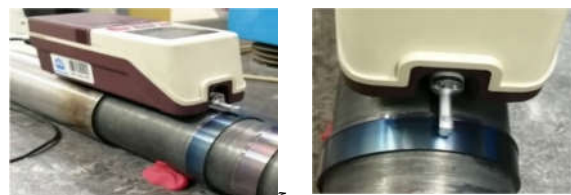
شکل ۱۲- پارامتر زبری میانگین R_a با سرعت اسپیندل ۱۵۰،

پیشروی ۰/۱، عمق برش ۰/۳ و سه بازه دمایی
 $T_1=25^\circ\text{C}$, $T_2=150^\circ\text{C}$, $T_3=250^\circ\text{C}$ و دامنه
 $a_1=0\mu$, $a_2=6\mu$, $a_3=8\mu$



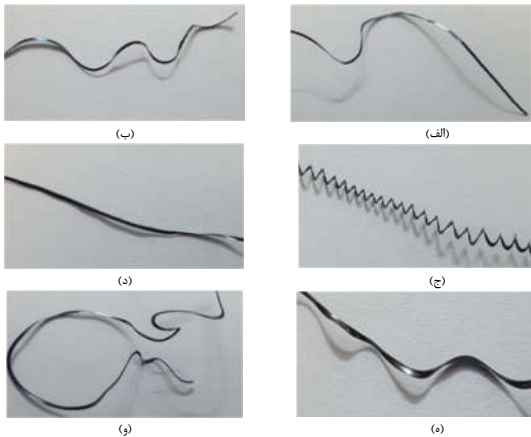
شکل ۱۳- پارامتر زبری میانگین R_q با سرعت اسپیندل ۱۵۰،

پیشروی ۰/۱، عمق برش ۰/۳ و سه بازه دمایی
 $T_1=25^\circ\text{C}$, $T_2=150^\circ\text{C}$, $T_3=250^\circ\text{C}$ و دامنه
 $a_1=0\mu$, $a_2=6\mu$, $a_3=8\mu$



شکل ۱۱- زبری سنجی سطوح مناطق آزمایش

ارتعاش فراصوتی با گرما ترکیب می‌شود و در یک فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد، شکل براده‌ها ترکیبی از دو نوع مذکور می‌باشد یعنی براده نواری شکلی که میل به منقطع شدن دارد. در این حالت به دلیل نرم تر شدن رژیم ماشینکاری از یک طرف و عدم تماس ممتد ابزار با سطح قطعه از طرف دیگر، صافی سطح قطعه کیفیت بالایی دارد. شکل ۱۶ براده‌های ۶ حالت تراشکاری به کمک گرما و ارتعاش فراصوتی در ۳ بازه دمایی و دامنه‌ای را نشان می‌دهد.

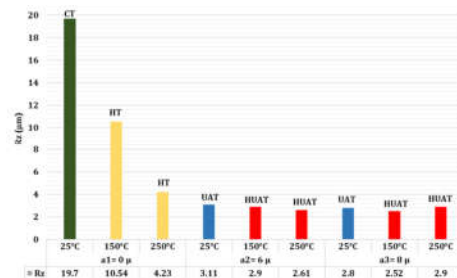


شکل ۱۶- براده‌های تراشکاری ترکیبی فراصوتی و القایی
 (الف) دمای ۱۵۰ و دامنه صفر
 (ب) دمای ۱۵۰ و دامنه ۶
 (ج) دمای ۱۵۰ و دامنه ۸
 (د) دمای ۲۵۰ و دامنه صفر
 (ه) دمای ۲۵۰ و دامنه ۸

۵- نتیجه گیری

در این مقاله قابلیت ماشینکاری ماده CK45 سخت شده در ۴ فرآیند تراشکاری سنتی، به کمک گرمادهی القایی، به کمک ارتعاش فراصوتی و تراشکاری ترکیبی گرم و فراصوتی تحت آزمایش و مقایسه قرار گرفت. روش گرمادهی از نوع القایی بود که طراحی و ساخت آن هزینه بسیار پایین تری در مقایسه با تامین تجهیزات گرمادهی دیگر از جمله لیزر یا قوس پلاسما و ایمنی بالاتری در مقایسه با روش شعله آنتش یا کوره المنتی ارائه می‌دهد. از مجموع نتایج حاصل در این پژوهش می‌توان چنین استنباط کرد:

- ۱- تراشکاری هیبریدی به کمک گرمادهی القایی و ارتعاش فراصوتی بهبود کیفیت سطح ۹۰ درصدی را نسبت به تراشکاری سنتی ارائه می‌دهد.
- ۲- در بهبود کیفیت سطح قطعه، پارامتر دامنه a اثر بیشتری در مقایسه با پارامتر دما T دارد.
- ۳- افزودن گرما در سطح قطعه و ارتعاش فراصوتی به نوك ابزار برشی سبب کاهش نیروهای ماشینکاری به میزان ۷۰ درصد در مقایسه با تراشکاری سنتی می‌شود.
- ۴- در کاهش نیروهای برشی در براده برداری از سطح قطعه، پارامتر دامنه a اثر کمتری در مقایسه با پارامتر دما T دارد.
- ۵- پارامترهای تاثیر گذار گرما بر نیروی برشی در کنار پارامترهای تاثیرگذار ارتعاش فراصوتی نتیجه همگرایی در کاهش نیروی برشی می‌دهد اما در کیفیت سطح نهایی قطعه این امر لزوماً پایدار نخواهد بود.
- ۶- بیشترین کاهش نیروهای ماشینکاری در فرآیند هیبریدی

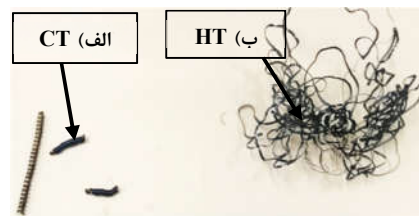


شکل ۱۴- پارامتر زبری میانگین R_a با سرعت اسپیندل ۱۵۰، پیشروی ۰/۱، عمق برش ۰/۳ و سه بازه دمایی
 $T_1=25^\circ\text{C}$, $T_2=150^\circ\text{C}$, $T_3=250^\circ\text{C}$
 $a_1=0\mu$, $a_2=6\mu$, $a_3=8\mu$

۳-۴- بررسی نحوه تشکیل براده

در تراشکاری سنتی در زمان براده برداری بدلیل سختی سطح قطعه براده‌ها بصورت مارپیچ با گام کم شکل می‌گیرد که نشان از سخت بودن تراشکاری دارد حال آنکه زمانی که گرما افزوده می‌شود بدلیل ایجاد یک رژیم نرم جهت ماشینکاری، براده برداری آسان تر شده و فرم براده‌ها بصورت نواری می‌باشد. از طرفی در تراشکاری به کمک ارتعاش فراصوتی به واسطه تماس منقطع ابزار با سطح قطعه کار، براده‌ها به شکل خرد شده و منقطع هستند [25,26]. شکل ۱۵ براده‌های دو فرآیند CT و HT را با ورودی‌های یکسان نشان می‌دهد که تفاوت آن‌ها در شکل گیری براده‌ها را کاملاً متمایز کرده است.

اما نکته مهم در شکل براده‌ها می‌باشد در زمان اعمال گرما، براده‌ها با بدلیل سهولت براده برداری از روی سطح، شکل نواری (مثل برش از



شکل ۱۵- براده‌های دو فرآیند CT و HT

روی سطح پنیر) دارند یعنی تصاویر (الف) و (د) شکل ۱۶، اما زمانی که ارتعاش فراصوتی به فرآیند بالا اضافه می‌شود براده‌ها به سمت منقطع شدن می‌روند که ناچار یک حالت مارپیچی با گام بلند در براده‌های نواری شکل ایجاد می‌کنند (تصاویر ب/ج/ه/و شکل ۱۶). این تفاوت تاثیر خود را در زمان بررسی صافی سطح قطعه و عمر ابزار نشان خواهد داد. در تراشکاری سنتی به دلیل سختی سطح قطعه براده‌های خشن و مارپیچی با گام کوچک (تصویر الف شکل ۱۵) شکل می‌گیرد که نتیجه آن کیفیت سطح پایین می‌باشد. در تراشکاری به کمک گرما به واسطه نرم تر شدن سطح قطعه براده‌ها بصورت نواری (تصویر ب شکل ۱۵) از روی قطعه برداشته می‌شوند و صافی سطح بهتری نسبت به فرآیند سنتی ارائه می‌دهد. در تراشکاری به کمک ارتعاش فراصوتی به واسطه نحوه عملکرد ابزار مرتعش شده در تماس با قطعه که بصورت پالسی (عدم تماس ممتد) می‌باشد، براده‌ها بصورت خرد شده و منقطع هستند که صافی سطح بهتری از هر دو فرآیند مذکور را دارد. در نهایت وقتی

- assisted turning. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 38(3-5), pp. 845-854, 2007.
- [9] Sharma V. and Pandey P.M., *RECENT ADVANCES IN ULTRASONIC ASSISTED TURNING: A STEP TOWARDS SUSTAINABILITY*, *Cogent Engineering* 3.1, 2016.
- [10] Panjehpour, M.R.S. Yazdi, and R. Shoja-Razavi, An experimental investigation of pulsed laser-assisted machining of AISI 52100 steel. *Optics & Laser Technology*, Vol. 63, pp. 137-143, 2014.
- [11] Muhammad R., Maurotto A., Roy A. and Silberschmidt V., *Hot ultrasonically assisted turning of β -Ti alloy*. *5th CIRP Conference on High Performance Cutting*. 2012, p. 336-341.
- [12] Farahnakian M. and Razfar M.R., Experimental study on hybrid ultrasonic and plasma aided turning of hardened steel AISI 4140. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 29, No. 5, pp. 550-55, 2014.
- [13] Xavierarockiaraj S. and Kuppan P., Influence of Process Parameters on Surface Temperature during Laser Assisted Preheating of SKD 11 Steel based on Response Surface Methodology. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 5, pp. 13451-13458, 2018.
- [14] Rudnev V. and Totten G.E., *Theoretical Background from: Handbook of Induction Heating* CRC Press. Chapter 3, pp. 95-103, 2017.
- [15] Mohammed K.A., Abdulhameed J.J. and Al-Ameen E.S., The Effectiveness of Hot machining process for the Machinability of Hard to cut materials: A REVIEW. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, Iraq, 2020.
- [16] Adina C.E., Sabin P.M., Stefan S., Dan P., Virgil V.O. and Ioan J.C., *Ultrasonic Assisted Machining for Hard-to-Cut Materials*. In *Applied Mechanics and Materials*. 2015.
- [17] <https://steelselector.sij.si/steels/CK45.html>
- [18] <https://www.dentitool.com/en/insert-details/vcgt-160404-fm-250-dx30.html>
- [19] Parida A.K. and Maity K., Modeling of machining parameters affecting flank wear and surface roughness in hot turning of Monel-400 using response surface methodology (RSM). *Measurement*, Vol. 137, pp. 375-381, 2019.
- [20] Adamczak S., Zmarzły P. and Janecki D., THEORETICAL AND PRACTICAL INVESTIGATIONS OF V-BLOCK WAVINESS MEASUREMENT OF CYLINDRICAL PARTS, *Metrol. Meas. Syst.*, Vol. 22, No. 2, pp. 181-192, 2015.
- [21] Paulo Davim J., *Traditional machining processes: Research Advances*. In *Springer International Publishing (Ed.), Innovative computational intelligence*, pp. 55-96, AG Switzerland, 2014.
- [۲۲] محمد مهدی ابوترابی، عارف سلیمی نیا. "تأثیر عملیات تبریدی روی ابزار برشی بر زبری سطح و سایش ابزار در ماشینکاری فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴". *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. د. ۵۱، ش. ۳، ۱۴۰۰.
- [۲۳] مجید امیری، شهرام یوسفی. "مطالعه تجربی و بهینه‌سازی ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر روی آلیاژ Al 7075 با استفاده از روش تاگوچی-گری". *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. د. ۴۶، ش. ۵، ۱۳۹۵.
- [24] Adamczak S., Zmarzły P. and Janecki D., THEORETICAL AND PRACTICAL INVESTIGATIONS OF V-BLOCK WAVINESS MEASUREMENT OF CYLINDRICAL PARTS, *Metrol. Meas. Syst.*, Vol. 22, No. 2, pp. 181-192, 2015.
- [25] Shunmugavel M., Goldberg M., Polishetty A., Nomani J., Sun S. and Littlefair G., Chip formation characteristics of selective laser melted Ti-6Al-4V, *AustraliAn JournAl of MechAnicAl engineering*, 2017.
- [26] Liu Y., Agmell M., Xu D., Ahadi A., Stahl J. and Zhou J., Numerical contribution to segmented chip effect on residual stress distribution in orthogonal cutting of Inconel718, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109:993-1005, 2020.

گرما و ارتعاش فراصوتی پدیدار شده است که کاهش ۷۰ درصدی را نشان می‌دهد.

۷- در فرآیند HUAT با نفوذ ابزار برشی به قطعه کار، دمای ابزار بیشترین مقدار را در بین ۴ فرآیند دارد که البته در حالت برگشت کاهش می‌یابد و این خود یک عمل بازدارنده در تشکیل لبه انباشته بر روی ابزار برشی می‌باشد.

۸- در بخش بررسی نحوه تشکیل براده، در تراشکاری سنتی به دلیل سختی سطح قطعه براده های خشن و مارپیچی با گام کوچک شکل می‌گیرد که نتیجه آن کیفیت سطح پایین می‌باشد اما با افزودن گرما براده ها بدلیل سهولت براده برداری از روی سطح، شکل نواری به خود می‌گیرند و از طرفی افزودن ارتعاش فراصوتی به فرآیند فوق بواسطه نحوه عملکرد ابزار مرتعش شده در تماس با قطعه که بصورت پالسی می‌باشد، براده‌ها بصورت خرد شده و منقطع هستند. در این حالت به دلیل نرم تر شدن رژیم ماشینکاری از یک طرف و عدم تماس ممتد ابزار با سطح قطعه از طرف دیگر، صافی سطح قطعه کیفیت بالایی دارد.

توجه به این نکته بسیار مهم است که دمای سطح قطعه کار گرم شده در لحظه قبل از تماس ابزار کمی کاهش یافته که بدلیل اتلاف دمایی مربوط به زمان عقب کشیدن سیم پیچ گرمای تا تماس ابزار به سطح قطعه می‌باشد لذا این مقدار اتلاف دمایی را می‌بایست در زمان پیش گرمایش لحاظ کرد (در اینجا اتلاف دمایی اندازه گیری شد که در حدود ۲۵الی ۳۰ درجه بود و سپس این میزان به دمای اولیه پیش گرمایشی افزوده شد و مجدداً تحت آزمون قرار گرفت و صحت آن تایید شد).

۶- مراجع

- [1] Rahim E., Warap N. and Mohid Z., *Thermal-Assisted Machining of Nickel-based Alloy*, Chapter1. Advanced Machining Research Group, University Tun Hussein Onn Malaysia, Parit Raja, Batu Pahat, Johor, Malaysia, 2015.
- [۲] میرمحمدصادقی ا. و امیرآبادی ح. بررسی فرآیند ماشین کاری هیبریدی سوپراآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار و بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای فرآیند. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. د. ۴۹، ش. ۱، ۱۳۹۸.
- [3] Takeyama, H., and S. Kato. "Burrless drilling by means of ultrasonic vibration." *CIRP annals* Vol. 40.1 pp. 83-86, 1991.
- [4] Lei S. and fefferkorn F., A REVIEW OF THERMALLY ASSISTED MACHINING. *Proceedings of the 2007 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2007*, Atlanta, Georgia, USA, 2007.
- [5] Przystackil D. and Jankowiak M., Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials, *14th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Journal of Physics: Conference Series* 483, 2014.
- [6] Lucia O., Maussion P., Dede E.J. and Burdio J., *Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 61, pp. 2509-2520, 2013.
- [7] Farahnakian M., Razfar M. and Biglari F., Analytical and experimental modeling of cutting force in plasma assisted turning of hardened steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 108-116, 2015.
- [8] Ahmed N., A. Mitrofanov V., Babitsky V.I. and Silberschmidt V.V., Analysis of forces in ultrasonically