



مطالعه تأثیرات درجه حرارت پیش گرم بر فرایند تراشکاری فولاد CK45

سید احسان افتخاری شهری^{۱*}، سید محمدرضا سدهئی^۲، هادی ایزدی^۳

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: e.eftekhari@birjandut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۵ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۵ آبان ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

تراشکاری

شبیه سازی

پیش گرم

فولاد CK45

براده

در بسیاری از صنایع که با فرآیندهای ماشینکاری در ارتباط هستند، فاکتور اساسی برای کاهش هزینه‌ی کلی تولید، انتخاب شرایط ایده‌آل ماشینکاری است. حرارت قطعه یک عامل بسیار مؤثر در فرآیندهای ماشینکاری می‌باشد که در این مطالعه، تأثیر این پارامتر بر رفتار براده و نیروهای وارد بر ابزار در ماشینکاری فولاد CK45 مورد بررسی قرار گرفته است. از سه دمای پیش‌گرم ۲۵، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای پیش‌گرم قطعه پیش از عملیات تراشکاری استفاده شد و متغیرهای تشکیل براده بررسی گردید. همچنین با ایجاد مدل اجزای محدود از فرایند، ماشینکاری قطعه و تشکیل براده در ماده شبیه‌سازی شد که نتایج تطابق خوبی با آزمایشات تجربی را نشان می‌دهد. با تأیید مدل اجزاء محدود، مقدار نیروی ماشین‌کاری، تنش‌های حرارتی و سایش در فرایند به کمک مدل اجزای محدود ارزیابی شد. بر اساس نتایج بدست‌آمده مشخص شد که بیشترین انحناء براده در دمای پیش‌گرم ۷۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. همچنین بیشترین ضخامت تغییر شکل یافته براده در دمای پیش‌گرم ۲۵ درجه و کمترین مقدار آن در دمای پیش‌گرم ۷۰ درجه سانتی‌گراد بوده‌است. نیروهای وارد بر ابزار در راستاهای Y و X با کاهش دما بیشتر شده اما نرخ حرارت نوک ابزار تا دمای ماشینکاری ۷۰ درجه سانتی‌گراد افزایش و بعد از آن به علت کمتر شدن اصطکاک به طرز چشم‌گیری و تا حدود ۶۰٪ کاهش یافته‌است.

Studying the effects of preheat temperature on the turning process of CK45 steel

Seyyed Ehsan Eftekhari Shahri^{1*}, Sayyed Mohammadreza Sedehi², Hadi Izadi³

1- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

2- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

3- BSc Student, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

* Corresponding Author's Email: e.eftekhari@birjandut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 17 October 2023

Accepted: 6 November 2023

Keywords:

Turning
Simulation
Preheat
CK45 steel
Chip

Abstract

In many industries that are related to machining processes, the basic factor to reduce the overall cost of production is the selection of ideal machining conditions. The piece temperature is a very effective factor in machining processes, and in this study, the effect of this parameter on the behavior of the chip and the forces on the tool in the machining of CK45 steel has been investigated. Three preheating temperatures of 25, 70, and 100°C were used to preheat the part before turning, and the variables of chip formation were investigated. Also, by developing a finite element model (FEM) of the process, the machining of the part and the formation of chips in the material were simulated, which shows a good agreement with the experimental tests. After FEM validation, the amount of machining force, thermal stresses and wear in the process was evaluated with the help of FEM. Based on the obtained results, it was found that the maximum curvature of the chip occurs at the preheat temperature of 70 degrees Celsius. Also, the maximum deformed thickness of the chip was at a preheat temperature of 25 degrees Celsius and the lowest value was at a preheat temperature of 70 degrees Celsius. The forces applied on the tool in the Y and X directions increased with the decrease in temperature, but the heating rate of the tool tip increased up to the machining temperature of 70 degrees Celsius, and after that, due to the reduction of friction, it has been significantly reduced to about 60%.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Eftekhari Shahri SE, Sedehi SM, Izadi H. Studying the effects of preheat temperature on the turning process of CK45 steel. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Apr 21;10(2):22-32. doi: 10.22034/IJME.2023.421232.1863 [In Persian]

۱- مقدمه

افزایش عمر و کارایی اجزای ساخته شده به روش ماشین کاری همواره مورد توجه بوده است، لذا در سال‌های اخیر خصوصیات و تغییرات به وجود آمده در قطعه و ابزار در فرآیندهای ماشینکاری، بطور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱، ۲]. پارامترهای ماشینکاری از جمله شرایط برش و هندسه‌ی ابزار به دلیل تأثیری که به لحاظ شرایط ماشینکاری دارند حائز اهمیت هستند [۱، ۳]. تحقیقاتی توسط محققین بر روی دمای قطعه، براده و ابزار به عنوان پارامترهای مهم ماشین کاری انجام شده است. سولر و همکاران [۴] در پژوهشی بر روی دمای ابزار، میزان عمر ابزار را بررسی کرده‌اند. کاهش عمر ابزار باعث افزایش زمان تعویض ابزار و در نهایت افزایش هزینه‌ی اقتصادی می‌شود. دمای برش همچنین بر روی تنش‌های سطح قطعه در ماشینکاری تأثیر می‌گذارد [۵، ۶]. حرارت منطقه برش نیز در برخی از تحقیقات مورد توجه قرار گرفته است. نینگ و لیانگ [۷] یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی حرارت در منطقه‌ی برش اولیه و رابطه بین ابزار و براده بر اساس رابطه بین نیرو و دما ارائه دادند. با وارد کردن پارامترهای شرایط برش، نیروهای ماشینکاری و ثابت‌های مدل سازنده می‌توان دما را با دقت بالا محاسبه کرد. برای لحاظ تغییرات افزایشی و کاهش دما، یک روش مبتنی بر مدل تحلیلی برای تخمین دمای ابزار توسط وو و همکاران ایجاد شد [۸]. علاوه بر این، میرکوهی و همکاران [۹] یک مدل تحلیلی مبتنی بر فیزیک برای تعیین دمای ماشینکاری ارائه دادند. هدف از مدل آن‌ها طراحی سرعت و عمق برش برای دمای مطلوب بر اساس شیب تکرار بود. ریچاردسون و همکاران [۱۰] نیز یک مدل نظری برای ارزیابی اثر پارامترهای برش بر دمای قطعه تبیین کردند. این تحقیق نشان داد که با افزایش سرعت برش، دمای قطعه‌ی کار به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. برای تحلیل پارامترهای برش در دمای ابزار، کاراگوزال و همکاران [۱۱، ۱۲] مدل دمایی کاملاً تحلیلی را برای مطالعه پارامترهای دمای ابزار برش در طی ماشینکاری ارائه دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت و عمق برش، دمای ابزار افزایش می‌یابد. بر اساس نظریه انتقال حرارت و معادله ساختاری ماده، لی و همکاران [۱۳] یک مدل حرارتی برای پیش‌بینی توزیع دما در منطقه برش در طی فرایند برش توسعه دادند. نتایج نظری و آزمایشات ایشان نشان داد که در سطح پایین دمای ابزار با سرعت برش رابطه عکس دارد، اما در دامنه نسبتاً بالاتر، با افزایش سرعت برش مجدداً افزایش می‌یابد. این در حالیست که با افزایش سرعت برش، دما در سطوح جانبی کاهش می‌یابد. به منظور ساده‌سازی مدل دما، سوتر و همکاران [۱۴] ترکیبی از روش‌های تجربی و تحلیلی را برای پیش‌بینی میدان دما در براده پیشنهاد کردند. در روش ترکیبی آن‌ها، پارامترهای ورودی مدل تحلیلی مانند طول تماس براده و ضریب اصطکاک بر اساس روش تجربی بدست آمده است. کریژانویس و همکاران [۱۵] یک مدل تحلیلی معکوس برای محاسبه شار حرارتی و ضرایب انتقال حرارت بر اساس داده‌های تجربی برای تخمین دمای ابزار برش در ماشینکاری ارائه کردند. هوانگ و یانگ [۱۶] با در نظر گرفتن تأثیر زمان گرمایش بر روی قطعه‌ی کار، مدل دمای بهبود یافته‌ای را برای تحلیل توزیع دما قطعه کار در فرایند برش ارائه دادند.

دینگ و همکاران [۱۷] از یک مدل انعطاف‌پذیری مبتنی بر چگالی جابجایی برای شبیه‌سازی اندازه‌ی دانه در طول برش متعام فلز تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از نرم افزار آباکوس استفاده و با کالیبراسیون پارامترهای کنترلی در مدل جابجایی وابسته به دما، اندازه متوسط دانه‌ها را پیش‌بینی کردند. لیو و همکاران [۱۸] از یک مدل تکامل ریزساختار برای شبیه‌سازی برش‌های متعام مس برای چندین سرعت برش استفاده کردند که نتایج نشان داد تغییرات قابل توجه ریزساختار دانه در مناطق بزرگ در مجاورت و در ناحیه برش اولیه براده بوده است. جعفریان و همکاران [۱۹] ثابت‌های جانسون کوک اینکونل ۷۱۸ را با استفاده از برش‌های متعام شناسایی و تأثیر هندسه ابزار بر روی تغییرات ریزساختاری با استفاده از نرم‌افزار دفرم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش زاویه براده و شعاع نوک قلم باعث افزایش سختی سطح و کاهش اندازه دانه سطح می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش دادند که عمق پوشش لبه ابزار نسبت به دیگر پارامترهای هندسی هر ابزار با اهمیت‌تر است. کاروسو و همکاران [۲۰] با شبیه‌سازی تغییرات اندازه‌ی دانه و سختی را در سطح و زیر سطح اجزای ماشینکاری شده بر اساس معادلات زنر-هالومون و هال-پیچ و با استفاده از نرم‌افزار دفرم بدست آوردند. نتایج نشان داد هم سرعت برش و هم سرعت پیشروی، سطح ماشینکاری شده و یکپارچگی زیر سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. جعفریان و همکاران [۲۱] یک مدل مبتنی بر اندازه دانه را با نرم‌افزار دفرم شبیه‌سازی کردند تا بتوانند تأثیر تغییرات خواص مواد در ماشینکاری متعام اینکونل ۷۱۸ را تخمین بزنند. آن‌ها مشاهده کردند که تغییرات در مدل ماده باعث تغییر رفتار مواد در طول روند برش و در نتیجه بهبود دقت پیش‌بینی اندازه دانه می‌شود.

پژوهش‌های فوق نشان می‌دهد که تحلیل‌های جامعی برای بررسی تغییرات اندازه دانه ناشی از ماشینکاری، هم از نظر هندسه ابزار و هم شرایط برش به صورت تجربی، عددی و تحلیلی انجام شده است. همچنین اثر دمای ابزار و قطعه‌ی کار نیز مورد توجه محققان بوده است؛ اما تأثیر درجه حرارت پیش گرم ماده بر رفتار براده، شرایط ماشین کاری و نیروهای برش کمتر مورد توجه بوده است. به همین منظور در این مطالعه، با استفاده از فرایند تجربی و مدل سازی عددی، رفتار براده و نیروهای وارد بر ابزار در ماشینکاری فولاد CK45 مورد بررسی قرار گرفته است. این فولاد یکی از مهمترین مواد مورد استفاده در صنایع است و بررسی رفتار ماشین کاری آن بسیار حائز اهمیت است و تاکنون گزارش های کمتری به تأثیر دمای پیش گرم برای این فولاد پرداخته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ماده اولیه

به واسطه اهمیت بالا و کاربردهای گسترده فولاد CK45 در صنعت، این فولاد به عنوان ماده اصلی آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایشات بر روی میلگردهای فولادی به قطر ۶۰ میلی متر انجام شده است. این فولاد از خانواده فولادهایی با قابلیت عملیات حرارتی می‌باشد که با توجه به خصوصیات بسیار خوب مکانیکی و متالورژیکی، در صنایع مختلف مانند نفت و گاز، پتروشیمی، قالب سازی، خودروسازی، غذایی و دارویی، معدن، کشاورزی و تجهیزات آزمایشگاهی جایگاه ویژه‌ای دارد. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد CK45 و در جدول ۲ خواص ابزار مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد CK45 [۲۲]

Cu	Al	Mo	P	Ni	Mn	Cr	S	Si	C
0.02	0.01	0.02	0.01	0.09	0.47	0.090	0.015	0.2	0.42

جدول ۲ خواص مکانیکی و حرارتی قطعه کار و ابزار

ابزار (WC)	قطعه کار (CK45)	متغیر
۱۵	۷/۸	چگالی (kg/m ³)
۶۳۰	۱۹۰	مدول یانگ (GPa)
۰/۲۴	۰/۲۹	ضریب پواسون
۸۵	۵۱	رسانایی گرمایی (W/m-K)
۲۸۰	۴۷۰	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg-K)
۵/۴	۱۲	انبساط حرارتی (μm/m-K)

۲-۲- فرایند پیش گرم

در فرآیند پیش گرم، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اکسی استیلن و با رنج شعله ملایم بصورت دوار مورد گرمایش قرار گرفته و دمای لحظه‌ای قطعات با ترمومتر سنجیده شده است. روش‌های اندازه‌گیری دما را می‌توان به روش‌های تماسی و غیرتماسی تقسیم‌بندی کرد [۲۳]. روش‌های تماسی در درجه حرارت‌های بالا دارای محدودیت در عملکرد می‌باشند و لذا در فرایندهای داغ کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری دما به روش غیرتماسی بیشتر بر اساس مقدار تابش فروسرخ که جسم هدف از خود به محیط ساطع می‌کند توسعه یافته است. ترمومترهای تفنگی یا لیزری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، از جمله دماسنج‌های غیرتماسی پر کاربرد هستند. برای جبران افت حرارت از لحظه قطع تماس شعله تا آغاز فرایند ماشینکاری، نمونه‌ها در مرحله حرارت‌دهی بین ۱۰ تا ۱۵

درجه بیشتر از دمای مورد نظر در آزمایش گرم شده است. از دستگاه تراش ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز جهت ماشین‌کاری استفاده شده است.



شکل ۱ الف) و ب) نحوه اندازه‌گیری دما، ج) ترمومتر جهت اندازه‌گیری دمای لحظه‌ای

۲-۳- فرایند ماشینکاری

بلافاصله بعد از پیش‌گرم قطعات در سه‌دمای ۲۵، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، فرایند ماشینکاری با دستگاه تراش و بدون مایع خنک‌کننده و یا روانکار و با استفاده از ابزار برش تنگستن کاربید با شرایط جدول ۳ بر روی فولاد CK45 انجام پذیرفته است. این محدوده دمایی با لحاظ عدم تغییر خواص متالورژیکی فولاد انتخاب شده است [۲۴].

جدول ۳ شرایط تجربی ماشینکاری

مقدار	متغیر
۲۵-۷۰-۱۰۰	دمای اولیه نمونه (°C)
۲۵۰	سرعت ماشینکاری (rpm)
۰/۱	سرعت پیشروی (mm/rpm)
۱	شعاع نوک ابزار (mm)
-	مایع خنک‌کننده

۲-۴- شبیه‌سازی

روش اجزای محدود رایج‌ترین روش عددی برای حل مسائل مهندسی است. در این پژوهش فرایند ماشینکاری تراش میلگرد با استفاده از نرم‌افزار دیفرم و طبق متغیرهای مندرج در جدول ۴ شبیه‌سازی شده است.

جدول ۴ متغیرهای شبیه‌سازی

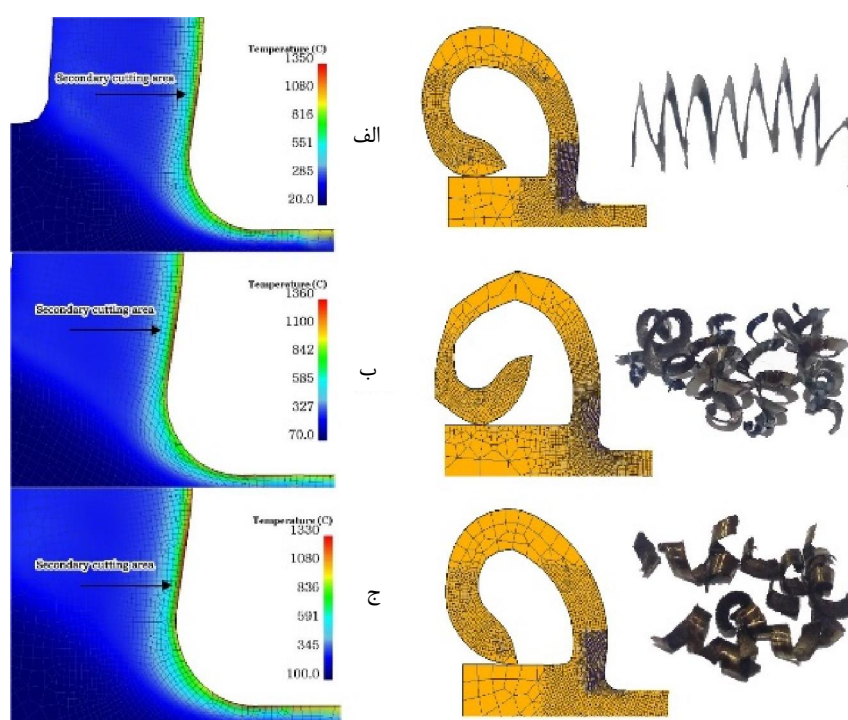
پارامتر	مقدار
پیچیدگی شبیه‌سازی	کامل
جنس ابزار	WC
تعداد المان مش‌بندی	۳۰۰۰
تعداد گره مش‌بندی	۵۰۰
سرعت پیشروی	۰/۱ میلی‌متر بر دور
سرعت اسپیندل	۲۵۰ متر بر دقیقه
طول برش	۳۵ میلی‌متر
ضریب اصطکاک	۰/۶
تعداد کل مراحل شبیه‌سازی	۱۰۰۰
تعداد مراحل گزارش شبیه‌سازی	۱۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر درجه حرارت پیش گرم بر رفتار براده

نتایج بدست آمده از آزمایشات تجربی، تأثیر زیاد دمای اولیه قطعه در ماشینکاری فولاد CK45 را بر رفتار براده نشان می‌دهد. در این تحقیق پنج متغیر مهم شامل دما و شکل ظاهری براده، میزان عمق نفوذ حرارت در سطوح ماشینکاری شده، میزان سایش و نیروهای وارده بر لبه ابزار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۲ رفتار براده را در سه دمای آزمایش در عمل و شبیه‌سازی نشان می‌دهند. عمل تشکیل براده یک تغییر شکل الاستیک-پلاستیک در لایه‌های فلز بوده که نوع براده تشکیل شده به جنس قطعه‌ی کار و شرایط تراشکاری بستگی دارد [۲۵]. با توجه به نتایج آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل ۲، فرم براده به ترتیب در دماهای ۲۵، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به صورت ممتد (شکل ۲ الف)، منفصل با لبه انباشته (شکل ۲ ب) و منفصل (شکل ۲ ج) ایجاد شده است. در علم ماشینکاری، براده ممتد از مواد نرم مانند مس و آلومینیوم تشکیل شده و نوع ممتد با لبه انباشته براده نیز هنگامی ایجاد می‌شود که میزان اصطکاک ابزار و قطعه به مقداری برسد که باعث جوش خوردن براده به سطح ابزار گردد. شکل‌گیری براده منفصل، در تراش مواد شکننده به علت کرنش بسیار کم در ناحیه اولیه تغییر شکل اتفاق می‌افتد. این پدیده در تراش فلزات نرم، متأثر از سرعت برشی کم و نرخ پیشروی زیاد رخ می‌دهد [۲۵]. با توجه به ثابت بودن شرایط تراش در این پژوهش برای تمامی نمونه‌ها، می‌توان افزایش شکنندگی براده به ازای افزایش دمای پیش گرم را به شکننده شدن ماده بر اثر حرارت و کم شدن کرنش در ناحیه اولیه تغییر شکل مربوط دانست. اکثر نظریه‌های ماشینکاری نوع منفصل براده را به عنوان بهترین نوع براده به جهت کاهش نیروها و افزایش طول عمر ابزار، معرفی کرده‌اند [۲۵]. دلیل این موضوع افزایش فرسودگی قلم با براده لبه انباشته و ایجاد مزاحمت برای اپراتور با براده فنری می‌باشد. هنگامی که ماده‌ای تغییر شکل کشسان می‌یابد، انرژی لازم برای انجام این عمل به صورت انرژی کرنش در ماده ذخیره شده و گرمایی پدید نمی‌آید، اما در تغییر شکل مومسان، بخش عمده‌ای از انرژی مصرف شده به گرما تبدیل می‌شود [۲۶]. در فلز تراشی، ماده در معرض کرنش‌های بسیار زیاد قرار می‌گیرد و تغییر شکل کشسان تنها بخش کوچکی از کل تغییر شکل است. لذا می‌توان تصور کرد که در این حالت تقریباً تمام انرژی به گرما تبدیل شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود بیشترین حرارت ایجاد شده در براده مربوط به نقطه‌ای است که با ناحیه ثانویه برش تماس دارد. لذا درجه حرارت این ناحیه حائز اهمیت است. با توجه به شکل ۲، بیشترین دمای ایجاد شده در براده مربوط به دمای پیشگرم ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد (برابر با ۱۳۶۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. مقدار بیشترین دمای براده در دمای پیشگرم ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از دو دمای دیگر کمتر و برابر

۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با در نظر گرفتن نظریه تولید گرما در تغییر شکل‌های کشسان و مومسان، این نتیجه می‌تواند به دلیل نرم شدن ماده بر اثر حرارت بالای پیش گرم و کم شدن اصطکاک بین ابزار و قطعه باشد.



شکل ۲ توزیع حرارت و فرم ظاهری براده (الف) براده ممتد فتری در دمای ۲۵، (ب) براده با لبه انباشته در دمای ۷۰، (ج) براده منفصل در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

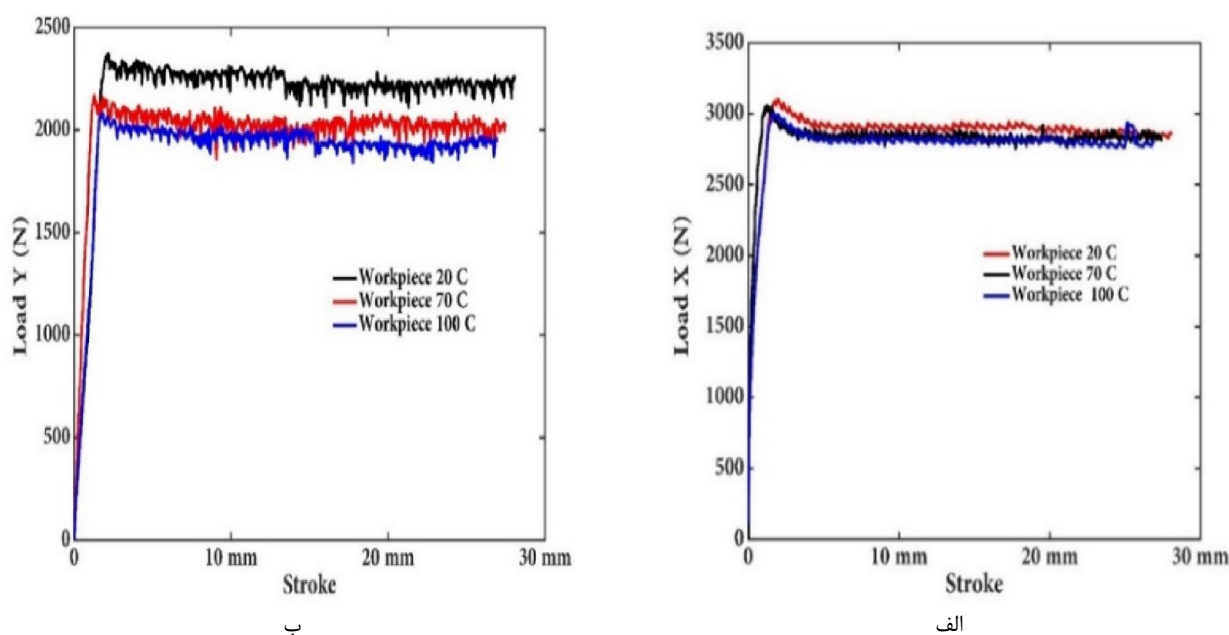
همچنین در شکل ۲ مشاهده می‌شود که بیشترین عمق متأثر از حرارت در براده نمونه‌ی سوم ایجاد شده که این موضوع باعث شکنندگی بیشتر براده شده است. در موضوع نوع فرم براده، این متغیر با افزایش عمق متأثر از حرارت به دلیل فراگیر شدن تدری در تمامی نواحی براده، شکنندگی بیشتری پیدا می‌کند. مقادیر تجربی و شبیه‌سازی شده متغیرهای مهم براده که در شکل ۲ و جدول ۵ نشان داده شده است تطابق نزدیک و قابل قبولی را ثبت کرده است، به گونه‌ای که بیشترین اختلاف دمای براده اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی به میزان ۱/۸٪ و مربوط به دمای پیش گرم ۲۵ درجه مطابق با جدول ۵ می‌باشد. لذا از مدل اجزای محدود ایجاد شده می‌توان جهت تحلیل فرایند ماشین‌کاری این فولاد استفاده کرد.

جدول ۵ نتایج تجربی و شبیه‌سازی رفتار براده

دمای اولیه قطعه کار (°C)			متغیر	
۱۰۰	۷۰	۲۵		
۱۷۲۴	۱۹۴۵	۱۸۱۲	تجربی	بیشینه حرارت براده
۱۷۱۰	۱۹۲۰	۱۷۸۰	شبیه‌سازی	
منفصل	منفصل با لبه انباشته	پیوسته	تجربی	فرم براده
			شبیه‌سازی	

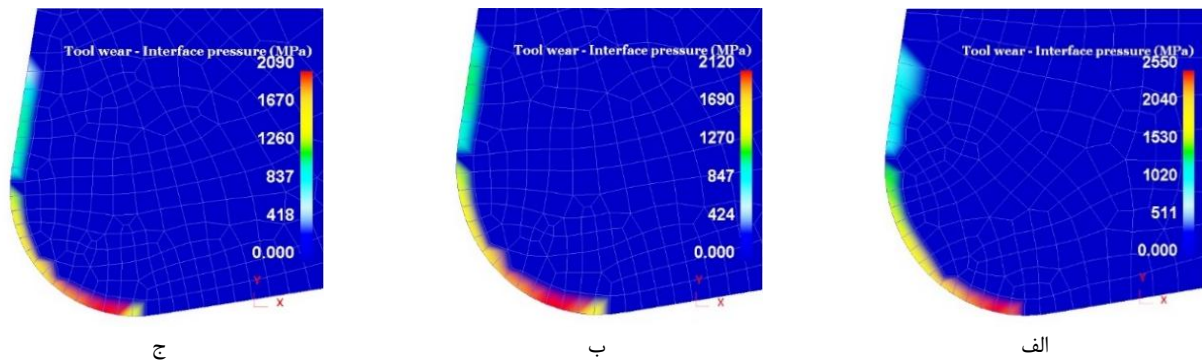
۳-۲- تأثیر درجه حرارت پیش گرم بر نیروها و فشار وارد بر ابزار

برایند همه نیروهای وارد بر ابزار از طرف قطعه کار، نیروی مقاوم برشی نامیده شد که در عمل مولفه‌های این نیرو، در جهت امتداد پیشروی قطعه و عمود بر محور قطعه قرار دارند. عمل برش هنگامی امکان پذیر می‌شود که کوپل موجود روی ماشین تراش، بزرگتر یا حداقل برابر ممان مقاوم برشی قطعه شود [۲۵]. با در نظر گرفتن نتایج مربوط به نوع فرم براده که ترد و شکننده شدن ماده به ازای افزایش دمای پیش گرم را نشان داده است و با توجه به افزایش نیروی ماشینکاری در مواد نرم، شکل ۳ مقدار نیروی برش در دو جهت، هم راستا با محور قطعه (راستای X) و عمود بر محور قطعه (راستای Y) به ازای میزان پیشروی ابزار برای دماهای پیش گرم مختلف نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ الف نشان داده شده است در راستای پیشروی (X) مقدار نیروی برش با تغییر دمای پیش گرم، تغییر محسوسی نداشته اما مطابق شکل ۳ ب مقدار نیروهای وارد بر لبه ابزار با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد. کاهش نیروی برش سبب کاهش توان مصرفی ماشین نیز می‌شود که این عامل را می‌توان در قیمت تمام شده نیز موثر دانست.



شکل ۳ نیروی وارد بر نوک ابزار بر حسب جابجایی (الف) نیروی افقی، (ب) نیروی عمودی

بررسی نمودارهای نیرو در شکل ۳ شوک ناشی از لحظه درگیری ابزار و قطعه را به صورت شیبی تند و کوتاه در ابتدای فرایند نشان می‌دهد، اما بلافاصله بعد از آغاز درگیری، نمودار نیروها پس از اندکی کاهش، حالت نوسانی و با شیب پایدار ایجاد می‌کنند. با توجه به عدم انقطاع نمونه و ثابت بودن شرایط تراش، این نوسان می‌تواند به علت ارتعاشات موجود در دستگاه شامل ارتعاشات ابزار، نمونه و دستگاه باشد. رفتار مشابهی برای نیرو در مرجع [۲۷] گزارش شده است. در شکل ۴ مقدار فشار وارد بر لبه ابزار در نقاط مختلف نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، بیشترین فشار اعمالی در ناحیه تلاقی سطح براده و آزاد و به ترتیب برای دماهای ۲۵، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با مقادیر ۲۵۵۰، ۲۱۲۰ و ۲۰۹۰ مگاپاسکال ثبت شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در هر سه دمای پیشگرم، کمترین فشار وارد بر ابزار در ناحیه تماس سطح ابزار و براده که به ناحیه ثانویه برش معروف است، دیده می‌شود.

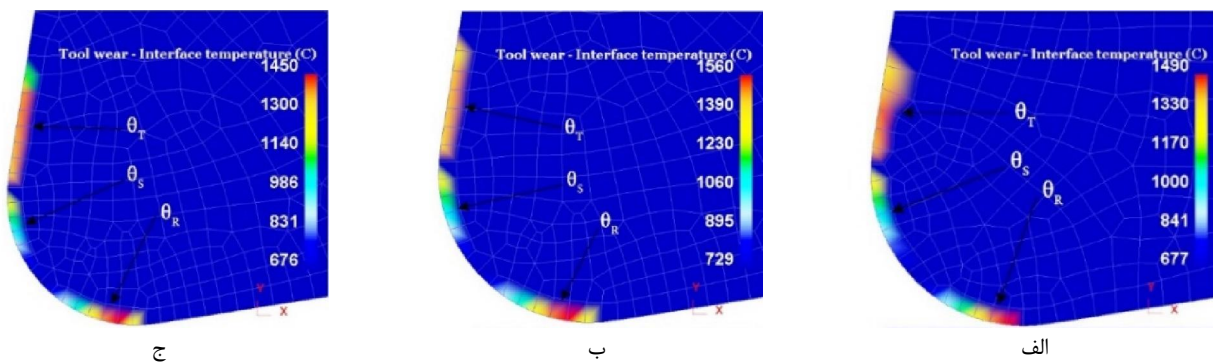


شکل ۴ فشار وارد بر نواحی مختلف ابزار بر حسب جایجایی

۳-۳- تأثیر درجه حرارت پیش گرم بر توزیع حرارت ابزار

در برش فلزات، درجه حرارت چند ناحیه از ابزار اندازه گیری می شود تا نهایتاً منجر به تعیین درجه حرارت روی سطح ابزار گردد [۲۵]. به طور کلی سه ناحیه تولید حرارت در برش فلزات وجود دارد که در شکل ۵ نشان داده شده است: ناحیه ی اول تغییر شکل، واقع در صفحه برش که درجه حرارت در آن صفحه با θ_s نشان داده می شود. ناحیه ثانویه تغییر شکل، بین سطح ابزار و براده که درجه حرارت در این ناحیه با θ_T نشان داده می شود. ناحیه سوم تغییر شکل، بین سطح آزاد قلم و سطح ماشین کاری شده که درجه حرارت در این ناحیه با θ_R نشان داده می شود.

با مقایسه توزیع حرارت ابزار در سه دمای مختلف در شکل ۵، بیشترین دمای ایجاد شده در ابزار مربوط به دمای های پیش گرم ۷۰ درجه و سپس ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد است که به ترتیب بیشترین مقادیر دمای ابزار برابر ۱۵۶۰، ۱۴۹۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد بدست آمده است. با استفاده از این نتایج، متغیر حدی بهینه جهت کاهش بار حرارتی ابزار تعیین می شود. همچنین شکل نشان می دهد بیشترین حرارت تولیدی در ناحیه سوم تغییر شکل رخ داده است. لذا از آنجا که افزایش حرارت این ناحیه احتمال بروز عیب آستانه فرسایش را نسبت به عیب گودال فرسایش بیشتر می کند، شکل ۵ نشان می دهد دمای پیش گرم ۷۰ درجه دارای عیب گودال فرسایش کمتری است.



شکل ۵ دمای لبه ابزار در الف (۲۵، ب) ۷۰، ج) ۱۰۰ درجه سانتی گراد

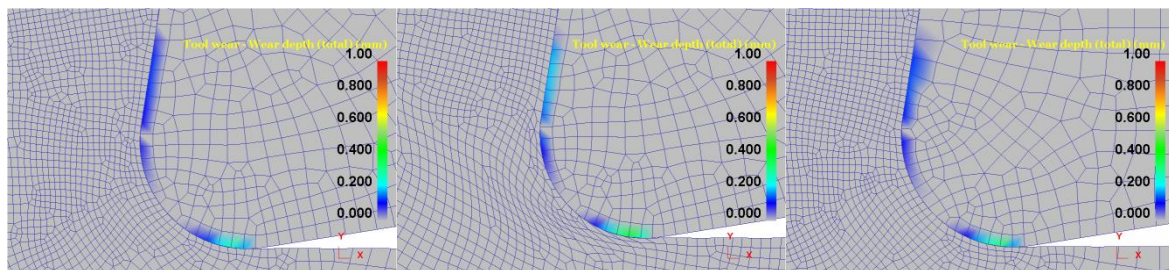
۴-۳- تأثیر درجه حرارت پیش گرم بر سایش ابزار

توان مصرف شده در فرایند برش فلزات به مقدار زیادی در ناحیه لبه برنده به حرارت تبدیل شده و با افزایش حرارت تولید شده، سایش ابزار در سطح براده به صورت گودال فرسایش و در سطح آزاد به صورت آستانه فرسایش، باعث کاهش عمر قلم می شود [۲۵]. شکل ۶ نتایج شبیه سازی را برای سایش ابزار نشان می دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده، دمای براده در منطقه ثانویه برش به بالاترین سطح می رسد که این متغیر، تأثیر مستقیمی بر عمر ابزار از طریق عیب گودال فرسایش در لبه ابزار دارد. یکی از عوامل موثر بر قیمت تمام شده محصول، عمر ابزار است که با ارتقای زمان عمر مفید ابزار می توان هزینه های تولید را کاهش داد. متغیرهای تأثیرگذار بر عمر

مفید ابزار عبارتند از: دمای فرآیند، اصطکاک و نیروهای وارده بر ابزار. مطابق شکل ۶ کمترین عمق سایش ابزار به ترتیب در دماهای ۱۰۰، ۲۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مقادیر ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌متر به ثبت رسیده است. سایش بیشینه در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد را می‌توان به ترد شدن و عدم چسبندگی ماده و نهایتاً افزایش اصطکاک نسبت داد.

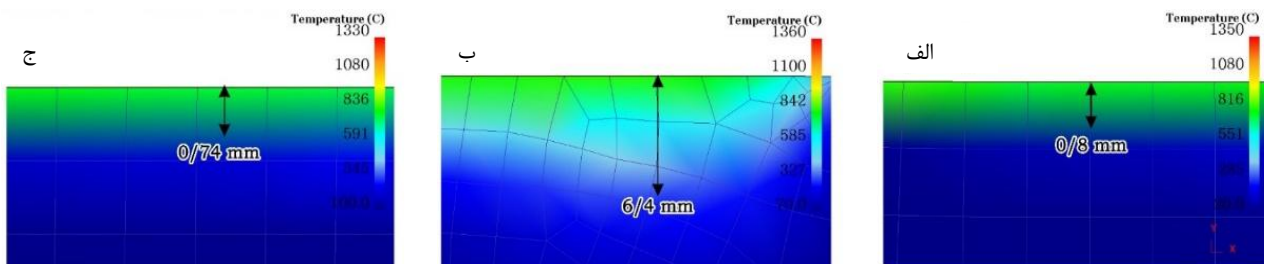
۳-۵- تأثیر درجه حرارت پیش گرم بر عمق متاثر از حرارت در نواحی ماشینکاری شده

یکی از مشکلات اصلی ماشینکاری قطعات، مشابه دیگر فرآیندهای مختلف حرارتی و مکانیکی، اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات پس از فرایند است که منجر به افزایش نرخ قطعات معیوب و افزایش هزینه‌های تولید می‌شود. در فرایند ماشین‌کاری، بارهای مکانیکی و حرارتی شدیدی به صورت همزمان بر سطح قطعه‌ی کار اعمال می‌شود. بارهای مکانیکی که از سوی ابزار بر قطعه وارد می‌شود، باعث تغییر شکل پلاستیک غیر یکنواخت در لایه‌های سطحی ماده و در نهایت منجر به تشکیل تنش‌های پسماند فشاری و یا کششی در سطح می‌گردد. علاوه بر آن تغییر شکل شدید و اصطکاک در ناحیه‌ی برش، موجب افزایش درجه حرارت در این ناحیه و ایجاد یک گرادیان حرارتی و انبساط موضعی در سطح قطعات ماشینکاری شده می‌شود که ایجاد تنش‌های پسماند کششی را تشدید می‌کند. اعوجاج قطعات می‌تواند در گستره‌ای از چند میکرومتر در قطعات کوچک تا چندین سانتی‌متر در قطعات بزرگ باشد.



شکل ۶ میزان سایش ابزار (الف) ۲۰، (ب) ۷۰، (ج) ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

شکل ۷ میزان عمق نفوذ حرارت ناشی از برش در سطح قطعه برای درجه حرارت‌های پیش گرم متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده، بیشترین میزان عمق نفوذ حرارت در قطعه با پیش گرم ۷۰ درجه در شکل ۷ ب با مقدار ۶/۴ میلی‌متر و کمترین میزان عمق نفوذ به مقدار ۰/۷۴ میلی‌متر در دمای پیش گرم ۱۰۰ درجه در شکل ۷ ج رخ داده است. افزایش عمق نفوذ در درجه حرارت پیش گرم ۷۰ درجه به دلیل وجود دو حرارت ناشی از اصطکاک و عملیات پیش گرم بوده در حالی که در نمونه‌ی اول حرارت تنها ناشی از اصطکاک و در نمونه‌ی سوم ایجاد حرارت ناشی از عملیات پیش گرم بوده است. در رابطه با نمونه‌ی سوم، به دلیل شکننده شدن براده، اصطکاک به حداقل رسیده که در نهایت می‌توان تأثیر حرارت اصطکاک را کمتر از حرارت ناشی از پیش گرم در نظر گرفت. در مجموع، از نتایج شکل ۷ می‌توان استنباط کرد کمترین تنش پسماند در نمونه‌ی سوم با میزان پیش گرم ۱۰۰ درجه ایجاد می‌شود.



شکل ۷ عمق متاثر از حرارت در نواحی ماشین‌کاری شده در دمای پیش گرم (الف) ۲۵، (ب) ۷۰، (ج) ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

۴- نتیجه گیری

- در این مطالعه، اثر درجه حرارت پیش گرم در فرایند ماشین کاری فولاد CK45 و خصوصیات براده توسط آزمایشات تجربی و شبیه سازی عددی ارزیابی شد. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:
- ۱- آزمایشات تجربی نشان داد با افزایش دمای پیش گرم فولاد CK45 از ۲۵ به ۱۰۰ درجه سانتی گراد، ماده از حالت نرم به ترد منتقل می شود که این موضوع با لحاظ براده تولیدی در فرایند تراشکاری این فولاد تایید شد.
 - ۲- نتایج مدل اجزای محدود با نتایج تجربی برای ویژگی های براده تغییر شکل یافته تطابق دارد، لذا مدل اجزای محدود به خوبی رفتار ماشین کاری و تشکیل براده را پیش بینی کرده است.
 - ۳- نتایج شبیه سازی اجزاء محدود نشان داد نیروهای وارد بر ابزار در راستاهای Y و X با کاهش دما بیشتر شده اما نرخ حرارت نوک ابزار تا دمای ماشینکاری ۷۰ درجه سانتی گراد افزایش و بعد از آن به علت کمتر شدن اصطکاک به طرز چشم گیری در حدود ۴۰۰ درجه سانتی گراد کاهش می یابد.
 - ۴- بیشترین و کمترین حرارت ایجاد شده، در لبه ابزار مربوط به نمونه با دمای پیش گرم ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد رخ داده است.
 - ۵- کمترین دما و عمق نفوذ حرارتی در سطح ماشینکاری شده مربوط به نمونه با دمای پیش گرم ۱۰۰ درجه سانتی گراد است که می تواند باعث کاهش تنش های پسماند در نمونه شود.
 - ۶- با جمع بندی نتایج، از حیث افزایش عمر ابزار، رفتار ایده آل براده و کمتر شدن توان مصرفی ماشین، می توان دمای پیش گرم ۱۰۰ درجه سانتی گراد نسبت به دو دمای دیگر آزمایش شده را به عنوان شرایط بهینه در ماشینکاری فولاد CK45 معرفی نمود.

References

- [1] Sadeghifar M, Sedaghati R, Jomaa W, Songmene V. A comprehensive review of finite element modeling of orthogonal machining process: chip formation and surface integrity predictions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 2018 Jun; 96:3747-91. doi: 10.1007/s00170-018-1759-6
- [2] Javidi A, Rieger U, Eichlseder W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of fatigue*: 2008 Oct 1;30(10-11):2050-5. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2008.01.005
- [3] Touazine H, Chadha K, Jahazi M, Bocher P. Characterization of subsurface microstructural alterations induced by hard turning of Inconel 718. *Journal of Materials Engineering and Performance*: 2019 Nov; 28:7016-24. doi: 10.1007/s11665-019-04416-1
- [4] Soler D, Aristimuño PX, Garay A, Arrazola PJ, Klocke F, Veselovac D, Seimann M. Finding correlations between tool life and fundamental dry cutting tests in finishing turning of steel. *Procedia engineering*: 2015 Jan 1; 132:615-23. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.539
- [5] Karaguzel U, Bakkal M, Budak E. Mechanical and thermal modeling of orthogonal turn-milling operation. *Procedia CIRP*: 2017 Jan 1; 58:287-92. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.191
- [6] Saez-de-Buruaga M, Soler D, Aristimuño PX, Esnaola JA, Arrazola PJ. Determining tool/chip temperatures from thermography measurements in metal cutting. *Applied Thermal Engineering*; 2018 Dec 25; 145:305-14. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.051
- [7] Ning J, Liang SY. Predictive modeling of machining temperatures with force-temperature correlation using cutting mechanics and constitutive relation. *Materials*: 2019 Jan 16;12(2):284. doi: 10.3390/ma12020284
- [8] Baohai W, Di C, Xiaodong H, Dinghua Z, Kai T. Cutting tool temperature prediction method using analytical model for end milling. *Chinese Journal of Aeronautics*: 2016 Dec 1;29(6):1788-94. doi: 10.1016/j.cja.2016.03.011
- [9] Mirkoohi E, Bocchini P, Liang SY. Analytical temperature predictive modeling and non-linear optimization in machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 2019 Jun 19; 102:1557-66. doi: 10.1007/s00170-019-03296-y
- [10] Richardson DJ, Keavey MA, Dailami F. Modelling of cutting induced workpiece temperatures for dry milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*: 2006 Aug 1; 46(10):1139-45. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.08.008
- [11] Karaguzel U, Budak E. Investigating effects of milling conditions on cutting temperatures through analytical and experimental methods. *Journal of Materials Processing Technology*: 2018 Dec 1; 262:532-40. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.07.024

- [12] Karaguzel U, Bakkal M, Budak E. Modeling and measurement of cutting temperatures in milling. *Procedia CIRP*: 2016 Jan 1; 46:173-6. doi: [10.1016/j.procir.2016.03.182](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.182)
- [13] Li L, Li B, Ehmann KF, Li X. A thermo-mechanical model of dry orthogonal cutting and its experimental validation through embedded micro-scale thin film thermocouple arrays in PCBN tooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*: 2013 Jul 1; 70:70-87. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2013.03.005](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.03.005)
- [14] Sutter G, Ranc N. Temperature fields in a chip during high-speed orthogonal cutting—an experimental investigation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*: 2007 Aug 1; 47(10):1507-17. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2006.11.012](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.11.012)
- [15] Kryzhanivskyy V, Bushlya V, Gutnichenko O, Petrusha IA, Ståhl JE. Modelling and experimental investigation of cutting temperature when rough turning hardened tool steel with PCBN tools. *Procedia Cirp*: 2015 Jan 1; 31:489-95. doi: [10.1016/j.procir.2015.03.079](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.079)
- [16] Huang K, Yang W. Analytical model of temperature field in workpiece machined surface layer in orthogonal cutting. *Journal of Materials Processing Technology*: 2016 Mar 1; 229:375-89. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2015.07.008](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.008)
- [17] Ding H, Shin YC. Dislocation density-based grain refinement modeling of orthogonal cutting of titanium. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*: 2014 Aug 1; 136(4):041003. doi: [10.1115/1.4027207](https://doi.org/10.1115/1.4027207)
- [18] Liu R, Salahshoor M, Melkote SN, Marusich T. A unified material model including dislocation drag and its application to simulation of orthogonal cutting of OFHC Copper. *Journal of Materials Processing Technology*: 2015 Feb 1; 216:328-38. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2014.09.021](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.021)
- [19] Jafarian F, Umbrello D, Jabbaripour B. Identification of new material model for machining simulation of Inconel 718 alloy and the effect of tool edge geometry on microstructure changes. *Simulation Modelling Practice and Theory*: 2016 Aug 1; 66:273-84. doi: [10.1016/j.simpat.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.05.001)
- [20] Caruso S, Imbrogno S, Rinaldi S, Umbrello D. Finite element modeling of microstructural changes in Waspaloy dry machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 2017 Mar; 89:227-40. doi: [10.1007/s00170-016-9037-y](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9037-y)
- [21] Jafarian F, Masoudi S, Umbrello D, Filice L. New strategies for improvement of numerical model accuracy in machining of nickel-based alloy. *Simulation Modelling Practice and Theory*: 2019 Jul 1; 94:134-48. doi: [10.1016/j.simpat.2019.02.006](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.02.006)
- [22] akramian Zadeh S, Rashidi P. The effect of fluid velocity and microstructure on erosion corrosion of two-phase CK45 steel. *Results in Materials*: 2020 Jun 1; 6:100077. doi: [10.1016/j.rinma.2020.100077](https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100077)
- [23] Holub M, Andrs O, Kovar J, Vetiska J. Effect of position of temperature sensors on the resulting volumetric accuracy of the machine tool. *Measurement*: 2020 Jan 1; 150:107074. doi: [10.1016/j.measurement.2019.107074](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107074)
- [24] Asif M, Ahad MA, Iqbal MF, Reyaz S. Experimental investigation of thermal properties of tool steel and mild steel with heat treatment. *Materials Today: Proceedings*: 2021 Jan 1; 45:5511-7. doi: [10.1016/j.matpr.2021.02.272](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.272)
- [25] Razfar M, Principles of machining and instrumentation, Amirkabir University of Technology Press: 2022. [In Persian]
- [26] Knight WA, Boothroyd G. Fundamentals of metal machining and machine tools. CRC Press; 2019 Aug 8.
- [27] Kara F, Aslantaş K, Cicek A. Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI 316L using artificial neural network. *Applied Soft Computing*: 2016 Jan 1; 38:64-74. doi: [10.1016/j.asoc.2015.09.034](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.09.034)