مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 15، ص‌ص 51-58

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عمر ابزار و مکانیزم‌های سایش در تراشکاری سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل N-155 به کمک روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ

بهنام داودی[1*]، بهزاد اسکندری[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 315-51665، bdavoodi@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 خرداد 1393

پذیرش: 08 مرداد 1393

ارائه در سایت: 28 مهر 1393

کلید واژگان:

تراشکاری

سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل

مکانیزم‌های سایش ابزار

روش شناسی رویه‌ی پاسخ

مدل رگرسیونی

چکیده

خواص مناسب سوپرآلیاژها از جمله حفظ استحکام در دماهای بالا و مقاومت خوب به خوردگی باعث شده است که از این آلیاژها در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، صنایع شیمیایی و پتروشیمی بسیار استفاده شود. از طرف دیگر وجود همین خواص باعث شده است که سوپرآلیاژها جزء مواد سخت برای ماشینکاری محسوب شوند. از این رو بررسی قابلیت ماشینکاری سوپرآلیاژها اهمیت زیادی پیدا می‌کند. در تحقیق حاضر، تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر عمر ابزار در تراشکاری سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل N-155 بررسی شده است. سرعت برشی و نرخ پیشروی هر کدام در پنج سطح به‌عنوان متغیرهای براده‌برداری انتخاب شدند. رابطه‌ی بین پارامترهای ماشینکاری و متغیر خروجی (عمر ابزار) با استفاده از روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ مدل‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهند که تطابق خوبی بین نتایج آزمایش‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل ریاضی وجود دارد. همچنین از تجزیه و تحلیل واریانس برای بررسی کیفیت مدل برازش شده و متغیرهای مربوطه استفاده و نشان داده شد که سرعت برشی بیش از نرخ پیشروی بر عمر ابزار تأثیرگذار است. همچنین ابزارهای برشی توسط تصاویر حاصل از عکس‌برداری الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفتند و مکانیزم‌های سایش ابزار در سرعت‌های برشی و نرخ پیشروی‌های مختلف بررسی شدند. سایش مالشی و چسبندگی، مکانیزم‌های سایش غالب در این تحقیق هستند. در پایان، با استفاده از تابع مطلوبیت، پارامترهای بهینه ماشینکاری برای به‌دست آوردن بیشترین عمر ابزار پیش‌بینی شدند. نشان داده شده است که پارامترهای سرعت برشی 50 m/min و نرخ پیشروی 0/2 mm/rev مقادیر بهینه هستند و پیش‌بینی می‌شود که عمر ابزار با استفاده از این مقادیر برابر با 7/526 دقیقه شود.

Investigation of tool life and wear mechanisms in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy using response surface methodology

Behnam Davoodi[1*], Behzad Eskandari[2]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*P.O.B. 51665-315 Tabriz, Iran, bdavoodi@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 June 2014
Accepted 30 July 2014
Available Online 20 October 2014

Keywords:
Turning
Iron-nickel-base superalloy
Tool wear mechanisms
Response surface methodology (RSM)
Regression model

ABSTRACT

Superalloys are extensively used in various industries like aerospace, chemical and petrochemical industries due to their properties such as high strength at elevated temperature and good corrosion resistance. On the other hand, owing to these properties superalloys are classified as difficult to cut materials. In the present work, the effect of cutting parameters on tool life in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy is investigated. Cutting speed and feed rate, each at five levels, were selected as cutting variables. Relationship between cutting parameters and output variable, i.e. tool life, was modeled using response surface methodology (RSM). The results showed that there was good agreement between the experimental results and the predicted values using the developed mathematical model. Additionally, analysis of variance was implemented to evaluate the adequacy of the regression model and respective variables. ANOVA results indicated that the cutting speed had more effect on tool life than feed rate. Moreover, wear mechanisms and failure modes of the cutting edges were analyzed by using the images of scanning electron microscope (SEM) at different cutting speeds and feed rates. It was observed that abrasion and adhesion were the most dominant wear mechanisms in this study. Finally, desirability function was used so as to predict optimum cutting parameters for achieving maximum tool life. The results of optimization process showed that 50 m/min cutting speed and 0.2 mm/rev feed rate are the optimum cutting parameters which result in 7.526 min tool life.

1- مقدمه

سوپرآلیاژها به وسعت در صنایع هوا فضا به کار گرفته می‌شوند و تقریباً 45 تا 50 درصد مواد مورد نیاز برای ساخت توربین‌های گازی از سوپرآلیاژها می‌باشند[1]. خواص مناسب از جمله استحکام خوب در دماهای بالا، مقاومت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

B. Davoodi, B. Eskandari, Investigation of tool life and wear mechanisms in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy using response surface methodology, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 15, pp. 51-58, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.30.7]

بالا به خستگی و مقاومت خوب به خوردگی باعث شده است تا این مواد در کاربردهای ذکرشده به وسعت مورد استفاده قرار گیرند[2]. از طرف دیگر، همین خواص مطلوب برای کاربرد در دماهای بالا، باعث شده است تا این مواد، جزو مواد سخت برای ماشینکاری به شمار آیند. هدایت حرارتی پایین، وجود ذرات ساینده در ریزساختار و تمایل براده برای جوش سرد با لبه‌ی ابزار برشی، ماشینکاری سوپرآلیاژها را با مشکلاتی از جمله کیفیت پایین سطح ماشینکاری شده، عمر کم ابزار برشی و بالا بودن نیروهای برشی همراه می‌کند[3]. سوپرآلیاژها، آلیاژهای پایه نیکل، کبالت و آهن-نیکل می‌باشند. سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل توسعه یافته‌ی فولادهای ضدزنگ هستند و معمولاً به‌صورت کارشده تولید می‌شوند. سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل در مقایسه با دو نوع دیگر، نسبتاً آسان‌تر ماشینکاری می‌شوند، ولی درعین‌حال مشکلات زیادی در براده‌برداری از این‌گونه آلیاژها وجود دارد[4]. با وجود اهمیت و کاربرد فراوان این نوع از سوپرآلیاژها، مطالعه‌ی چندانی بر روی ماشینکاری سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل انجام نشده است.

همان‌طور که اشاره شد، از جمله مشکلاتی که در ماشینکاری سوپرآلیاژها وجود دارد عمر پایین‌تر ابزار برشی نسبت به دیگر آلیاژها است. برخی از مطالعات انجام شده بر تأثیر جنس، نوع پوشش و هندسه‌ی ابزار برشی در ماشینکاری این آلیاژها پرداخته‌اند. نشان داده شده است که پوشش ابزار باعث کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار می‌شود و در نتیجه باعث کاهش دمای ماشینکاری می‌شود[5]. هاناساکی و همکاران [6] در مطالعه‌ی تأثیر پوشش ابزار بر نوع سایش ابزار در تراشکاری یک نوع آلیاژ با نیکل بالا، به این نتیجه رسیدند که پوشش ابزار باعث کاهش سایش لبه‌ی ابزار می‌شود. AlTiN یکی از انواع پر کاربرد پوشش ابزار است که برای ماشینکاری مواد سخت برای ماشینکاری به‌کار برده می‌شود[7,8]. این نوع پوشش به خوبی از وقوع سایش مالشی[1] جلوگیری می‌کند[9].

همچنین نشان داده شده است که ابزار بدون پوشش در سرعت‌های برشی پایین عملکرد بهتری نسبت به ابزار پوشش‌دار از خود نشان می‌دهند[10]. جاواید و همکاران [11] توانایی ابزارهای برشی کاربیدی پوشش‌دار و بدون پوشش و مکانیزم‌های سایش آن‌ها را در ماشینکاری سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل 718[2] مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که لب پریدگی و سایش لبه‌ی ابزار، سایش غالب در این تحقیق بودند. همچنین بر طبق این تحقیق، ابزار برشی بدون پوشش در سرعت‌های برشی پایین‌تر، عملکرد بهتری نسبت به ابزار پوشش‌دار داشتند و در سرعت‌های برشی بالا، ابزار پوشش‌دار بهتر عمل کرده‌اند. ابزارهای سرامیکی و CBN[3] ابزارهای برشی پیشرفته‌ای هستند که حاصل نیاز گسترده به بالا رفتن بهره‌وری در ماشینکاری سوپرآلیاژها و آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت می‌باشند[12]. نشان داده شده است که ابزارهای سرامیکی توانایی براده‌برداری در سرعت‌های برشی تا 750 m/min در ماشینکاری اینکونل 718 را دارا هستند[13]. آلتین و همکاران [14] تأثیر سرعت برشی بر عمر ابزار و همچنین مکانیزم‌های سایش ابزار در ماشینکاری اینکونل 718 توسط ابزارهای سرامیکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حفره‌ی سطح براده‌ی ابزار و سایش پهنا و همچنین سایش پهنا و شکاف عمق برش[4]، به‌ترتیب مکانیزم‌های عمده‌ی سایش در ابزارهای سرامیکی مربعی و دایره‌ای بودند. با این وجود ماشینکاری با ابزارهای سرامیکی تأثیرات منفی بر کیفیت سطح دارد و در عملیات پرداخت معمولاً مورد استفاده قرار نمی‌گیرند[15]. ابزارهای برشی از جنس کاربید تنگستن به‌صورت گسترده برای براده‌برداری از سوپرآلیاژها در سرعت‌های برشی کمتر از 30 m/min مورد استفاده قرار گرفته‌اند[16,17]. مکانیزم‌های سایش در ابزار کاربیدی با پوشش چند لایه، توسط کانترو و همکاران [18] مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها نشان دادند که ابزارهای کاربیدی قابلیت خوبی برای ماشینکاری اینکونل 718 دارند. همچنین آن‌ها مکانیزم‌های مختلف سایش از جمله شکاف عمق برش را در فرآیندهای ماشینکاری مشاهده کردند. دویلز و همکاران [19] ماشینکاری خشک و ماشینکاری همراه با سیال برشی بر روی اینکونل 718 در سرعت‌های برشی مختلف را به انجام رساندند. برای انجام فرآیند براده‌برداری در این تحقیق از ابزارهای کاربیدی پوشش‌دار استفاده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از ابزارهای پوشش‌دار باعث ایجاد کیفیت سطح قابل قبولی می‌شود.

در تحقیقات مختلف از روش‌های طراحی آزمایش به‌خصوص روش شناسی رویه‌ی پاسخ[5] برای مدل‌سازی و انجام فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری استفاده شده است. ثابت شده است که نتایج حاصل از مدل‌های رگرسیونی که در تحقیقات مختلف توسط این روش برازش شده‌اند، تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند[20,21]. همان‌طور که ذکر شد، تقریباً هیچ تحقیق ثبت‌شده‌ای در مورد ماشینکاری سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل و بررسی عمر ابزار و تحلیل مکانیزم آن‌ها وجود ندارد. از آنجا که این نوع از سوپرآلیاژها دارای اهمیت خاصی در صنایع مختلف هستند، در این تحقیق تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر عمر ابزار در ماشینکاری سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل N-155 مورد مطالعه قرار گرفته است. سرعت برشی و نرخ پیشروی به‌عنوان پارامترهای براده‌برداری انتخاب شدند. روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ به‌عنوان روش طراحی آزمایش و به‌منظور مدل‌سازی رابطه‌ی بین متغیرهای ورودی براده‌برداری و پارامترهای خروجی به کار گرفته شد. آنالیز واریانس[6] نیز برای تعیین پارامترهای تأثیرگذار و بررسی کیفیت مدل برازش شده به‌کار گرفته شد. همچنین، مکانیزم‌های سایش و نوع از کارافتادگی ابزار برشی به‌کمک عکسبرداری الکترونی روبشی[7] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در پایان، با استفاده از تابع مطلوبیت[8] پارامترهای بهینه به‌منظور دستیابی به بیشترین عمر ابزار به‌کمک روش بهینه‌سازی رویه‌ی پاسخ پیش‌بینی شدند.

2- مواد و روش‌ها

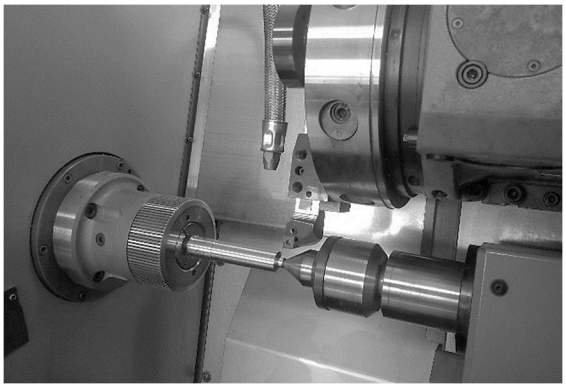
جنس قطعه‌کار سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل N-155 (مولتی‌مت[9]) است که عناصر شیمیایی آن در جدول 1 آورده شده است. سختی تمامی قطعه‌کارها بعد از انجام عملیات انحلال[10] به سختی 32 HRc رسیده است. تمامی آزمایش‌ها بر روی یک دستگاه تراش کنترل عددی با نام «امکوترن 242»[11] انجام شده‌اند. مشخصات فنی این دستگاه در جدول 2 ارائه شده‌اند. همچنین تصویر تنظیمات دستگاه و چینش آزمایش در شکل 1 نشان داده شده است.

روند انتخاب هندسه اینسرت‌ها و ابزارگیر و چگونگی اندازه‌گیری سایش ابزار و عمر ابزار، بر اساس استاندارد ISO 3685:1993 [22] انجام شده‌اند. اینسرت‌های تراشکاری کاربیدی ساخت شرکت سندویک[12] به‌عنوان ابزارهای برشی در تمامی آزمایش‌ها استفاده شدند.

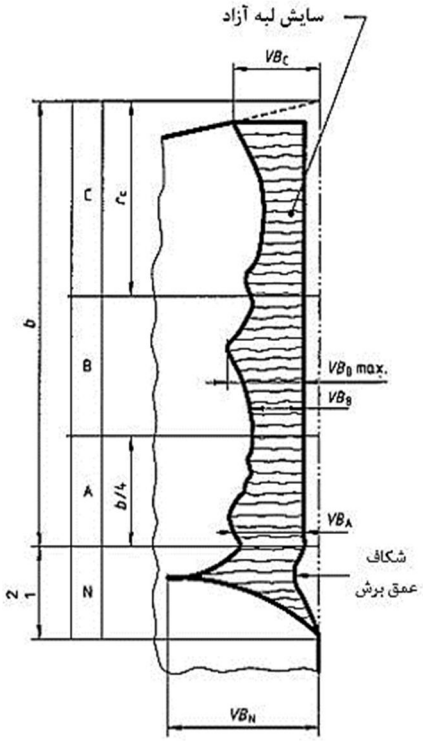
1- Abrasive wear
2- Inconel 718
3- Cubic Boron Nitride
4- Depth of cut notch

5- Response surface methodology
6- Analysis of variance
7- scanning electron microscope (SEM)
8- Desirability function
9- Multimet
10- Solution treatment
11- Emcoturn 242 TC
12- Sandvik

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.30.7]



شکل 1 تصویر چینش آزمایش



شکل 2 نواحی سایش با توجه به استاندارد ISO 3685

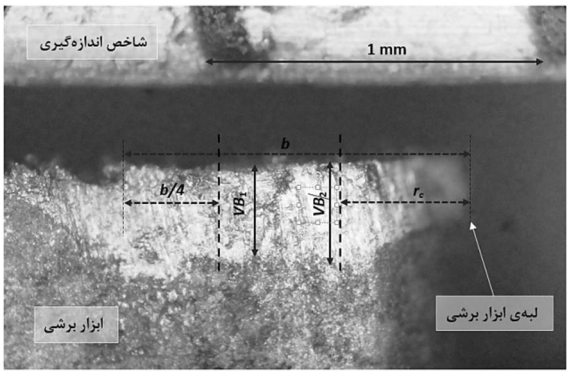
جدول 1 عناصر شیمیایی سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل N-155

عناصر شیمیایی	Fe	cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Mn	N	C	Zr
درصد وزنی تعادل	21/9	20/3	19/7	3	2/5	1	1/2	0/15	0/15	0/15	0/02

جدول 2 مشخصات فنی دستگاه تراش CNC

نوع	امکوترن 242 تی‌سی
سال ساخت	1990
نوع کنترل	امکوترن TM02
کشور سازنده	اتریش
محدوده‌ی دوران محور	50 – 5400U/min
حداکثر نرخ پیشروی	0 - 4000mm/min
حداکثر گشتاور روی محور دستگاه	حداکثر 75Nm
حداکثر توان	13kW

هندسه این ابزارها بر اساس استاندارد ISO به‌صورت CNMG 120404-23 و گرید آن‌ها بر اساس کد بندی شرکت سازنده، H13A (معادل کد S15 در استاندارد ISO) است.



شکل 3 نحوه اندازه‌گیری سایش لبه ابزار به کمک نرم افزار آنالیز تصویر

این گرید از نوع ابزارهای بدون پوشش بوده و دارای چقرمگی خوب و مقاومت بالا در برابر سایش مالشی در ماشینکاری آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت می‌باشد. ابزارگیر ساخت شرکت Seco و با کد استاندارد ISO به‌صورت PCBNL 2020M12 که یک ابزار گیر چپ‌بر و مناسب دستگاه تراش به‌کار رفته می‌باشد، در انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

اندازه‌گیری میزان سایش ابزار در بازه‌های زمانی ثابت و توسط میکروسکوپ نوری ساخت شرکت الیمپوس[1] و با کمک دوربین دیجیتالی نصب شده بر روی آن و نرم‌افزار آنالیز تصویر[2] انجام شده‌اند. به این صورت که پس از انجام هر فرآیند ماشینکاری در یک مدت زمان مشخص (که این مدت زمان به‌کمک آزمایش اولیه و توصیه‌های استاندارد ISO 3685 تعیین شدند)، اینسرت از ابزارگیر جدا شده و توسط میکروسکوپ نوری مقدار سایش، اندازه‌گیری و ثبت شد. تا مشاهده معیارهای سایش، فرایند براده‌برداری تکرار شد. به محض مشاهده هر کدام از معیارهای سایش، عمر ابزار معادل آن به ثبت رسید. معیارهای سایش در نظر گرفته شده در این تحقیق با توجه به استاندارد ISO 3685 به‌صورت زیر می‌باشند (شکل 2): الف) سایش پهنای ابزار VB_a برابر با 0/3 mm، ب) پهنای سایش حداکثر VB_{max} برابر با 0/6 mm.

نحوه اندازه‌گیری سایش ابزار به‌کمک نرم افزار آنالیز تصویر را می‌توان در شکل 3 مشاهده کرد. پس از تصویر برداری از لبه ابزار برش به همراه یک شاخص اندازه‌گیری (که در این تحقیق خط‌کش میلیمتری است)، تصویر وارد نرم افزار آنالیز تصویر می‌شود. به‌کمک این شاخص، فاصله یک میلیمتر برای نرم افزار تعریف می‌شود. به این ترتیب در تصویر یک اندازه معیار وجود دارد که توسط آن می‌توان دیگر اندازه‌ها را بر روی عکس لبه ابزار اندازه‌گیری کرد. با توجه به نواحی سایش که در استاندارد ISO 3685 (شکل 2) مشخص شده است، ناحیه سایش VB_a و VB_{max} (در صورت وجود) اندازه‌گیری می‌شوند. برای مثال در شکل 2 تصویر لبه‌ی ابزار در سرعت 70 m/min، پیشروی 0/15 mm/rev و عمق 1 mm را در مدت زمان 4/1 دقیقه نشان می‌دهد. پس از محاسبه میانگین سایش در محدوده تعیین شده، میزان سایش لبه ابزار VB_a به‌کمک روش ذکر شده 0/29 mm اندازه‌گیری شده است.

3- طراحی آزمایش با استفاده از روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ

روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که به‌منظور برازش مدلی که پارامترهای ورودی فرآیند و پاسخ‌های خروجی را به هم ارتباط می‌دهد، استفاده می‌شود[23]. هدف اصلی در روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ، پیش‌بینیِ ترکیبی از پارامترهای براده‌برداری برای به‌دست آوردن حداکثر یا حداقل مقدار پاسخ فرآیند می‌باشد. در این تحقیق، یکی از

1- Olympus
2- Image Analysis Software

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.30.7]

روش‌های استاندارد طراحی به کمک روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ با عنوان طراحی مرکب مرکزی[1] مورد استفاده قرار گرفته شده است. روش طراحی مرکب مرکزی شامل نقاط زیر است:

- نقاط فاکتوری (نقاط مکعبی)
- نقاط محوری (نقاط ستاره‌ای)
- نقاط مرکزی

نقاطی که در قسمت فاکتوری (که قسمت تخمین عبارات برهم‌کنشی[2] مدل درجه دوم برازش شده را بر عهده دارد) قرار دارند، می‌توانند دارای مقادیر بین 1 و 1- باشند. نقاط واقع در قسمت محوری، وظیفه‌ی تخمین عبارات درجه‌ی دو در مدل رگرسیونی درجه دو را بر عهده دارند و در بازه‌ی $(+\alpha, 0), (-\alpha, 0), (0, +\alpha), (0, -\alpha)$ تعریف می‌شوند. α فاصله‌ی محوری می‌باشد و انتخاب مقدار آن بسیار اهمیت دارد. نقاط مرکزی علاوه بر این که تخمینی داخلی از خطا را ارائه می‌کنند، در تخمین عبارات درجه دو نیز شرکت دارند[24].

در این تحقیق، با انتخاب مقدار 1/414 برای α، 13 نقطه‌ی طراحی آزمایش شامل 5 نقطه‌ی مرکزی در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت برشی (Vc) و نرخ پیشروی (f) به‌عنوان پارامترهای ماشینکاری انتخاب شدند. جدول 3 پارامترهای ماشینکاری و سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد. عمق برش در تمامی آزمایش‌ها 1 mm تنظیم شد. محدوده‌ی پارامترهای ماشینکاری با توجه به کاتالوگ ابزار و در نظر گرفتن توصیه‌های استاندارد ISO 3685 انتخاب شدند. پارامتر پاسخ که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته شده است، عمر ابزار (T) می‌باشد. طراحی آزمایش و نتایج آزمایش‌های تجربی در جدول 4 ارائه شده است.

4- نتایج و بحث

4-1- برازش مدل ریاضی برای عمر ابزار

رابطه‌ی بین متغیرهای ورودی (سرعت برشی (Vc) و نرخ پیشروی (f)) و پاسخ خروجی (Y) را می‌توان به‌صورت رابطه (1) بیان کرد:

$$Y = F(Vc, f) \tag{1}$$

که در آن F معادله پاسخ[3] می‌باشد. در این تحقیق، برای پیش‌بینی مقادیر پاسخ از مدل چند جمله‌ای درجه دو استفاده شده است. این مدل رگرسیونی برای تعداد k فاکتور به‌صورت رابطه (2) خواهد بود:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^{k} B_i X_i + \sum_{i,j=1}^{k} B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{k} B_{ii} X_i^2 \tag{2}$$

که در آن B_0 مقدار ثابت رابطه می‌باشد. B_1، B_2، B_k ضرایب عبارات خطی و B_{11}، B_{22}، B_{kk} ضرایب عبارات درجه دوم و B_{12}، B_{13}، $B_{k-1,k}$ ضرایب عبارات برهم‌کنشی هستند و X_i نمایانگر پارامترهای ورودی می‌باشند. به‌همین صورت برای تعداد دو فاکتور، مدل رگرسیونی به‌عنوان تابعی از پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی می‌تواند به‌صورت رابطه (3) ارائه شود:

$$Y = B_0 + B_1 Vc + B_2 f + B_{11} Vc^2 + B_{22} f^2 + B_{12} Vcf \tag{3}$$

جدول 3 پارامترهای ماشینکاری و سطوح آن‌ها

پارامترهای ماشینکاری	سطح1	سطح2	سطح3	سطح4	سطح5
سرعت برشی (m/min)	50	60	70	80	90
پیشروی (mm/rev)	0/100	0/125	0/150	0/175	0/200

1- Central Composite Design (CCD)
2- Interaction terms
3- Response function

با استفاده از داده‌های آزمایش، مقادیر ضرایب معادله‌ی غیرخطی فوق به‌کمک روش رگرسیونی و به‌کمک نرم‌افزار آماری «مینی‌تب 16»[4] محاسبه شدند.

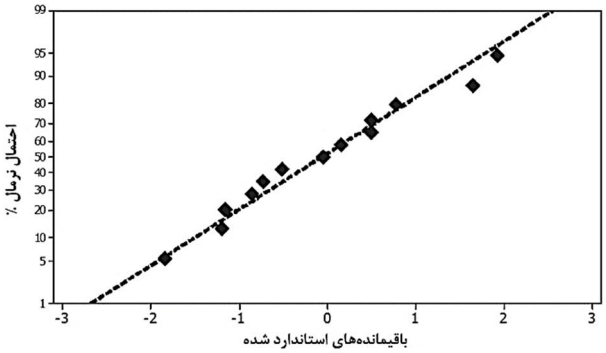
با جایگذاری مقادیر در معادله‌ی (3)، مدل نهایی عمر ابزار (T) برای پارامترهای کدبندی شده به‌صورت رابطه (4) خواهد بود:

$$T = 4.24 - 0.841 \times Vc - 0.673 \times f + 0.346 \times Vc^2 + 0.199 \times f^2 - 0.475 \times Vc \times f \tag{4}$$

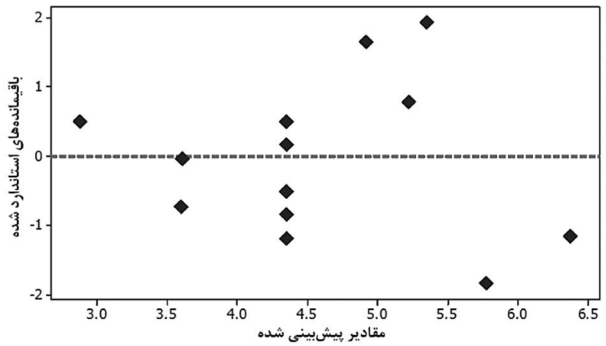
و همچنین مدل نهایی عمر ابزار برای پارامترهای واقعی به‌صورت رابطه (5) خواهد بود:

$$T = 3.302 - 58.89E-4 \times C + 70.771 \times F + 15.825E-4 \times C^2 + 135.207 \times F^2 - 1.9 \times C \times F \tag{5}$$

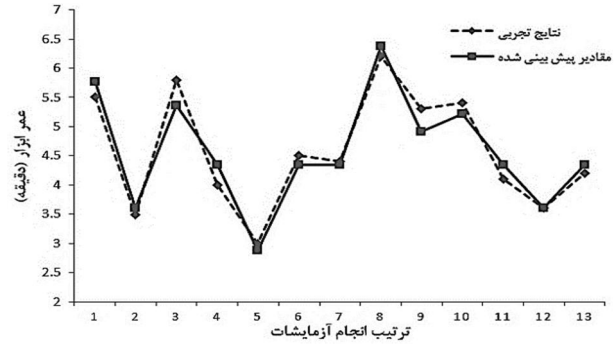
که در این رابطه C و F به‌ترتیب نشان دهنده‌ی پارامترهای واقعی سرعت برشی و نرخ پیشروی هستند. شکل 4 نمودار احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد. نشان داده شده است که داده‌ها تقریباً بر روی خط مورب قرار گرفته‌اند و این بیانگر توزیع نرمال خطا می‌باشد. این مطلب موید کیفیت خوب مدل برازش شده می‌باشد[25]. همچنین نمودار مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده‌ی عمر ابزار در شکل 5 نشان داده شده است.



شکل 4 نمودار احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها



شکل 5 نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده



شکل 6 مقایسه‌ی بین مقادیر پیش‌بینی شده و نتایج تجربی

4- MINITAB®16

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.30.7]

جدول 4 طراحی آزمایش و نتایج آزمایش‌های تجربی

شماره آزمایش	مقادیر واقعی پارامترهای ماشینکاری		مقادیر کدبندی شده‌ی پارامترهای ماشینکاری		عمر ابزار (min)
	سرعت برشی (m/min)	نرخ پیشروی (mm/rev)	سرعت برشی (m/min)	نرخ پیشروی (mm/rev)	
1	70	0/1	0	-1/41	5/5
2	90	0/15	1/41	0	3/49
3	60	0/125	-1	-1	5/8
4	70	0/15	0	0	4
5	80	0/175	1	1	3
6	70	0/15	0	0	4/5
7	70	0/15	0	0	4/4
8	50	0/15	-1/41	0	6/2
9	80	0/125	1	-1	5/3
10	60	0/175	-1	1	5/4
11	70	0/15	0	0	4/1
12	70	0/2	0	1/41	3/6
13	70	0/15	0	0	4/2

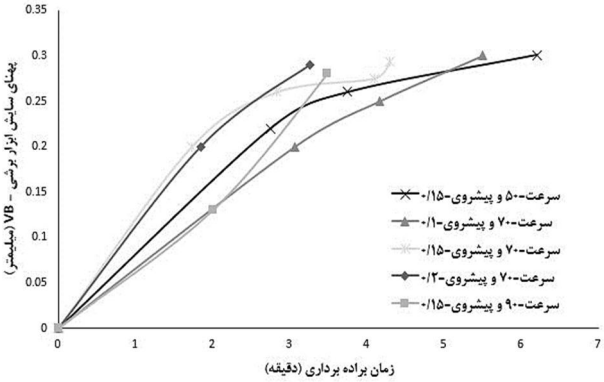
مشاهده می‌شود که باقیمانده‌ها دارای الگوی مشخصی نیستند و می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی مدل مناسبی برای پیش‌بینی عمر ابزار می‌باشد. این مطلب در شکل 6 که مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله‌ی (5) در مقایسه با نتایج تجربی را نشان می‌دهد، روشن‌تر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده وجود دارد و مقدار خطای متوسط آن کمتر از 5% است.

تجزیه و تحلیل واریانس به‌منظور بررسی مناسب بودن و کیفیت مدل رگرسیونی برازش شده و پارامترهای آن استفاده می‌شود. برای بررسی مناسب بودن مدل، مقدار عدد فیشر (F) مدنظر گرفته می‌شود. نتایج آنالیز واریانس برای عمر ابزار در جدول 5 ارائه شده است.

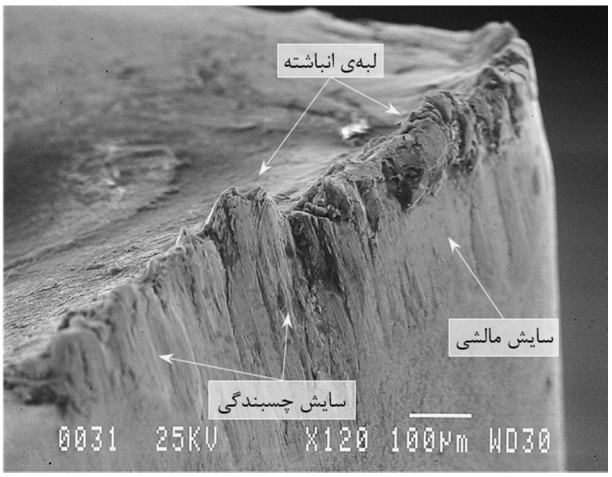
مقدار F مربوط به مدل در این جدول 20/44 است که نشان دهنده‌ی مناسب بودن مدل رگرسیونی درجه دوم برای پیش‌بینی عمر ابزار می‌باشد. مقدار Prob>F مربوط به مدل کمتر از 0/0001 است. این مقدار بیانگر معنادار بودن مدل برازش شده می‌باشد. با توجه به این جدول، مشاهده می‌شود که سرعت برشی تأثیر بیشتری نسبت به نرخ پیشروی بر عمر ابزار برشی دارد.

4-2- بررسی مکانیزم‌های سایش

شکل 7 منحنی‌های سایش ابزار را در سرعت‌ها و پیشروی‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، هرچه زمان ماشینکاری ادامه پیدا می‌کند، پهنای سایش در لبه‌ی ابزار بیشتر می‌شود. به‌طور کلی در منحنی‌های سایش ابزار سه ناحیه‌ی مجزا وجود دارد. در ناحیه‌ی اول سایش نرخ سایش نسبتاً بالاست.



شکل 7 منحنی‌های سایش ابزار



شکل 8 تصویر SEM مربوط به ابزار برشی در سرعت 50 m/min و پیشروی 0/15 mm/rev

جدول 5 نتایج تحلیل واریانس برای عمر ابزار

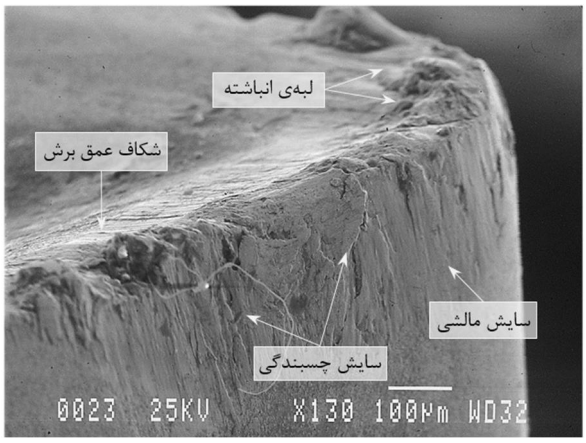
منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (SS)	میانگین مربعات (MS)	عدد فیشر (F)	Prob>F
مدل رگرسیونی	10/804	5	2/16	20/44	0
سرعت برشی	5/768	1	0/0002	0	0/967
نرخ پیشروی	3/52	1	0/168	1/59	0/248
سرعت×سرعت	0/449	1	0/573	5/43	0/053
پیشروی×پیشروی	0/163	1	0/163	1/55	0/253
سرعت×پیشروی	0/902	1	0/902	8/54	0/022
خطا	0/74	7	0/105		
مجموع	11/544	12			

در ناحیه‌ی دوم روند سایش به‌صورت یکنواخت است و به ناحیه‌ی سایش یکنواخت معروف است.

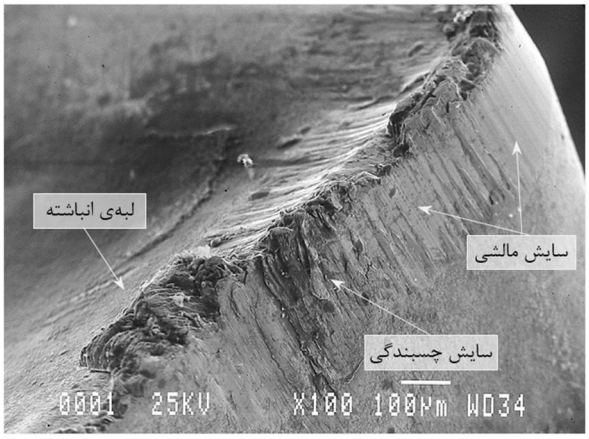
در ناحیه‌ی سوم، از آنجا که بر نیروهای برشی، دمای ماشینکاری و همچنین نوسانات ماشینکاری افزایش می‌یابد، سایش ابزار با شتاب بیشتری ادامه پیدا می‌کند تا اینکه به شکست ابزار می‌انجامد[26].

عکس‌های حاصل از عکسبرداری الکترونی روبشی در سرعت‌ها و پیشروی‌های مختلف در شکل‌های 8 تا 12 نشان داده شده‌اند.

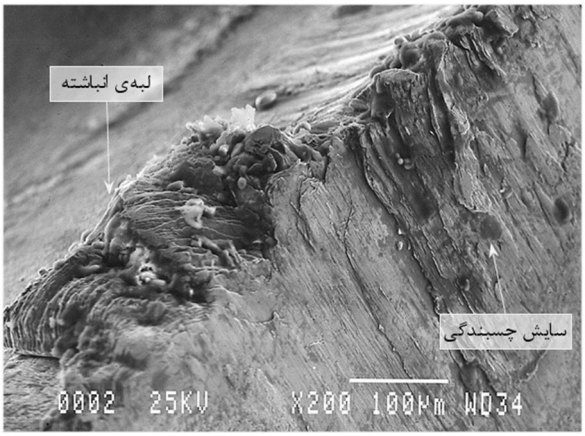
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.30.7]



شکل 9 تصویر SEM مربوط به ابزار برشی در سرعت 70 m/min و پیشروی 0/1 mm/rev



شکل 10 تصویر SEM مربوط به ابزار برشی در سرعت 70 m/min و پیشروی 0/15 mm/rev



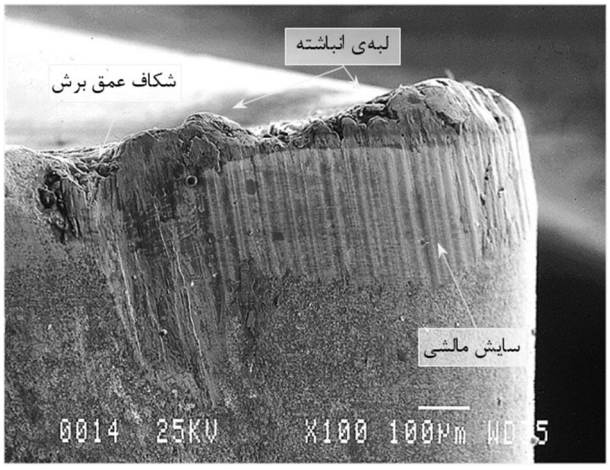
شکل 11 لبه‌ی انباشته در ابزار برشی در سرعت برشی 70 m/min و پیشروی 0/15 mm/rev

جدول 6 مشخصات دستگاه عکسبرداری الکترونی روبشی

نام دستگاه	میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل JXA-840
شرکت سازنده	شرکت JEOL ژاپن
مشخصات	محدوده بزرگنمایی: 10 تا 100/000 برابر ولتاژ شتاب دهنده: 0/2 تا 4 کیلو ولت حالت‌های تغییر وضعیت نمونه: 5 حالت شامل: جهت X (50mm)، جهت Y (70mm)، جهت Z (40mm)، کج شدن نمونه (°90-°5) و چرخش (°360). عمق نفوذ الکترون‌ها بسته به ولتاژ انتخابی متغیر است و برای حالت‌های مختلف عبارت است از: الکترون‌های ثانویه (1-10nm)، الکترون‌های برگشتی (0/1-1μm) و اشعه X (1-10μm).

در جدول 6 مشخصات فنی میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که مکانیزم‌های سایش غالب، سایش مالشی و سایش چسبندگی[1] می‌باشند. سایش چسبندگی حاصل ایجاد جوش سرد بین سطح قطعه‌کار و ابزار برشی می‌باشد. از آنجا که ابزارهای برشی استفاده شده در این تحقیق از نوع ابزارهای بدون پوشش هستند، سطح ابزار شرایط مناسب‌تری برای ایجاد جوش سرد و در پی آن سایش چسبندگی را دارا می‌باشند. مکانیزم‌های سایش در سرعت برشی 50 m/min و پیشروی 0/15 mm/rev در شکل 8 نشان داده شده است. لبه‌ی انباشته[2] نسبتاً زیاد و سایش مالشی و چسبندگی بر روی سطح آزاد ابزار قابل مشاهده است. چسبندگی ماده‌ی قطعه‌کار که تحت کارسختی قرار گرفته است، باعث تشکیل لبه‌ی انباشته بر روی لبه‌ی ابزار می‌شود[27]. لبه‌ی انباشته‌ی ایجاد شده پایدار نیست. در نتیجه تشکیل و از بین رفتن متناوب لبه‌ی انباشته در مدت زمان ماشینکاری باعث تغییر در هندسه‌ی لبه‌ی ابزار برشی و ایجاد نوسانات در نیروهای برشی شده و بر روی کیفیت سطح و عمر ابزار تأثیرگذار است[28]. در سرعت 70 m/min و پیشروی 0/1 mm/rev (شکل 9) لبه‌ی انباشته نسبت به سرعت 50 m/min کمتر است ولی با این وجود سایش چسبندگی به‌همراه سایش مالشی بر روی ابزار دیده می‌شود. همچنین شکاف عمق برش در این تصویر قابل مشاهده می‌باشد. در شکل 10 مکانیزم‌های سایش ابزار برشی در سرعت 70 m/min و پیشروی 0/15 mm/rev نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از میزان سایش چسبندگی کاسته شده و لبه‌ی انباشته کمتری مشاهده می‌شود ولی سایش مالشی افزایش پیدا کرده است. سایش مالشی به علت وجود ذرات ساینده در ریزساختار سوپرآلیاژها اتفاق می‌افتد[16]. لبه‌ی انباشته و لایه‌های چسبیده شده بر روی سطح آزاد ابزار با جزئیات بیشتر در شکل 11 نشان داده شده است.

در شکل 12 مکانیزم‌های سایش ابزار در سرعت 90 m/min و پیشروی 0/15 mm/rev نشان داده شده است. با توجه به شکل، سایش مالشی بیشتر و شکاف عمق برش از جمله مکانیزم‌های سایش در هنگام براده‌برداری با این پارامترهای برشی می‌باشد. لبه‌ی انباشته نیز بر روی لبه‌ی ابزار مشاهده می‌شود. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی می‌توان نتیجه گرفت که هرچه سرعت برشی و نرخ پیشروی افزایش پیدا می‌کند، از سایش چسبندگی کاسته شده و سایش مالشی آن افزایش می‌یابد.



شکل 12 تصویر SEM مربوط به ابزار برشی در سرعت 90 m/min و پیشروی 0/15 mm/rev

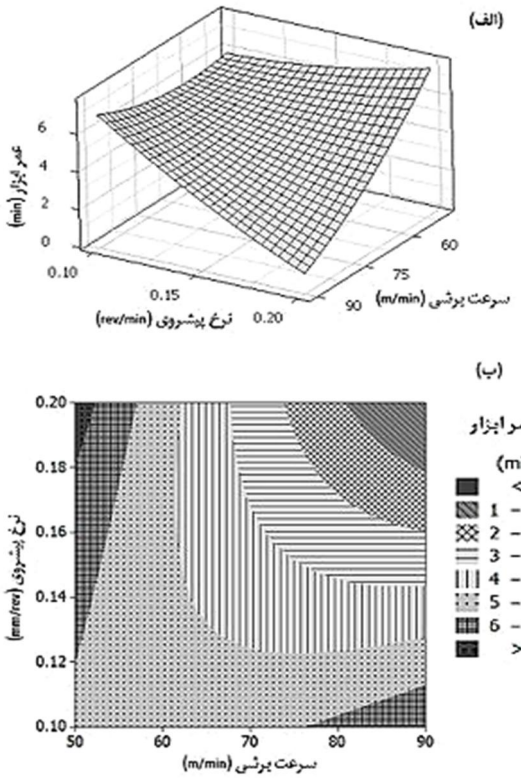
1- Adhesive wear
2- Built-up edge

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.30.7]

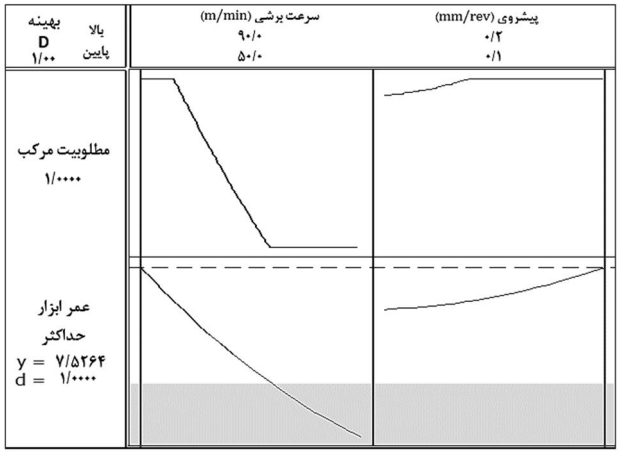
به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر عمر ابزار، نمودارسه بعدی و نمودار کانتوری سطح مربوط به تأثیر هم‌زمان سرعت برشی و نرخ پیشروی بر عمر ابزار در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سرعت‌های برشی پایین و پیشروی کم، عمر ابزار بیشتر است و هرچه بر سرعت برشی و پیشروی افزوده می‌شود از عمر ابزار کاسته می‌شود. به این ترتیب در بالاترین سرعت برشی و نرخ پیشروی، یعنی سرعت 90 m/min و نرخ پیشروی 0/2 mm/rev کمترین مقدار عمر ابزار پیش‌بینی می‌شود.

4-3- فرآیند بهینه‌سازی

در این تحقیق، پارامترهای بهینه‌ی ماشینکاری به‌منظور به‌دست آوردن بیشترین مقدار عمر ابزار به کمک تابع مطلوبیت بررسی شده است. در ابتدا مقادیر پاسخ، به مقادیر مطلوبیت که در محدوده‌ی 0 تا 1 قرار دارند تبدیل شدند. مقدار 1 بیانگر این است که مقدار پاسخ به‌دست آمده بسیار به هدف نزدیک است و مقدار صفر بیانگر دور بودن مقادیر پاسخ از هدف می‌باشند[29]. در جدول 7 خلاصه قیود به‌کار رفته در فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری آورده شده‌اند. نتیجه‌ی فرآیند بهینه‌سازی به روش رویه‌ی پاسخ نیز در جدول 8 نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای بهینه‌سازی که در شکل 14 نشان داده شده است، مقدار بهینه‌ی پارامترهای ماشینکاری برای به‌دست آوردن عمر ابزار 7/526 دقیقه، سرعت برشی 50 m/min و پیشروی 0/2 mm/rev پیش‌بینی می‌شود. مقدار تابع مطلوبیت در این پارامترها 1 است. به‌منظور بررسی دقت نتیجه‌ی فرآیند بهینه‌سازی، یک آزمایش خطاسنجی به انجام رسید. به این ترتیب مشاهده می‌شود که عمر ابزار پیش‌بینی شده توسط فرآیند بهینه‌سازی با اختلاف کمتر از 7 درصد با نتیجه آزمایش تجربی، مقدار قابل قبول است.



شکل 13 (الف) نمودار سه بعدی سطح مربوط به تأثیر هم‌زمان سرعت برشی و نرخ پیشروی بر عمر ابزار، (ب) نمودار کانتوری تأثیر همزمان سرعت برشی و نرخ پیشروی بر عمر ابزار



شکل 14 نمودارهای بهینه‌سازی به کمک روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ

جدول 7 قیود به کار رفته در بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری برای عمر ابزار

شرایط ماشینکاری	هدف	حد پایین	حد بالا
سرعت برشی (m/min)	در محدوده‌ی ماشینکاری	50	90
پیشروی (mm/rev)	در محدوده‌ی ماشینکاری	0/1	0/2
عمر ابزار (min)	مقدار حداکثر	3	6/2

جدول 8 پارامترهای بهینه‌ی ماشینکاری برای عمر ابزار در ابزار بدون پوشش

پارامترهای ماشینکاری بهینه		عمر ابزار (min)		نتایج آزمایش خطا سنجی	درصد خطا
سرعت برشی (m/min)	نرخ پیشروی (mm/rev)	مقدار پیش‌بینی شده	مطلوبیت		
50	0/20	7/52	1	7/06	6/12

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر پارامترهای ماشینکاری (سرعت برشی و نرخ پیشروی) بر عمر ابزار در ماشینکاری سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل N-155 مورد مطالعه قرار گرفت. اینسرت‌های تراشکاری کاربیدی بدون پوشش با گرید H13A به‌عنوان ابزار برشی استفاده شدند. روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ به‌عنوان روش طراحی آزمایش و به‌منظور برازش مدلی برای برقراری رابطه بین پارامترهای ورودی و متغیرهای خروجی انتخاب شد. بررسی مناسب بودن مدل و متغیرهای مربوط به آن توسط تجزیه و تحلیل واریانس انجام گرفت. همچنین تأثیر هم‌زمان سرعت برشی و نرخ پیشروی به‌کمک نمودارهای سه بعدی بررسی شدند. مکانیزم‌های سایش و نوع از کارافتادگی ابزار در سرعت‌های برشی و پیشروی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و علاوه بر این، فرآیند بهینه‌سازی به روش رویه‌ی پاسخ برای دستیابی به بیشترین مقدار عمر ابزار با کمک تابع مطلوبیت به انجام رسید. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

1. با استفاده از نمودارهای احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها و مقایسه‌ی مقادیر پیش‌بینی شده و نتایج تجربی نشان داده شد که مدل برازش شده مناسب بوده و تطابق خوبی بین نتایج تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده وجود دارد.
2. با توجه به نتایج آنالیز واریانس، تعامل سرعت بررشی و پیشروی مؤثرترین پارامتر بوده و سرعت برشی بیش از نرخ پیشروی بر عمر ابزار تأثیرگذار است.
3. نتایج تجزیه و تحلیل مکانیزم‌های سایش توسط تصاویر میکروسکوپ

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.30.7]

الکترونی روبشی نشان می‌دهد که سایش مالشی و سایش چسبندگی مکانیزم‌های غالب سایش در این تحقیق می‌باشند.

4. مکانیزم‌های سایش دیگر از جمله لبه‌ی انباشته و شکاف عمق برش در تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده می‌شوند.

5. با افزایش سرعت برشی و میزان پیشروی، از سایش چسبندگی کاسته و بر میزان سایش مالشی افزوده می‌شود.

6. نتایج فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری به کمک تابع مطلوبیت نشان می‌دهد که سرعت برشی 50 m/min و نرخ پیشروی 0/2 mm/rev پارامترهای بهینه‌ی ماشینکاری می‌باشند و پیش‌بینی می‌شود که عمر ابزار با استفاده از این مقادیر برابر با 7/526 دقیقه شود.

6- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مدیرعامل محترم شرکت ریخته‌گری دقیق پارس، جناب آقای مهندس زمانی و مدیرعامل محترم شرکت تجربه نور، جناب آقای مهندس عرب عامری که با تأمین قطعات سوپرآلیاژ ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنند.

7- مراجع

[1] R. Arunachalam, M. Mannan, Machinability of nickel-based high temperature alloys, *Machining Science and Technology,* Vol. 4, No. 1, pp. 127-168, 2000

[2] S. Amini, H. Khakbaz, Investigation of tool life with simple and viper ceramic tools in near drymachining in high speed turning, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 1, pp. 83-88, 2014. (In Persian)

[3] F. C. Campbell, Manufacturing technology for aerospace structural materials: *Elsevier Amsterdam, the Netherlands,* 2006.

[4] M. J. Donachie, Superalloys a technical guide: *ASM international,* 2002.

[5] R. M'saoubi, J. Outeiro, B. Changeux, J. Lebrun, A. Morao Dias, Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels, *Journal of materials processing technology,* Vol. 96, No. 1, pp. 225-233, 1999.

[6] S. Hanasaki, J. Fujiwara, M. Touge, Y. Hasegawa, K. Uehara, Tool wear of coated tools when machining a high nickel alloy, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 39, No. 1, pp. 77-80, 1990.

[7] K. Kutschej, P. Mayrhofer, M. Kathrein, P. Polcik, C. Mitterer, A new low-friction concept for Ti< sub> 1– x</sub> Al< sub> x</sub> N based coatings in high-temperature applications, *Surface and Coatings Technology,* Vol. 188, pp. 358-363, 2004.

[8] A. Sharman, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718™, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 118, No. 1, pp. 29-35, 2001.

[9] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere, Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools, *Wear,* Vol. 262, No. 7, pp. 931-942, 2007.

[10] A. Bhatt, H. Attia, R. Vargas, V. Thomson, Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718, *Tribology International,* Vol. 43, No. 5, pp. 1113-1121, 2010.

[11] A. Jawaid, S. Koksal, S. Sharif, Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 116, No. 1, pp. 2-9, 2001.

[12] R. Arunachalam, M. Mannan, A. Spowage, Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 44, No. 9, pp. 879-887, 2004.

[13] M. El-Bestawi, T. El-Wardany, D. Yan, M. Tan, Performance of whisker-reinforced ceramic tools in milling nickel-based superalloy, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 42, No. 1, pp. 99-102, 1993.

[14] A. Altin, M. Nalbant, A. Taskesen, The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools, *Materials & design,* Vol. 28, No. 9, pp. 2518-2522, 2007.

[15] R. Arunachalam, M. Mannan, A. Spowage, Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 44, No. 14, pp. 1481-1491, 2004.

[16] E. Ezugwu, Z. Wang, A. Machado, The machinability of nickel-based alloys:a review, *Journalof Materials Processing Technology,* Vol. 86, No. 1, pp. 1-16, 1998.

[17] B. Subhas, R. Bhat, K. Ramachandra, H. Balakrishna, Simultaneous optimization of machining parameters for dimensional instability control in aero gas turbine components made of Inconel 718 alloy, *Journal of manufacturing science and engineering,* Vol. 122, No. 3, pp. 586-590, 2000.

[18] J. Cantero, J. Díaz-Álvarez, M. Miguélez, N. Marín, Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718, *Wear,* 2012.

[19] A. Devillez, G. Le Coz, S. Dominiak, D. Dudzinski, Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 211, No. 10, pp. 1590-1598, 2011.

[20] S. Ramesh, L. Karunamoorthy, K. Palanikumar, Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5), *Measurement,* Vol. 45, No. 5, pp. 1266-1276, 2012.

[21] H. Aouici, M. A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki, J. F. Rigal, Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization, *Measurement,* Vol. 45, No. 3, pp. 344-353, 2012.

[22] International Standard ISO 3685. Tool life testing in single point turning tools, 2nd ed. 1993-11-15.

[23] S. E. E. Shahri, K. Khalili, S. Y. Ahmadi-Brooghani, optimization of loading curve in tube hydroforming process using mutilevel response surface, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 13, pp. 176-187, 2013. (In Persian)

[24] U. Natarajan, P. Periyanan, S. Yang, Multiple-response optimization for micro-endmillingprocess using response surface methodology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 56, No. 1-4, pp. 177-185, 2011.

[25] M. Ghoreishi, V. Mirzaloo, Quality Improvement of Surfaces Machined by Wire Electrical Discharge Process through Sand Blasting, *Mechanical Aerospace Engineering Journal,* Vol. 4, No. 3, pp. 1-15, 2007. (In Persian)

[26] J. P. Davim, Machining: fundamentals and recent advances: *Springer,* 2008.

[27] M. Razfar, principles of Machining, *Amirkabir University of Technology,* 2006. (In Persian)

[28] Z. Hao, D. Gao, Y. Fan, R. Han, New observations on tool wear mechanism in dry machining Inconel718, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 51, No. 12, pp. 973-979, 2011.

[29] G. Derringer, Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality Technology,* Vol. 12, pp. 214-219, 1980.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.30.7]