



Investigating Machinability and Surface Integrity in Dry Machining Simulation of Titanium Alloy Made by Additive Manufacturing and Experimental Validation



ARTICLE INFO

Authors

Jafarian F^{1*}

Fallah M M²

Bahrami yarahmadi M²

1 Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran.

2 Shahid Rajaei Teacher Training University

*Correspondence

Address: Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat
Farshid.jafarian@ymail.com

How to cite this article

Jafarian F, Fallah MM, Bahrami M. Investigating machinability and surface integrity in dry machining simulation of titanium alloy made by additive manufacturing and experimental validation. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):101-106.

ABSTRACT

The development of reliable numerical tools for predicting the integrity of machined surfaces is significant. This paper introduces a new customized FE model to predict the deformation during turning of electron beam fused (EBM) Ti6Al4V alloy under dry cutting. The needle microstructure and exotic nano-hardness types of materials are modeled and implemented using a user subroutine in the FE model. The developed FE model provides the possibility of predicting the microstructure (thickness of alpha lamella), the changes in nano-hardness caused by machining operations in dry conditions.

Keywords Surface Integrity, Additive Manufacturing, Ti6Al4V Alloy, Machinability, Dry machining

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۰۱-۱۰۶



بررسی قابلیت ماشینکاری و سلامت سطح در شبیه سازی ماشینکاری خشک آلیاژ
تیتانیوم تولید شده به روش ساخت افزایشی و اعتبار سنجی تجربی



چکیده

مشخصات مقاله

نویسنده ها

فرشید جعفریان^{۱*}

محمد مقاد فلاح^۲

محسن بهرامی یاراحمدی^۲

^۱ مرکز آموزش عالی محلات، محلات

^۲ دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* نویسنده مسئول

آدرس: مرکز آموزش عالی محلات، محلات

farshid.jafarian@ymail.com

امروزه توسعه ابزارهای عددی قابل اعتماد برای پیش‌بینی یکپارچگی سطح ماشینکاری شده از اهمیت اولیه برخوردار شده است. این مقاله یک مدل FE سفارشی جدید را برای پیش‌بینی تغییرات ریزساختاری ایجاد شده در طول تراشکاری آلیاژ Ti6Al4V ذوب شده با پرتو الکترونی (EBM) تحت برش خشک معرفی می‌کند. ریزساختار سوزنی ریز عجیب و غریب مواد و تنوع نانو سختی با استفاده از یک زیربرنامه کاربر در مدل FE مدل سازی و پیاده سازی می‌شوند. مدل FE توسعه یافته امکان پیش‌بینی ریزساختار (ضخامت لاملا آلفا)، تغییرات نانو سختی ناشی از عملیات ماشین‌کاری در شرایط خشک را فراهم می‌کند. در ابتدا مدل با مقایسه ضخامت فاز آلفا لامیا و همچنین نانو سختی پیش‌بینی شده با نیروی آزمایشی تحت چند شرایط برش کالیبره و اعتبارسنجی می‌شود. سپس با استفاده از مدل ماده اعتبار سنجی شده به پیش‌بینی تأثیرات زوایای ابزار بر روی ضخامت فاز لامیا و همچنین نانو سختی پرداخته شد.

کلیدواژه ها: یکپارچگی سطح، ساخت افزایشی، ماشینکاری خشک، آلیاژ Ti6Al4V و قابلیت ماشینکاری

۱- مقدمه

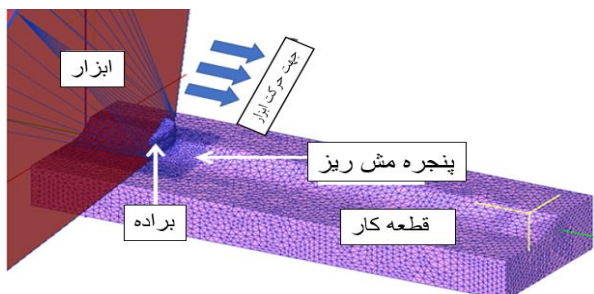
تیتانیوم یک ماده ساختاری جدید است که دارای خواص جامع عالی مانند چگالی کم، استحکام ویژه بالا و چقرمگی شکست، استحکام خستگی و مقاومت در برابر انتشار ترک، چقرمگی خوب در دمای پایین و مقاومت در برابر خوردگی عالی است. بنابراین، آلیاژهای تیتانیوم به طور فزاینده ای در صنایع هوایی، هوافضا، شیمیایی، کشتی سازی و سایر بخش های صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند. در نتیجه ماشینکاری آلیاژ تیتانیوم و یکپارچگی سطح پس از ماشینکاری بسیار حائز اهمیت می باشد. با این حال، آلیاژهای تیتانیوم به عنوان مواد بسیار دشوار ماشینکاری در نظر گرفته می شوند. مطالعات متعددی در مورد یکپارچگی سطح پس از ماشینکاری آلیاژهای تیتانیوم انجام شده است. آمبرلو و همکاران به مطالعه تجربی ارزیابی تأثیر چندین پارامتر فرآیند بر تغییرات یکپارچگی سطح آلیاژ Ti6Al4V و بهبود عملکرد کلی فرآیند/محصول پرداختند^[1] در مطالعاتی که توسط وینایاگامورتی و همکارش با هدف بررسی یکپارچگی سطح ماشینکاری دقیق آلیاژ Ti6Al4V در شرایط برش خشک انجام شده است. به این نتیجه رسیده اند که مقادیر زبری سطح ثبت شده بیشتر تحت تأثیر نرخ تغذیه و هندسه شعاع دماغه ابزار قرار دارد^[2]. بنابراین باتوجه به ماشینکاری تقریباً دشوار آلیاژ تیتانیوم و علم به این نکته که هر کاری که می توان برای تولید یک جزء نزدیک به پیکربندی نهایی انجام شود، منجر به کاهش هزینه می شود^[3]. از این رو تحقیقات متعدد در مورد فرآیندهای مختلف با هزینه کمتر شده است که یکی از این فرآیندها، تولید قطعات از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V به روش ساخت افزودنی (AM) می باشد. در صنعت تولید، فناوری های ساخت افزودنی (AM) توجه بیشتری را توسط چندین زمینه صنعتی پیشرفته به خود جلب می کنند که در حال متحول کردن طرح ها و استراتژی های استاندارد خود برای تولید محصولات پلاستیکی و فلزی هستند. علی رغم محاسن قابل توجه روش های AM، کیفیت سطح و دقت ابعادی ضعیف قطعات تولید شده از محدودیت های روش ساخت افزایشی می باشد. بنابراین، معمولاً عملیات ماشینکاری پرداخت برای قطعات تولیدی با روش های AM مورد نیاز است تا محدودیت های روش ساخت افزایشی بر طرف گردد^[4]. هوانگ و همکاران با مطالعاتی که در خصوص مقایسه پرداخت سطح پس از ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V ساخته شده به روش معمولی و AM داشته اند به این نتیجه رسیده اند که آلیاژ Ti6Al4V تولید شده به روش افزایشی دارای زبری سطح کمتری می باشد و همچنین راهکارهایی برای بهینه سازی پارامترهای ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V به روش افزایشی ارائه دادند^[5]. تجزیه تحلیل تأثیر هریک از پارامترهای ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V تولید شده به روش افزایشی روی محصول نهایی به منظور دستیابی به پارامترهای بهینه ماشینکاری در حین عملیات براده برداری و به صورت تجربی بسیار زمان بر، پرهزینه و دشوار است. بنابراین شبیه سازی سه بعدی فرآیند ماشینکاری ابزار بسیار مهمی برای درک عمیق آنها است^[6]. مدل های عددی مبتنی بر روش اجزای محدود (FEM) به طراح کمک می کند تا فرآیند تولید را طراحی و بهینه سازی کند و همچنین بهترین پارامترهای عملیاتی نظیر توان مصرفی، میدان حرارتی، سایش ابزار، یکپارچگی سطح و کیفیت کلی محصول را

می توان به خوبی با مدل سازی عددی پیش بینی کرد^[7] آمبرلو و همکاران نیز با معرفی یک مدل FE سفارشی جدید برای پیش بینی تغییرات ریزساختاری ایجاد شده در ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V ذوب شده با پرتو الکترونی (EBM) تحت برش خشک و خنک سازی بروندی، ریزساختار (ضخامت لاملا آلفا)، تغییر شکل پلاستیک (تغییر شکل لاملا آلفا) و تغییرات نانو سختی ناشی از عملیات ماشینکاری در شرایط خشک و بروندی را بررسی کردند^[1]. تاکنون تحقیقات محدودی در خصوص ماشینکاری تولید شده با استفاده از روش ساخت افزایشی آلیاژ Ti6Al4V و بررسی پارامترهای موثر در یکپارچگی سطح پس از ماشینکاری صورت پذیرفته است. این امر میتواند به دلیل محدودیت مدل ماده موجود، چالش های ارائه زیربرنامه مناسب جهت شبیه سازی تغییرات میکروسختی و مطالعات اندک تجربی جهت اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی باشد. لذا در این مقاله به منظور پوشش این خلاء و کمبود مطالعات صورت پذیرفته در این راستا، شبیه سازی سه بعدی عملیات ماشینکاری در شرایط خشک بر روی آلیاژ Ti6Al4V EBM صورت پذیرفت. یک مدل FE مبتنی بر JC مطابق با ریز ساختار و پیش بینی ضخامت فاز آلفا لاملا زیر برنامه نویسی شد و در کد FE پیاده سازی گردید. شرایط شبیه سازی در سه سطح سرعت برش در شرایط ماشینکاری خشک با نتایج متناظر تجربی (شامل: دما نیرو و تغییرات میکروساختاری) اعتبارسنجی شد. سپس تأثیر هندسه و زوایای ابزار برشی روی خروجی های فرآیند مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

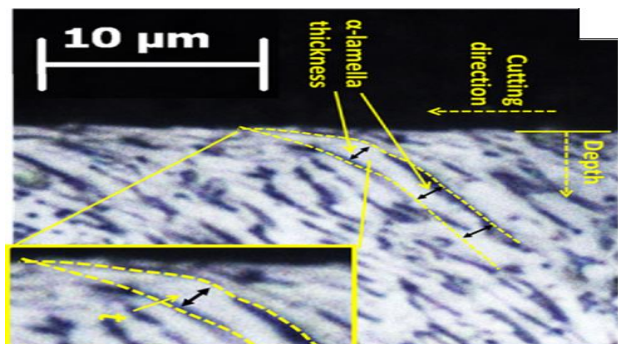
۲- شبیه سازی

۲-۱- مش بندی

برای مدل سازی عددی ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V EBM از نرم افزار 3D-DEFORM استفاده شد. این نرم افزار از فرمول لاگرانژی به روز شده با استراتژی remeshing استفاده می کند که باعث تشکیل براده پیوسته بدون نیاز به تعریف معیار جداسازی تراشه می شود. برای قطعه کار مش ریز (۸۵۰۰۰ المان)، در نظر گرفته شد و برای دقت بیشتر در محل تشکیل براده مش ریزتر (با ضریب ۰/۳٪) لحاظ شد که با حرکت ابزار در طول قطعه کار جابجا شود. شکل ۱ مدل سازی سه بعدی فرآیند ماشینکاری را با توزیع پنجره مش ریز در نزدیکی منطقه برش نشان می دهد. همچنین از شرایط اصطکاکی با مدل ترکیبی چسبنده/لغزنده (sticking-sliding) در محل تماس ابزار و براده استفاده شد.



شکل ۱: مدل سازی سه بعدی فرآیند ماشینکاری



شکل ۲: ضخامت فاز آلفا [۱۳]

$$T^* = T - 199$$

رابطه (۳)

$$A = \varepsilon^{-36530}$$

رابطه (۴)

$$t = 0.873 + 1.5 \times 10^{-6} A - 2.3 \times 10^{-4} T^* + 3.7 \times 10^{-10} A^2 + 1.9 \times 10^{-8} T^*^2$$

رابطه (۵)

$$AT^* + 5.1 \times 10^{-6} T^*^2$$

$$NH = C_0 + C_1 / \sqrt{t}$$

رابطه (۶)

به منظور شبیه سازی ضخامت لاملاهای فاز آلفا و میکروسختی در سطح پس از ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V EBM از زیر برنامه نویسی پیشرفته در نرم افزار (3D) Deform استفاده شد. بر این اساس، بعد از شبیه سازی فرآیند ماشینکاری و رسیدن به شرایط پایداری حرارتی و مکانیکی، مقادیر دما و نرخ کرنش به عنوان ورودی های زیر برنامه جدید معرفی گردید. در این زیر برنامه به ازای هر المان مقدار ضخامت لاملاهای فاز آلفا بر اساس رابطه (۵) محاسبه می شود و به عنوان یک خروجی جدید شبیه سازی معرفی می گردید. همین روند برای شبیه سازی تغییرات سختی بر اساس رابطه هال-پیچ (۵) بکار گرفته شد.

۳-۲- شبیه سازی خنک کاری برودتی

ابزار برش و قطعه کار در تبادل حرارت با دمای محیط ۲۰ درجه سانتی گراد می باشند. ضریب انتقال حرارت که یک مقدار استاندارد برای همرفت هوای آزاد در نرم افزار DEFORM است 2 (W/(m2K)) در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی اثر سرمایش برودتی یک پنجره محیطی برای تبادل حرارت بین سطح ماشینکاری شده و سمت کناری ابزار، در نزدیکی شعاع ابزار با تنظیم دمای محلی ۱۹۶- درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. ضریب همرفت (h_{cryo}) با هدف دستیابی به یک وضعیت پایدار حرارتی در رابط تراشه ابزار در یک زمان محاسباتی کوتاه، با فرض یک تماس حرارتی کامل، یک انتقال حرارت جهانی، برابر با ۱۰۰۰۰۰ کیلووات/(m2/K) تنظیم شد.

۳- آزمایشات تجربی:

از نتایج آزمایشات انجام شده در تحقیقات بوردین [۱۳] و امبرلو [13] در خصوص ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V EBM استفاده شده است به این ترتیب که نتایج نیروها و دمای ماشینکاری از [10] استفاده شد و تغییرات میکروسختی از [11] استفاده شد.

لازم به ذکر است که در دو تحقیق از یک تیم تحقیقاتی بوده که شرایط ماشینکاری، هندسه ابزار و جنس قطعه کار در هر دو تحقیق یکسان می باشد. آزمایشات بر روی یک ماشین تراش CNC مجهز به سیستم تامین نیتروژن مایع به طور مستقیم به منطقه برش انجام شد. ابزار برش مورد استفاده، از جنس کاربید بدون پوشش، CNMG 120404-23 H13A نصب شده بر روی یک نگهدارنده ابزار PCLNR/L 2020K12 استفاده. زوایای براده و آزاد ابزار به ترتیب برابر با ۷ درجه و ۸ درجه می باشد و زاویه تنظیم ۹۵ درجه توسط هندسه نگهدارنده ابزار اعمال شد. آزمایش های ماشینکاری

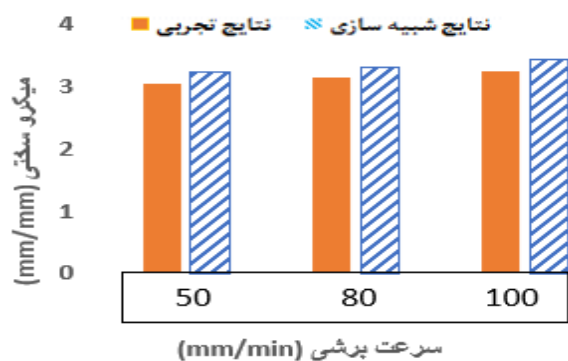
۲-۲- مدل ماده:

اکثر مدل های ماده ارائه شده برای شبیه سازی فرآیند براده برداری Ti6Al4V بر اساس معادله J-C است [۹،۸]. در این راستا مدل ماده J-C اصلاح شده توسط Ozel [10] ارائه شد. این مدل ماده اصلاح شده قابلیت بهتری در پیش بینی هندسه براده و نیروهای ماشینکاری از مدل جانسون-کوک استاندارد همراه با یک معیار آسیب، (مانند مدل های Latham و Cockcroft) نشان داد [11]. در این مدل ماده اکثر نرم شوندگی ماده (thermal softening effect) که سبب ایجاد باند برشی آدیاباتیک (adiabatic shear band) در ناحیه تغییر شکل اولیه (primary shear zone) می گردد، بصورت روابط اصلاحی به مدل ماده JC اضافه شد. این مدل ماده به شرح به صورت زیر ارائه شد:

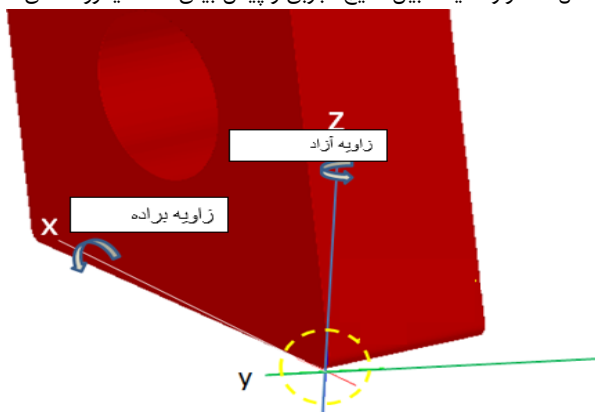
رابطه (۱)

$$\sigma = [(A) + B \varepsilon^n] [1 + c \ln((\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0))] [1 - ((T - T_r)/(T_m - T_r))^m] \times [D + (1 - D) \tanh(1/(\varepsilon + p)^q)]$$

در این معادله ثابت های B، C، n و m در تحقیقات آقای کارلی لین [12] استفاده شد و r و s پارامترهای پیشنهاد شده توسط Ozel و همکاران هستند. [۹]، همچنین ثوابت D و P از تحقیق [10] استفاده شدند. دمای اتاق (T_r) نیز برابر ۱۹۶- سانتیگراد برای ماشینکاری برودتی تنظیم شد. در تحقیقی که توسط بوردین و همکاران جهت شبیه سازی فرآیند ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V انجام شد، از مدل ماده اصلاح یافته بالا و ضرایب مذکور استفاده شد. البته ثابت A بعد از اعمال فرآیند کالیبره کردن افزایش پیدا کرد و میزان ۹۴۰ (MPa) در نظر گرفته شد. در این تحقیق با استفاده از پیاده سازی زیر برنامه (subroutine) در نرم افزار اجزاء محدود از این مدل ماده جهت شبیه سازی فرآیند ماشینکاری استفاده شد. با توجه به فقدان مدل های فیزیکی موجود در کارهای گذشته که تغییرات ضخامت لاملا را بر اساس تبلور مجدد دینامیکی معرفی کند، در تحقیقی که توسط امبرلو و همکاران صورت پذیرفت یک مدل تجربی برای مدل سازی تغییرات میکروساختاری فاز ضخامت لاملا آلیاژ EBM Ti6Al4V پیشنهاد دادند [10]. در این مدل ضخامت لاملاهای تجربی نزدیک به سطح ماشینکاری با داده های دما (T) و نرخ کرنش (ε̇) بدست شده توسط شبیه سازی در لایه های سطحی پس از ماشینکاری مرتبط گردید. مدل رگرسیون ضخامت لاملا در روابط (۳) تا (۶) مشخص می باشد [13]. در واقع، رابطه (۵) نشان دهنده ضخامت لاملاهای فاز آلفا (بر حسب میکرومتر) است. شکل ۲ ضخامت فاز آلفا را نشان می دهد. همچنین به منظور شبیه سازی تغییرات نانوسختی که در سطح پس از ماشینکاری از رابطه ها-پیچ (رابطه ۶) استفاده شد. در این رابطه مقدار ضخامت لاملا با استفاده از ضرایب ثابت C0 و C1 به میزان سختی در سطح پس از ماشینکاری مرتبط می شود. این ضرایب با توجه به نتایج تجربی به ترتیب مقادیر ۲۳۴ و ۴۵۶ کالیبره شدند.



شکل ۵: نمودار مقایسه بین نتایج تجربی و پیش بینی شده میکرو سختی



شکل ۶: هندسه و زوایای ابزار مورد بررسی

در ابتدا تاثیر زوایای ابزار رو بر ضخامت فاز آلفا بررسی می‌کنیم. شکل ۷ تاثیر زوایای ابزار را روی ضخامت آلفا لامیا نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل مشاهده می‌شود ضخامت فاز آلفا در زوایای مختلف بین ۲۰ تا ۴۰ میکرون به قطعه خام می‌رسد. همچنین با افزایش زاویه آزاد و براده این ضخامت رو به افزایش می‌باشد. در مرحله بعد تاثیر زوایای قلم روی میکرو سختی بررسی شد. شکل ۸ تاثیر زوایای آزاد و براده را روی میکرو سختی نشان می‌دهد. همانطور که از تصاویر پیدا است میکرو سختی در فاصله بین ۲۲ تا ۳۸ میکرون به قطعه خام می‌رسد. و قابل توجه می‌باشد که با افزایش زاویه آزاد و براده این مقدار افزایش خواهد یافت. جمع بندی:

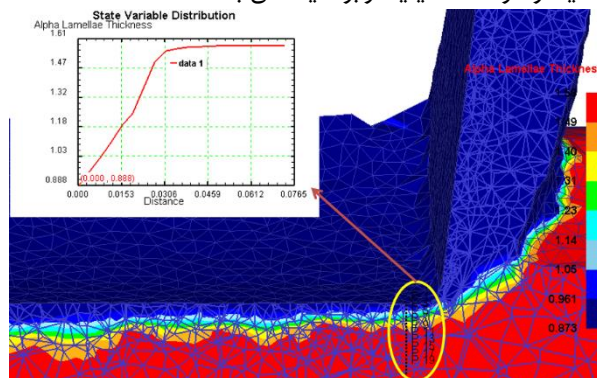
این مقاله یک مدل FE از عملیات تراشکاری نیمه تمام انجام شده بر روی EBM Ti6Al4V در شرایط ماشین کاری خشک ارائه می‌کند. یک مدل جانسون کوک اصلاح شده تایید شده برای EBM Ti6Al4V اجرا شد و با یک مدل اصطکاک چسبنده - لغزشی ترکیبی برای مدل‌سازی نیروهای اصطکاک بر روی ابزار برش همراه شد.

مدل با مقایسه ضخامت فاز آلفا لامیا و همچنین نانو سختی پیش‌بینی شده با نیروی آزمایشی تحت چند شرایط برش با خطایی بسیار ناچیز کالیبره و اعتبارسنجی شد.

سپس با استفاده از مدل ماده اعتبارسنجی شده به پیش بینی تاثیرات زوایای ابزار بر روی ضخامت فاز لامیا و همچنین نانو سختی پرداخته و به نتایج زیر دست یافته است:

برودتی با هدف اعتبارسنجی مدل عددی با سرعت های برشی ۵۰ و ۸۰ و ۱۱۰ متر بر دقیقه و نرخ تغذیه ۰/۱ و ۰/۲ میلیمتر و عمق برش ۰/۲ میلیمتر انجام شده است. مختلف ماشینکاری انجام شد. ۴- اعتبارسنجی:

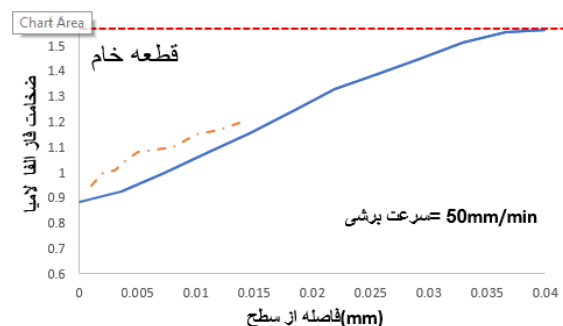
مدل FE با مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده از طریق شبیه سازی توسط داده های تغییرات می کرو ساختاری اعتبارسنجی گردید. در ابتدا نمودارهای روند ضخامت فاز آلفا لامیا از نرم افزار استخراج گردید. شکل ۳ نمونه استخراج روند ضخامت فاز آلفا لامیا در سرعت ۵۰ میلیمتر بر دقیقه می باشد.



شکل ۳: نمودار روند ضخامت فاز آلفا در سرعت ۵۰ mm/min

در شکل ۴ نمودارهای روند ضخامت فاز آلفا لامیای پیش بینی شده با نتایج تجربی در سرعت ۵۰ میلیمتر بر دقیقه کرده است. مدل ماده با اختلاف اندکی ضخامت فاز آلفا را پیش بینی نموده است.

— Experiment — Numerical



شکل ۴: مقایسه نمودار روند ضخامت فاز آلفا لامیا در سرعت ۵۰ (mm/min)

در مرحله بعدی مدل ماده از نظر میکرو سختی سطح قطعه کار اعتبارسنجی شد. شکل ۵ نمودار مقایسه میکرو سختی تجربی با نتایج پیش‌بینی شده در سرعت های مختلف انجام شد. مدل ماده به خوبی میکروسختی را با اختلاف اندکی پیش بینی کرده است. ۵- نتایج و بحث:

مدل ماده کالیبره شده به خوبی می تواند تاثیر زوایای ابزار را بر روی تغییرات فاز لامیلا و میکرو سختی را پیش بینی کند. لذا در ادامه این تحقیق از مدل اجزاء محدود کالیبره شده جهت بررسی تاثیر تغییرات زوایای ابزار برشی بر روی خروجی های فرآیند ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V استفاده شد. در شکل ۶ هندسه و زوایای ابزار مورد بررسی را نشان می دهد.

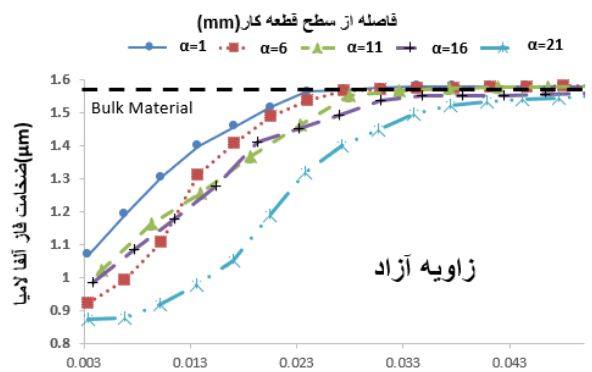
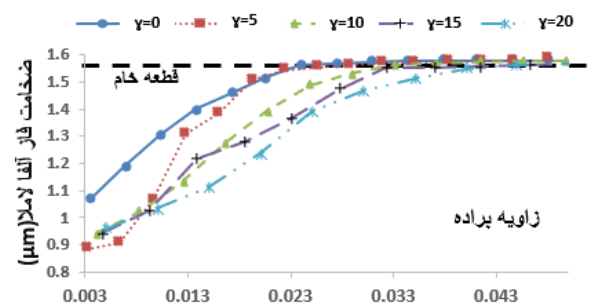
جهت مشخص شدن تاثیر زوایای ابزار، زاویه آزاد با مقدارهای ۱- ۲۱-۱۶-۱۱-۶ درجه و همچنین زاویه براده با مقادیر ۵-۱۰-۱۵-۲۰- درجه مورد بررسی قرار گرفتند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان این تحقیق اقرار می نمایند که تمامی نتایج مندرج در این مقاله حاصل تحقیق صورت گرفته توسط ایشان و نتایج بدست آمده از آن می باشد.

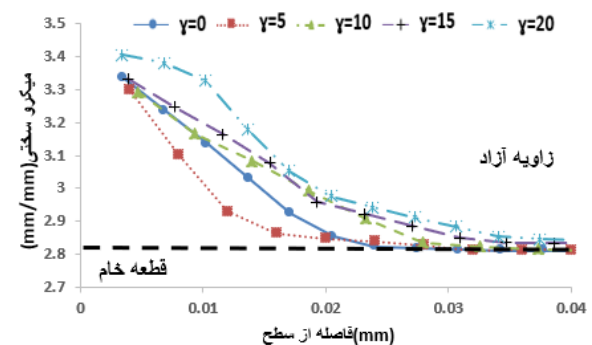
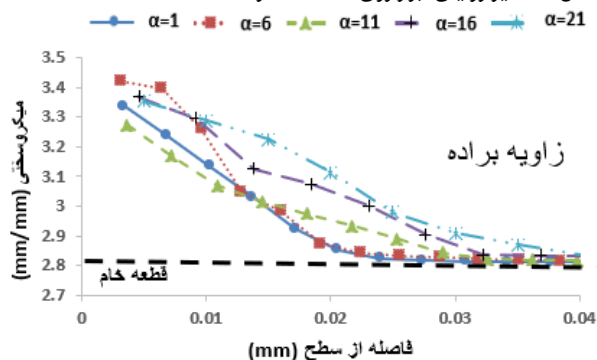
منابع مالی: کلیه هزینه های انجام شده جهت انجام این تحقیق از منابع شخصی صورت گرفته است

مراجع:

- 1- Saffioti MR, Sanguedolce M, Rotella G, Umbrello D. Experimental analysis on machining parameters and cooling conditions affecting surface integrity of Ti6Al4V. 2021.
- 2- Uçak N, Çiçek A, Aslantas K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. Journal of Manufacturing Processes. 2022;80:414-57.
- 3- Dutta B, Froes FS. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys. Metal powder report. 2017;72(2):96-106.
- 4- Uçak N, Çiçek A, Aslantas K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. Journal of Manufacturing Processes. 2022;80:414-57.
- 5- Huang X, Bai Q, Li YT, Zhang B. Machining finish of titanium alloy prepared by additive manufacturing. Applied mechanics and materials. 2017;872:43-8.
- 6- Imbrogno S, Sartori S, Bordin A, Bruschi S, Umbrello D. Machining simulation of Ti6Al4V under dry and cryogenic conditions. Procedia CIRP. 2017;58:475-80.
- 7- Jagadesh T, Samuel G. Mechanistic and finite element model for prediction of cutting forces during micro-turning of titanium alloy. Machining Science and Technology. 2015;19(4):593-629.
- 8- Rotella G, Umbrello D. Finite element modeling of microstructural changes in dry and cryogenic cutting of Ti6Al4V alloy. Cirp Annals. 2014;63(1):69-72.
- 9- Murr L, Esquivel E, Quinones S, Gaytan S, Lopez M, Martinez E, et al. Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V. Materials characterization. 2009;60(2):96-105.
- 10- Bordin A, Imbrogno S, Rotella G, Bruschi S, Ghiotti A, Umbrello D. Finite element simulation of semi-finishing turning of electron beam melted Ti6Al4V under dry and cryogenic cooling. Procedia CIRP. 2015;31:551-6.
- 11- Iquebal A, Shrestha S, Wang Z, Manogharan G, Bukkapatnam S, Youngstown O, editors. Influence of milling and non-traditional machining on surface properties of Ti6Al4V EBM components. Proceedings of the 2016 Industrial and Systems Engineering Research Conference; 2016.
- 12- Özel T, Sima M, Srivastava A, Kaftanoglu B. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with



شکل ۷: تاثیر زوایای ابزار روی ضخامت فاز آلفا



شکل ۸: تاثیر زوایای ابزار روی میکرو سختی

- با افزایش زاویه براده از ۰ تا ۲۰ درجه ضخامت فاز آلفا از ۲۱ به ۳۸ میکرون افزایش می یابد. همچنین میکرو سختی در عمق ۲۳ میکرون به ۴۰ میکرون می رسد
- زاویه آزاد با ضخامت فاز آلفا و همچنین میکرو سختی رابطه مستقیم دارد، به طوری که با افزایش زاویه آزاد از ۲۱ درجه ضخامت فاز آلفا از ۱۹ به ۴۵ میکرون می رسد. در حالی که این افزایش در زاویه ۲۱ درجه به اوج خود رسیده و اختلاف زیادی با زاویه قبلی یعنی ۱۶ درجه دارد. همچنین با افزایش زاویه آزاد عمق میکرو سختی نیز افزایش می یابد

- experiments and finite element simulations. CIRP annals. 2010;59(1):77-82.
- 13- Umbrello D, Bordin A, Imbrogno S, Bruschi S. 3D finite element modelling of surface modification in dry and cryogenic machining of EBM Ti6Al4V alloy. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2017;18:92-100