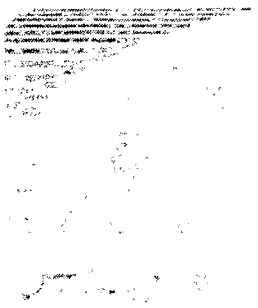
٨٧,١,١٠٠١١٥
٨٧,٩,٢٤

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

١٠٨٦٤٣



دانشکده فنی و مهندسی

رساله دکتری مهندسی مکانیک

شبیه سازی فرآیند فرزکاری با بار جانبی کم با درنظر گرفتن انعطاف پذیری ابزار

محمد کاظمی نصرآبادی

استاد راهنما:
دکتر محمد حسین صادقی

استاد مشاور:
دکتر بهنام معتکف ایمانی

شهریور ۱۳۸۷

۱۳۸۷ /۹/ ۱۰

۱۰۸۶۴۳

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای **محمد کاظمی نصرآبادی** رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان **شبیه سازی فرآیند فرزکاری با بار جانبی کم با در نظر گرفتن انعطاف پذیری ابزار** در تاریخ ۱۳۸۷/۶/۳۱ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمدحسین صادقی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر بهنام معتکف ایمانی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر سیامك اسماعیل زاده خادم	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا قضاوی خوراسگانی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا موحدی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا رازفر	استادیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر سیامك اسماعیل زاده خادم	استاد	

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب محمد کاظمی بضرآبادی دانشجوی رشته مکانیک مقطع دکتری

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: محمد کاظمی بضرآبادی

تاریخ و امضا: ۸۷/۸/۶

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

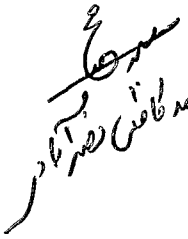
ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء



تقدیم به:

مادرم

که بزرگم کرد و بزرگیم بخشید. او که با محبتهایش رسم عشق ورزیدن را به من آموخت و همچون شمعی سوخت تا روشنی بخش راهم باشد. (روحش شاد)

پدرم

تکیه گاه پرصلابت زندگیم و اسوه باشکوه تلاش که بزرگی را در چشمانش و مهر و عطوفت را در قلبش احساس می کنم. او که اینجا رسیدنم امتداد اندیشه های بلندش و پاسخی است به زحمات بی دریغش. در برابر وجود گرامیش زانوی ادب بر زمین می نهم و با دلی مالامال از عشق و محبت بر دستانش بوسه می زنم

همسرم

که همواره دلسوزانه در کنارم بوده است و با فراهم نمودن محیطی سرشار از عشق و محبت مرا در سالهای تحصیلات عالی یاری نموده است، به پاس همه همدلیها و همراهیهایش.

و تقدیم به:

فرزندان دلبندم علی و فاطمه

تشکر و قدردانی:

به مصداق کلام شریف" *من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق* "

از زحمات و راهنمائیهای حکیمانه اساتید ارجمندم آقایان دکتر محمد حسین صادقی و دکتر بهنام معتکف ایمانی که نظارت بر این پروژه را به عهده داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم و از درگاه ایزد منان سلامتی و موفقیت روزافزون این عزیزان را خواهانم.

همچنین از زحمات اساتید گرانقدرم که در طول تحصیل مرا از دانش سرشار خود بهره مند نمودند تشکر و قدردانی می نمایم.

در پایان از کلیه دوستانی که مرا در انجام این پایان نامه یاری نموده اند تشکر می نمایم.

چکیده

امروزه فرآیند فرزکاری به یکی از پرکاربردترین و متداولترین شیوه های تولید تبدیل شده است. یکی از اهداف اصلی در فرآیند فرزکاری افزایش قابلیت تولید می باشد. ماشینکاری سریع **High Speed Machining (HSM)** شاخه جدیدی در صنعت ماشینکاری انواع قطعات می باشد که در سالهای اخیر، در راستای ارتقاء سطح کیفی ابزارهای برش و قابلیتهای مختلف ماشین ابزار رشد چشمگیری داشته است. یکی از زیر مجموعه های مهم **HSM** فرزکاری با بار جانبی کم**(Low Immersion Milling)** می باشد. در فرزکاری سرعت بالا با بار جانبی کم، کسر زمان ماشینکاری به زمان تناوب اسپیندل عدد کوچکی می باشد. در فرزکاری با بار جانبی کم دو نوع ناپایداری تشخیص داده شده که ارتعاشات خود برانگیخته کلاسیک یا انشعاب **Hopf** و دیگری انشعاب **Flip** ناشی از اثرات ضربه ای هنگام ورود و خروج قطعه کار نامیده شده اند. در فرآیند فرزکاری سرعت بالا پیش بینی دقیق نیروهای برشی برای انتخاب بهینه فرز انگشتی و ماشینهای ابزار از اهمیت زیادی برخوردار است و یکی از نیازهای اساسی برای فرآیند فرزکاری سرعت بالاپیش بینی نواحی برش پایدار می باشد. در روشهای سنتی فرزکاری به منظور کاهش خطاهای ناشی از تغییر مکانهای استاتیکی و همچنین جلوگیری از ارتعاشات خود برانگیخته، پیشروی خیلی کم، سرعت پایین و تعداد زیادی مراحل نیمه پرداخت و پرداخت استفاده می شود و با از بین بردن چند قطعه یا ابزار شرایط بهینه براده برداری بدست می آید. واضح است که هزینه این روشها بالا می باشد. شبیه سازی فرآیند فرزکاری امکان انتخاب شرایط برش مناسب را می دهد. در این تحقیق مدلسازی و شبیه سازی دینامیکی نیروهای برشی در فرآیند فرزکاری انگشتی با استفاده از پارامترهای مودال حاصل از آنالیز مودال ابزار و تحلیل المان محدود ابزار انجام می شود. اثر عمق برش تعیین و قبل از هرگونه عملیات ماشینکاری شرایط براده برداری پیش بینی می شود. همچنین روش تحلیل المان محدود زمانی اصلاح شده که اثر زاویه مارپیچ را برای یک سیستم ارتعاشی دو درجه آزادی در نظر می گیرد به منظور محاسبه دالانهای پایداری فرآیند فرزکاری ارائه شده است. توسط آزمایشات فرزکاری نتایج حاصل از شبیه سازی بررسی شده و مورد تایید قرار گرفته است.

کلمات کلیدی:

ماشینکاری سرعت بالا، فرزکاری با بار جانبی کم، دالانهای پایداری

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول ۱

مقدمه ۱

۱-۱ فرزکاری ۱

۱-۲ اصول ارتعاشات در فرآیند ماشینکاری ۳

۱-۳ فرزکاری سرعت بالا ۵

۱-۴ دالانهای پایداری ۶

فصل دوم ۸

مروری بر مطالعات انجام شده و مکانیک برش مایل ۸

۲-۱ مروری بر مطالعات انجام شده ۸

۲-۲ مکانیک برش مایل ۱۲

فصل سوم ۱۶

مدلسازی استاتیکی و دینامیکی فرآیند فرزکاری ۱۶

۳-۱ مقدمه ۱۶

۳-۲ محاسبه نیروی برش برای لبه برنده با زاویه مارپیچ صفر ۱۷

۳-۳ محاسبه نیروی برش برای لبه برنده مارپیچ ۲۰

۳-۴ تخمین ثابتهای نیروی برش ۲۳

۳-۵ محاسبه ضرایب نیروی برش به روش تجربی ۲۸

۳-۶ ارتعاشات در فرآیند فرزکاری انگشتی ۲۹

۳-۷ مدلسازی ارتعاشات خود برانگیخته در فرآیند فرزکاری ۳۰

فصل چهارم ۳۴

تحلیل پایداری ۳۴

عنوان | صفحه

۴-۱ مقدمه ۳۴

۴-۲ مدل مکانیکی ۳۵

۴-۳ تحلیل اجزاء محدود زمانی (TFEA) برای پیش‌بینی حدود پایداری فرزکاری با لبه برنده مستقیم ۳۹

۴-۳-۱ ارتعاشات آزاد ۳۹

۴-۳-۲ ارتعاشات حین برش ۴۰

۴-۴ تحلیل اجزاء محدود زمانی (TFEA) برای پیش‌بینی حدود پایداری فرزکاری با لبه برنده مارپیچ ۴۳

۴-۴-۱ محاسبه نیروی برش برای لبه برنده مارپیچ ۴۳

۴-۴-۲ زمان برش لبه برنده مارپیچ و حالات مختلف درگیری ۴۴

فصل پنجم ۴۶

آزمایشات تجربی و شبیه سازی های انجام شده و بحث در نتایج ۴۶

۵-۱ روش آزمایشات انجام شده برای شبیه سازی نیروهای ماشینکاری ۴۶

۵-۲ محاسبه ضرایب نیروی برش ۴۹

۵-۳ پارامترهای مودال ابزار ۵۱

۵-۴ ارائه نتایج شبیه سازی استاتیکی و اندازه گیریهای انجام شده ۵۲

۵-۵ ارائه نتایج شبیه سازی دینامیکی و اندازه گیریهای انجام شده ۵۵

۵-۶ ارائه نتایج شبیه سازی دینامیکی با استفاده از تحلیل المان محدود ابزار و اندازه گیریهای انجام شده ۵۸

۵-۷ نتایج شبیه سازی روش TFEA برای پیش‌بینی حدود پایداری فرآیند فرزکاری یک درجه آزادی با لبه برنده مستقیم ۶۰

۵-۸ نتایج شبیه سازی روش TFEA برای پیش‌بینی حدود پایداری فرآیند فرزکاری دو درجه آزادی با لبه برنده مستقیم ۶۱

۵-۹ نتایج شبیه سازی روش TFEA برای پیش‌بینی حدود پایداری فرآیند فرزکاری یک درجه آزادی با لبه برنده مارپیچ ۶۳

۵-۱۰ نتایج شبیه سازی روش TFEA برای پیش‌بینی حدود پایداری فرآیند فرزکاری دو درجه آزادی با لبه برنده مارپیچ ۶۵

عنوان صفحه

۵-۱۱ نتایج شبیه سازی با استفاده از پارامترهای واقعی مورد استفاده در آزمایشات ۶۸
۵-۱۲ نتایج آزمایش و مقایسه با شبیه سازی ۷۰
فصل ششم ۷۷
جمع بندی و پیشنهاداتی برای کارهای آتی ۷۷
۶-۱ جمع بندی ۷۷
۶-۲ پیشنهاداتی برای کارهای آتی ۷۹
مراجع ۷۹
ضمیمه ۱ ..... ۸۳
ضمیمه ۲ ..... ۹۱
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۹۳

فهرست علائم و نشانه ها

زاویه مارپیچ	β
زاویه عمودی براده	α_n
زاویهٔ جریان براده روی پیشانی ابزار	η
زاویه برش عمودی	ϕ_n
زاویه تمایل	ϕ_t
زاویه اصطکاک	β_a
صفحه نرمال	P_n
صفحه سرعت	P_v
عمق براده	h
عرض براده	b
بردار نیروی اصطکاک روی صفحه پیشانی ابزار	F_u
بردار نیروی اصطکاک روی صفحه پیشانی ابزار	F_u
بردار نیروی عمود بر صفحه پیشانی ابزار	F_v
سرعت براده در صفحه سرعت	V_c
سرعت برشی در صفحه سرعت	V_s
سرعت ماشینکاری در صفحه سرعت	V
سرعت اسپیندل	n
سرعت زاویه ای	Ω
تعداد دندانه ها	N
پیشروی بر دندانه	f_t
زاویه درگیری	θ
زاویه ورود ابزار به برش	θ_{st}
زاویه خروج ابزار از برش	θ_{ex}
قطر ابزار	D

شعاع ابزار	r
عمق برش محوری	b
عمق برش شعاعی	a_e
نسبت عمق برش شعاعی به قطر ابزار	a_e / D
سرعت محور	n
تاخیر زاویه‌ای	ψ
تنش برشی در صفحهٔ برش	τ
ضریب نیروی برش مماسی ویژه	K_{tc}
ضریب نیروی برش شعاعی ویژه	K_{rc}
ضریب نیروی برش محوری ویژه	K_{ac}
ثابتهای لبه‌ای نیروی برش در جهت مماسی	K_{te}
ثابتهای لبه‌ای نیروی برش در جهت شعاعی	K_{re}
ثابتهای لبه‌ای نیروی برش در جهت محوری	K_{ae}
ماتریس جرم	M
ماتریس سختی	K
ماتریس استهلاک	C
جرم ابزار در جهت	m_x
جرم ابزار در جهت y	m_y
استهلاک ابزار در جهت x	c_x
استهلاک ابزار در جهت y	c_y
سختی ابزار در جهت x	k_x
سختی ابزار در جهت y	k_y
مؤلفه مماسی نیروی برش	F_t
مولفه شعاعی نیروی برش	F_n
مولفه محوری نیروی برش	F_a

ضخامت نامی براده	$w_p(t)$
نیروی برشی ویژه	$K_{sx}(t)$
اغتشاش (Perturbation) یا انحراف بین حرکت پریودیک ایده آل و حرکت واقعی ابزار	$\xi(t)$
توابع سعی (Trial function)	$\phi_i(\sigma_j(t))$
نیروی برشی دندانه jام در جهت z	F_{zj}
حد پایینی درگیری محوری لبه jام ابزار در ناحیه برش و در انتگرالگیری	$Z_{j,1}(\phi_j(z))$
حد بالایی درگیری محوری لبه jام ابزار در ناحیه برش و در انتگرالگیری	$Z_{j,2}(\phi_j(z))$

فهرست جدولها

عنوان ..... صفحه

جدول ۳-۱ شرایط براده برداری و ثابت های برش ۲۲

جدول ۳-۲ پارامترهای شبیه سازی ۲۳

جدول ۳-۳ پارامترهای مورد استفاده جهت بدست آوردن ضرایب نیروی برشی و شبیه سازی فرآیند فرزکاری ۲۶

جدول۳-۴ تاثیر پارامتر زاویه مارپیچ در ثابتهای نیروی برش برای قطعه کار تیتانیوم Ti-6Al-4V ۲۷

جدول ۳-۵ شرایط برشی و پارامترهای مودال ابزار مورد استفاده در شبیه سازی دینامیکی ۳۳

جدول ۵-۱ شرایط ماشینکاری و تست های انجام شده جهت محاسبه ضرایب نیروی برشی ۴۷

جدول ۵-۲ شرایط ماشینکاری و تست های انجام شده در سری دوم آزمایشات ۴۸

جدول ۵-۳ ضرایب برشی بدست آمده از آزمایش شیار زنی ۵۰

جدول ۵-۴ پارامترهای مودال ابزار ۵۱

جدول ۵-۵ شرایط برشی برای اندازه گیری نیروها در حالت بار جانبی کم و شیار تراشی ۵۲

جدول ۵-۶ شرایط برشی برای اندازه گیری نیروها در حالت بار جانبی کم و شیار تراشی ۵۵

جدول ۵-۷ پارامترهای مودال ابزار مورد استفاده در شبیه سازی دینامیکی ۵۵

جدول ۵-۸ شرایط ماشینکاری و تست های انجام شده ۵۸

جدول ۵-۹ پارامترهای ثابت بکار رفته در رسم نمودار دالانهای پایداری ۶۰

جدول ۵-۱۰ پارامترهای مودال ابزار ۶۱

جدول ۵-۱۱ پارامترهای برشی ۶۱

جدول ۵-۱۲ شرایط برشی و پارامترهای مودال ابزار مورد استفاده در شبیه سازی دالان پایداری ۶۲

جدول ۵-۱۳ پارامترهای انتخاب شده از مرجع ۶۳

جدول ۵-۱۴ پارامترهای مودال ۶۵

جدول۵-۱۵ پارامترهای برشی ۶۵

جدول ۵-۱۶ ضرایب نیروهای برشی برای سه ماده تیتانیوم ، فولاد و اینکونل ۶۷

جدول ۵-۱۷ پارامترهای مورد استفاده برای رسم نمودارهای دالان پایداری در شکل های (۵-۳۰) تا (۵-۳۲) ۶۷

جدول ۵-۱۸ پارامترهای مودال ابزار ۶۸

عنوان ..... صفحه

جدول ۵-۱۹ شرایط برشی ۶۸

جدول ۵-۲۰ شرایط برشی برای نقاط A ، B و C ۷۵

فهرست شکلها

عنوان ..... صفحه

شکل ۱-۱ دسته بندی های فرزکاری: a) Slab Milling b) Face Milling c) End Milling ۲

شکل ۱-۲ روش های فرزکاری ۲

شکل ۱-۳ Speed Break هواپیمای F15 ..... ۶

شکل ۱-۴ دیاگرام دالان پایداری در فرآیند فرزکاری ۷

شکل۲-۱ هندسه برش مایل ۱۳

شکل۲ -۲ برش مایل ۱۳

شکل ۲-۳ جهت بردارهای نیرو و سرعت در برش مایل ۱۵

شکل ۳-۱ دیاگرام اصلی از سیستم حلقه بسته ماشین ابزار و فرآیند برش ۱۷

شکل ۳-۲ مدل دو درجه آزادی برای حالت Up-Milling ۱۷

شکل ۳-۳ ضخامت لحظه ای براده ۱۸

شکل ۳-۴ مولفه های نیروی برشی در فرآیند فرزکاری ۱۸

شکل ۳-۵ محاسبه نیرو در حالت فرزکاری مخالف و موافق و پیشانی تراشی ۲۲

شکل ۳-۶ نمودار نیروهای فرزکاری در حالت ابزار صلب – قطعه کار صلب ۲۳

شکل ۳-۷ روش حل عددی پارامترهای مجهول در فرآیند برش مایل ۲۵

شکل۳-۸ نیروهای برشی شبیه سازی شده برای فرآیند فرزکاری با ابزارهای انگشتی و نوک کروی ۲۶

شکل ۳-۹ تغییرات پارامترهای برش مایل با افزایش زاویه مارپیچ ۲۷

شکل ۳-۱۰ تغییرات ضریب نیروی برش محوری با افزایش زاویه مارپیچ ۲۷

شکل ۳-۱۱ لبه های برنده ابزار و سطوح موج دار ۳۱

شکل ۳-۱۲ فرزکاری مخالف با عمق برش محوری ۵ mm و عمق برش شعاعی ۱ mm ۳۳

شکل ۳-۱۳ فرزکاری مخالف با عمق برش محوری ۵ mm و عمق برش شعاعی ۲ mm ۳۳

شکل ۳-۱۴ فرزکاری مخالف با عمق برش محوری ۵ mm و عمق برش شعاعی ۳ mm ۳۳

شکل ۴-۱ دیاگرام دالان پایداری و انشعاب های Hopf و Flip ۳۵

شکل ۴-۲ فرآیند برش ناپیوسته با زاویه مارپیچ 0° ۴۰

صفحه

عنوان

شکل ۴-۳ زمان برش برای ابزار فرز انگشتی مارپیچی ۴۵

شکل ۴-۴ مناطق انتگرالگیری سطح قطعه و شیار مارپیچی ۴۵

شکل ۵-۱ آزمایش اندازه گیری نیروی برش توسط دینامومتر Kistler 9255B ۴۹

شکل ۵-۲ نیروهای اندازه گیری شده در راستای x و y برای سرعت اسپیندل ۳۵۰۰ rpm و بار براده ۰/۱ mm/tooth ۴۹

شکل۵-۳ تحلیل رگراسیون خطی برای نیروی Fx میانگین ۵۰

شکل۵-۴ تحلیل رگراسیون خطی برای نیروی Fy میانگین ۵۰

شکل ۵-۵ نحوه انجام آزمایش مودال ابزار ۵۱

شکل ۵-۶ نمودار تابع پاسخ فرکانسی ۵۱

شکل ۵-۷ نیروهای استاتیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y در حالت شیار تراشی ۵۲

شکل ۵-۸ نیروهای استاتیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y با عمق برش محوری ۲ mm ۵۲

شکل ۵- ۹ نیروهای استاتیکی شبیه سازی و نیروهای اندازه گیری شده در جهت های x و y با عمق برش محوری ۳ mm ۵۳

شکل ۵-۱۰ نیروهای استاتیکی شبیه سازی و نیروهای اندازه گیری شده در جهت های x و y با عمق برش محوری ۵ mm ۵۳

شکل ۵-۱۱ نیروهای استاتیکی شبیه سازی و نیروهای اندازه گیری شده در جهت های x و y با عمق برش محوری ۷ mm ۵۳

شکل ۵-۱۲ نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y در حالت شیار تراشی ۵۵

شکل ۵-۱۳ نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y با عمق برش محوری ۲ mm ۵۶

شکل ۵-۱۴ نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y برای عمق برش محوری ۳ mm ۵۶

شکل ۵-۱۵ نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y برای عمق برش محوری ۵ mm ۵۶

عنوان | صفحه

شکل ۵-۱۶ نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y برای عمق برش محوری ۷ mm ۵۷

شکل ۵-۱۷ نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y با عمق برش محوری ۲ mm ۵۸

شکل ۵-۱۸ نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y با عمق برش محوری ۳ mm ۵۸

شکل ۵-۱۹ نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y با عمق برش محوری ۵ mm ۵۹

شکل ۵-۲۰ نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های x و y با عمق برش محوری ۷ mm ۵۹

شکل ۵-۲۱ مرزهای پایداری شبیه سازی شده با استفاده از روش TFEA ۶۰

شکل ۵-۲۲ نمودار دالانهای پایداری حاصل از روش TFEA ۶۰

شکل ۵-۲۳ نمودار دالانهای پایداری حاصل از روش TFEA با زاویه مارپیچ صفر درجه ۶۱

شکل ۵-۲۴ دیاگرام دالانهای پایداری با استفاده از دو روش TFEA و Frequency Domain ۶۲

شکل ۵-۲۵ دالانهای پایداری برای فرآیند یک درجه آزادی با تغییر زاویه مارپیچ ۶۳

شکل ۵-۲۶ دالانهای پایداری برای فرآیند یک درجه آزادی با تغییر زاویه مارپیچ ۶۴

شکل ۵-۲۷ دالانهای پایداری برای فرآیند فرزکاری مخالف با زاویه مارپیچ ۱۰ درجه و بارهای جانبی مختلف ۶۴

شکل ۵-۲۸ دیاگرام دالان پایداری در زاویه مارپیچ صفر و ۳۰ درجه ۶۵

شکل ۵-۲۹ دالانهای پایداری برای فرزکاری مخالف با زوایای مارپیچ متغییر ۶۶

شکل ۵-۳۰ دیاگرام دالان پایداری برای آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) ۶۷

شکل ۵-۳۱ دیاگرام دالان پایداری برای فولاد (CK45) ۶۷

شکل ۵-۳۲ دیاگرام دالان پایداری برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ ..... ۶۸

شکل ۵-۳۳ نمودار دالانهای پایداری شبیه سازی شده توسط روش TFEA با زاویه مارپیچ 0° ۶۹

شکل ۵-۳۴ دالانهای پایداری برای زوایای مارپیچ 0° ، 15° و 30° ۷۰

عنوان ..... صفحه

شکل ۵-۳۵ نمودار دالانهای پایداری شبیه سازی شده توسط روش TFEA با زاویه مارپیچ 30° ۷۰

شکل ۵-۳۶ مقایسه نتایج آزمایشات فرزکاری با دالانهای پایداری شبیه سازی شده در محدوده سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ rpm -۹۰۰۰rpm ۷۱

شکل ۵-۳۷ نیروی ماشینکاری در جهت y در شرایط عمق برش ۲ mm و ۳ mm و سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ rpm ۷۱

شکل ۵-۳۸ نیروی ماشینکاری در جهت y در شرایط عمق برش ۲ mm و ۳ mm و سرعت اسپیندل ۷۵۰۰ rpm ۷۲

شکل ۵-۳۹ نیروی ماشینکاری در جهت y در شرایط عمق برش ۲ mm و ۳ mm و سرعت اسپیندل ۸۰۰۰ rpm ۷۲

شکل ۵-۴۰ نیروی ماشینکاری در جهت y در شرایط عمق برش ۲ mm و ۳ mm و سرعت اسپیندل ۸۵۰۰ rpm ۷۲

شکل ۵-۴۱ نیروی ماشینکاری در جهت y در شرایط عمق برش ۲ mm و ۳ mm و سرعت اسپیندل ۹۰۰۰ rpm ۷۳

شکل ۵-۴۲ دالانهای پایداری برای زوایای مارپیچ 0° و 30° ۷۳

شکل ۵-۴۳ دالانهای پایداری با در نظر گرفتن زاویه مارپیچ و فرکانسهای لرزش ۷۴

شکل ۵-۴۴ نیروهای ماشینکاری اندازه گیری شده در جهت X و فرکانس تحریک عبوری دندانه برای نقطه A ۷۵

شکل ۵-۴۵ نیروهای ماشینکاری اندازه گیری شده در جهت x و فرکانس لرزش Hopf برای نقطه B ۷۵

شکل ۵-۴۶ نیروهای ماشینکاری اندازه گیری شده در جهت x و و فرکانس لرزش Hopf برای نقطه C ۷۵

شکل ۵-۴۷ نیروهای ماشینکاری اندازه گیری شده در جهت y و فرکانس تحریک عبوری دندانه برای نقطه A ۷۶

شکل ۵-۴۸ نیروهای ماشینکاری اندازه گیری شده در جهت y و فرکانس لرزش Hopf برای نقطه B ۷۶

شکل ۵-۴۹ نیروهای ماشینکاری اندازه گیری شده در جهت y ۷۶