

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی

پایان نامه‌ی دوره دکتری مهندسی مکانیک – ساخت و تولید

بررسی تجربی تاثیر پارامترهای ماشینکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بر تنش پسماند و صافی سطح و بهینه سازی فرآیند

نام و نام خانوادگی:

فرشید جعفریان

استاد راهنما:

دکتر حسین امیرآبادی

استاد مشاور:

دکتر جواد صدری

تشکر و قدر دانی

قبل از هر چیز از پدر و مادر عزیزم، کسانی که سالیان سال برای موفقیت و رسیدن من به این مرحله شبانه روز تلاش و زحمت کشیده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و بوسه بر دستتان زحمت کششان می‌زنم.

در ادامه از استاد راهنمای عزیز و مهربانم جناب آقای دکتر حسین امیرآبادی که در این سالها از راهنمایی‌های فراوان علمی و همه جانبه‌ی ایشان بهره‌مند شده‌ام کمال تشکر و احترام را دارم. همچنین از استاد مشاور ارجمندم جناب آقای دکتر صدری که از راهنمایی‌های ارزشمندشان بهره‌برده‌ام، تشکر و قدردانی می‌کنم. علاوه بر این از سایر اساتید محترم گروه مهندسی مکانیک جناب آقای دکتر خلیلی، دکتر احمدی بروغنی، دکتر حدیدی مود و سایر اساتید محترم نهایت سپاس و احترام را دارم.

همچنین از مسولین محترم صنعت ساخت قطعات و موتورهای توربینی (صنعت سمت) که در انجام رساله‌ی دکتری بنده را مورد حمایت مالی و تجهیزاتی قرار دادند، تشکر و قدردانی می‌کنم. در انتها نیز از اساتید محترم دانشگاه دلا کالابریای ایتالیا جناب آقایان پروفیسور آمبرلو و فیلیس که در یک دوره‌ی فرصت مطالعاتی شش ماهه پذیرای اینجانب بوده و علاوه بر آموزش‌ها و راهنمایی‌های علمی ارزشمند لحظات فراموش نشدنی را برایم رقم زدند، تشکر و قدر دانی می‌کنم.

چکیده

یکپارچگی سطح قطعه‌ی ماشینکاری شده به عنوان یکی از مهم‌ترین و ضروری‌ترین معیارها جهت ارزیابی کیفیت و عمر کاری محصول نهایی همواره مورد توجه مهندسين و صنايع پيشرفته بوده است. سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به عنوان یک ماده سخت دارای خواص منحصر بفردی است که سبب کاربرد گسترده آن در صنايع هوایی شده است. بنابراین بررسی یکپارچگی سطح در فرآیند ماشینکاری نهایی این سوپرآلیاژ بسیار حائز اهمیت می‌باشد و نقش بسیار مهمی در کارایی قطعات تولید شده ایفا می‌نماید. از این رو در بخش نخست این تحقیق با استفاده از مطالعات تجربی و سیستم‌های هوشمند شاخصه‌های مهم یکنواختی سطح شامل تنش‌های پسماند سطحی و زبری سطح قطعه‌کار در فرآیند ماشینکاری نهایی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که با استفاده از سیستم‌های هوشمند پارامترهای ماشینکاری بگونه‌ای تعیین گردید که شرایط بهینه‌ی تنش پسماند و زبری سطح در وضعیت‌های مختلف بدست آمد. از طرفی دیگر شبیه سازی اجزای محدود فرآیند ماشینکاری که در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه محققین قرار گرفته است، به عنوان ابزاری کارآمد جهت فهم بیشتری از فرآیند براده برداری بکار گرفته می‌شود. مهم‌ترین مسئله در این راستا دقت نتایج مدل اجزای محدود و قابلیت شبیه سازی خروجی‌های حائز اهمیت می‌باشد همچون شاخصه‌های یکپارچگی سطح می‌باشد. از اینرو قسمت دوم از این رساله به شبیه سازی اجزای محدود براده برداری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و بررسی موارد مذکور اختصاص یافت. در ابتدا راهکارهای موثری جهت بهبود دقت نتایج شبیه سازی ارائه گردید، سپس با استفاده از مکانیزم تبلور مجدد مکانیکی تغییرات میکروساختاری به عنوان یکی از شاخصه‌های مهم یکپارچگی سطح در ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ شبیه سازی شد. نتایج حاکی از آن است که استراتژی‌های بکار گرفته شده در این تحقیق می‌تواند به عنوان گامی موثر جهت بهبود دقت نتایج شبیه سازی ماشینکاری مواد سخت استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: تنش‌های پسماند، ماشینکاری اینکونل ۷۱۸، سیستم‌های هوشمند، شبیه سازی

تغییرات میکروساختاری

فهرست مطالب

(الف)	فهرست مطالب
(ج)	فهرست شکل‌ها
(ذ)	فهرست جداول
(ر)	فهرست علائم و نشانه‌ها

فصل اول: مقدمه

۱	
۱	۱-۱ مقدمه

فصل دوم: یکپارچگی سطح در فرآیند ماشینکاری مواد سخت

۴	
۴	۱-۲ مقدمه
۴	۲-۲ فرآیند تراشکاری مواد سخت
۶	۳-۲ یکپارچگی سطح در فرآیند ماشینکاری
۷	۱-۳-۲ بی‌نظمی‌های هندسی
۸	۲-۳-۲ دگرگونی‌های سطح
۱۰	۴-۲ سوپر‌آلیاژ اینکونل ۷۱۸
۱۲	۵-۲ ابزارهای برشی برای ماشینکاری اینکونل ۷۱۸
۱۳	۱-۵-۲ ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ با ابزارهای کاربادی
۱۳	۲-۵-۲ ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ با ابزارهای سرامیکی
۱۴	۶-۲ یکپارچگی سطح در فرآیند ماشینکاری اینکونل ۷۱۸

فصل سوم: تنش پسماند در فرآیند ماشینکاری

۲۳	
۲۳	۱-۳ مقدمه
۲۳	۲-۳ مفهوم تنش پسماند
۲۴	۳-۳ منابع ایجاد تنش‌های پسماند در فرآیند ماشینکاری

۲۵	۱-۳-۳ تغییر شکل پلاستیک مکانیکی
۲۷	۲-۳-۳ تغییر شکل پلاستیک ناشی از بارهای حرارتی و بدون تغییر فاز ماده
۲۸	۳-۳-۳ تغییر شکل پلاستیک ناشی از بارهای حرارتی و با تغییر فاز ماده
۲۹	۴-۳ مروری بر مطالعات صورت پذیرفته
۳۴	۵-۳ روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند
۳۴	۱-۵-۳ روش پراش اشعه ایکس
۴۱	۲-۵-۳ ملاحظات در خصوص اندازه‌گیری تنش پسماند
۴۱	۳-۵-۳ رفتار اشعه ایکس در برخورد با نمونه

فصل چهارم: کاربرد سیستم‌های هوشمند در فرآیند ماشینکاری

۴۳	۱-۴ مقدمه
۴۳	۲-۴ کاربرد سیستم‌های هوشمند در فرآیندهای تولیدی
۴۴	۱-۲-۴ الگوریتم ژنتیک
۴۵	۲-۲-۴ الگوریتم بهینه‌سازی حرکت جمعی ذرات
۴۷	۳-۲-۴ بهینه‌سازی چند هدفه
۵۰	۱-۳-۲-۴ الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه <i>NSGA-II</i>
۵۱	۴-۲-۴ شبکه‌های عصبی مصنوعی
۵۲	۱-۴-۲-۴ آموزش شبکه عصبی به کمک الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت
۵۴	۳-۴ بکارگیری روش‌های هوشمند در فرآیندهای ماشینکاری

فصل پنجم: شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند براده برداری

۵۸	۱-۵ مقدمه
۵۸	۲-۵ شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند ماشینکاری
۵۹	۱-۲-۵ روش لاگرانژی
۶۱	۲-۲-۵ روش لاگرانژی ارتقاء یافته
۶۴	۳-۲-۵ روش اویلری-لاگرانژی اختیاری (ALE)

۶۵	۳-۵ معرفی نرم افزار DEFORM و روش‌های شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری
۶۸	۴-۵ شبیه‌سازی برش متعامد
۷۰	۵-۵ پارامترهای تنظیمی در شبیه‌سازی
۷۱	۱-۵-۵ مدل ماده
۷۳	۲-۵-۵ معیار شکست جهت شبیه‌سازی براده‌ی دندانه‌اره‌ایی
۷۵	۳-۵-۵ شرایط اصطکاکی در محل تماس ابزار و براده
۷۶	۱-۳-۵-۵ انواع مدل‌های اصطکاکی
۷۷	۴-۵-۵ شرایط حرارتی در محل تماس ابزار و براده
۷۹	۶-۵ شبیه‌سازی تغییرات میکرو سختی در فرآیند ماشینکاری

فصل ششم: مطالعات به عمل آمده

۸۴	۱-۶ مقدمه
۸۴	۲-۶ بررسی‌ها و اقدامات اولیه جهت انجام آزمایشات تجربی
۸۵	۱-۲-۶ ارزیابی قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند در داخل کشور
۸۵	۲-۲-۶ تعیین پارامترهای ماشینکاری
۸۶	۳-۲-۶ تعیین ابزارگیر و ابزار برشی
۸۷	۴-۲-۶ تعیین تعداد و شرایط آزمایش
۸۸	۳-۶ آماده‌سازی و ماشینکاری نمونه‌ها
۸۹	۱-۳-۶ آماده‌سازی نمونه‌ها
۹۰	۲-۳-۶ عملیات حرارتی نمونه‌ها
۹۱	۳-۳-۶ ماشینکاری نمونه‌ها
۹۱	۴-۶ اندازه‌گیری و بررسی تنش پسماند
۹۴	۱-۴-۶ مراحل اندازه‌گیری تنش پسماند توسط پراش اشعه‌ی ایکس
۹۴	۲-۴-۶ تحلیل نتایج تنش پسماند
۱۰۱	۱-۲-۴-۶ تخمین میزان تنش پسماند توسط شبکه‌ی عصبی مصنوعی
۱۰۲	۲-۲-۴-۶ بهینه‌سازی تنش پسماند
۱۰۹	۵-۶ اندازه‌گیری و بررسی زبری سطح
۱۱۱	

۱۱۳	۱-۵-۶ تخمین میزان زبری سطح با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی
۱۱۹	۲-۵-۶ بهینه سازی زبری سطح
۱۲۰	۶-۶ بهینه سازی همزمان تنش پسماند و زبری سطح
۱۲۰	۱-۶-۶ پیاده سازی <i>NSGA-II</i>
۱۲۴	۱-۱-۶-۶ بهینه سازی همزمان فرآیند توسط <i>NSGA-II</i>
۱۲۷	۲-۶-۶ بهینه سازی فرآیند توسط روش <i>GONNS</i>

فصل هفتم: شبیه سازی های صورت پذیرفته

۱۳۰	۱-۷ مقدمه
۱۳۱	۲-۷ مروری بر انواع مدل ماده برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸
۱۳۴	۳-۷ شناسایی بهترین مدل ماده
۱۳۴	۱-۳-۷ آزمایشات تجربی جهت اعتبار سنجی
۱۳۵	۲-۳-۷ شبیه سازی اجزای محدود فرآیند براده برداری
۱۳۸	۳-۳-۷ مقایسه و بررسی نتایج شبیه سازی با انواع مدل ماده
۱۴۲	۴-۷ کالیبره کردن و اعتبار سنجی شبیه سازی فرآیند
۱۴۷	۵-۷ شبیه سازی تغییرات میکروساختاری
۱۴۹	۱-۵-۷ کالیبره کردن مدل
۱۵۴	۲-۵-۷ پیش بینی اندازه دانه و میکروسختی

فصل هشتم: جمع بندی و نتیجه گیری

۱۵۵	۱-۸ جمع بندی
۱۵۹	۲-۸ خلاصه ی نتایج

۱۶۸	مراجع
-----	-------

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): مقایسه بین فرآیند سنگ‌زنی و تراشکاری مواد سخت با معیارهای مختلف ۶
- شکل (۲-۲): نمای برش خورده از یک موتور جت ۱۱
- شکل (۳-۲): تنش‌های پسماند ناشی از ماشینکاری با پیشروی ثابت و سرعت‌های برشی ۱۰، ۴۱۰ و ۸۱۰ متر بر دقیقه ۱۶
- شکل (۴-۲): تنش‌های پسماند بوجود آمده ناشی از فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸ ۱۷
- شکل (۵-۲): کیفیت سطح مشاهده شده در تراشکاری اینکونل ۷۱۸ با روش نور سفید اینترفرومتری ۱۸
- شکل (۶-۲): بررسی کیفیت سطح تراشکاری اینکونل ۷۱۸ از نظر هندسی در شرایط مختلف ۱۹
- شکل (۷-۲): نمونه‌ی تصویر SEM جهت بررسی کیفیت هندسی سطح تراشکاری اینکونل ۷۱۸ ۱۹
- شکل (۸-۲): توزیع تنش پسماند در سطح فرزکاری شده اینکونل ۷۱۸ ۲۱
- شکل (۹-۲): تغییرات پهنای پیک تفرق را در لایه‌های زیرین سطح ماشینکاری شده ۲۲
- شکل (۱-۳): اثر تنش‌های پسماند فشاری و کششی بر روی شروع ترک در قطعه‌کار ۲۴
- شکل (۲-۳): ایجاد تنش‌های پسماند در فرآیند ماشینکاری تحت اثر بار گذاری مکانیکی خالص ۲۶
- شکل (۳-۳): ایجاد تنش‌های پسماند در فرآیند ماشینکاری تحت اثر بار گذاری حرارتی خالص ۲۷
- شکل (۴-۳): تشکیل لایه سفید مارتنزیتی ناشی از فرآیند تراشکاری فولاد سخت کاری شده ۲۸
- شکل (۵-۳): منحنی تنش پسماند در راستای محوری و محیطی در تحقیق سایبویی ۲۹
- شکل (۶-۳): کاهش عمق موثر تنش‌های پسماند فشاری با افزایش سرعت برشی ۳۰
- شکل (۷-۳): منحنی تنش پسماند ذخیره‌ی شده در ماشینکاری فولاد AISI 52100 ۳۱
- شکل (۸-۳): اثر سایش ابزار در تشکیل لایه‌های سفید و سیاه در سطح ماشینکاری شده ۳۲
- شکل (۹-۳): اثر سایش ابزار در بوجود آمدن تنش پسماند کششی در سطح ماشینکاری شده در تحقیق برن ۳۲
- شکل (۱۰-۳): اثر زاویه براده ابزار در ذخیره شدن تنش پسماند ۳۳
- شکل (۱۱-۳): نمایش تفرق اشعه‌ی ایکس طبق قانون براگ ۳۵
- شکل (۱۲-۳): زاویه بوجود آمده در اثر چرخش نمونه در روش چای ۳۶
- شکل (۱۳-۳): تغییر زاویه ψ با تغییر موقعیت تیوب و دیتکتور دستگاه XRD ۳۷
- شکل (۱۴-۳): تغییر زاویه ψ با تغییر موقعیت قطعه‌کار ۳۷
- شکل (۱۵-۳): مدل تنش صفحه‌ای مورد استفاده جهت اندازه‌گیری تنش پسماند سطحی به روش XRD ۳۸
- شکل (۱۶-۳): مثالی از منحنی $d_{01\bar{1}}$ بر حسب $\sin^2\psi$ جهت اندازه‌گیری تنش پسماند ۴۰
- شکل (۱۷-۳): نمایی از یک دستگاه XRD با روش آنالیز امگا و در موقعیت زاویه ψ مثبت ۴۰
- شکل (۱-۴): فلوجارت بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک ۴۵
- شکل (۲-۴): نمونه‌ای از جابجایی ذره در الگوریتم PSO ۴۷
- شکل (۳-۴): نگاشت فضای تصمیم‌گیری سه بعدی به فضای هدف دو بعدی در بهینه‌سازی چندهدفه ۴۸

- شکل (۴-۴): اشکال مختلف پرتو در بهینه‌سازی همزمان دو تابع هدف ۴۹
- شکل (۵-۴): روند کلی بهینه‌سازی همزمان در NSGA-II ۵۰
- شکل (۶-۴): نمایی از ساختار الف) شبکه عصبی با ۵ ورودی و ۲ لایه مخفی ب) نرون در شبکه ۵۱
- شکل (۷-۴): نحوه‌ی آموزش شبکه عصبی توسط الگوریتم ژنتیک ۵۳
- شکل (۱-۵) روش لاگرانژی استفاده شده در فرآیند ماشینکاری از ابتدا تا حالت پایدار ۶۰
- شکل (۲-۵) نحوه‌ی جداسازی مش‌ها در روش لاگرانژی ۶۱
- شکل (۵-۵) نمایش تراکم مش بندی در محل برش و نزدیک به لبه‌ی ابزار در روش لاگرانژی ارتقاء یافته ۶۲
- شکل (۳-۵) جریان مواد در ناحیه‌ی حجم کنترل برای روش اویلری ۶۳
- شکل (۴-۵) نمایش شرایط مرزی برای فرآیند ماشینکاری ۶۴
- شکل (۶-۵) نمایش مناطق حذف و اضافه شده در هر مرحله از شبیه‌سازی برش-کانتی ۶۶
- شکل (۷-۵) نمایش مراحل شبیه‌سازی با استفاده از روش لاگرانژی و اویلری ۶۷
- شکل (۸-۵): شبیه‌سازی حالت پایدار دمایی ابزار با استفاده از روش لاگرانژی ۶۸
- شکل (۹-۵) نحوه‌ی انجام برش متعامد (الف): ماشینکاری تیوب و (ب) ماشینکاری دیسک ۶۸
- شکل (۱۰-۵) نمایش سطح مقطع ابزار در برش متعامد ۶۹
- شکل (۱۱-۵) نمایش بلوک قطعه‌کار و جهت‌های پیشروی در برش متعامد با نرم افزار دی‌فرم ۷۰
- شکل (۱۲-۵) معرفی پارامترهای تنظیمی ورودی و خروجی در فرایند براده برداری ۷۱
- شکل (۱۳-۵) نمای شماتیکی از شکل‌گیری براده‌ی دندانانه اره‌ایی در فرآیند ماشینکاری متعامد ۷۴
- شکل (۱۴-۵) شبیه‌سازی براده دندانانه اره‌ایی با مدل ماده و مقدار آسیب متفاوت ۷۵
- شکل (۱۵-۵) جریان‌های حرارتی بوجود آمده در در سطح تماس ابزار و براده ۷۸
- شکل (۱۶-۵) تعادل حرارتی در سطح تماس ابزار و براده در فرآیند میکرو فرزکاری ۷۹
- شکل (۱۷-۵) شبیه‌سازی میکروسختی در ماشینکاری فولاد AISI52100 ۸۰
- شکل (۱۸-۵) مقایسه‌ی منحنی تنش پسماند تجربی و شبیه‌سازی با مدل ماده معمولی و جدید ۸۱
- شکل (۱۹-۵) شبیه‌سازی سه بعدی تغییرات دانه بندی و سختی در ماشینکاری آلیاژ AA7075-T651 ۸۲
- شکل (۲۰-۵) اندازه دانه در ماشینکاری برودتی آلیاژ منیزیم ۸۳
- شکل (۱-۶): پارامترهای ماشینکاری مورد بررسی در این تحقیق ۸۷
- شکل (۲-۶): نمایی از اینسرت و هلدر مورد استفاده قرار گرفته جهت ماشینکاری پرداخت اینکونل ۷۱۸ ۸۷
- شکل (۳-۶): شمایی از قطعات تهیه شده جهت آزمایشات ماشینکاری ۹۰
- شکل (۴-۶): تعیین موقعیت دقیق ابزار توسط دستگاه لبه یاب لیزری ۹۲
- شکل (۵-۶): ماشینکاری نهایی نمونه‌ها تحت شرایط استفاده از خنک کار ۹۳
- شکل (۶-۶): نمایی از دستگاه XRD استفاده شده جهت اندازه‌گیری تنش پسماند ۹۴
- شکل (۷-۶): نحوه‌ی تغییر محل تابش اشعه از سطح مینای دستگاه XRD به سطح قطعه کار ۹۵
- شکل (۸-۶): آنالیز فاز نمونه‌ی بدون تنش در زوایای بالا با استفاده از تیوب مس و کبالت ۹۶
- شکل (۹-۶): اثر اعمال ماسک با ابعاد مختلف در دستگاه XRD بر روی شدت اشعه‌ی پراش یافته در زاویه ۱۳۰ درجه ۹۷
- شکل (۱۰-۶): مقایسه زاویه‌ی پراش اشعه‌ی ایکس در نمونه‌ی بدون تنش و نمونه‌ی ماشینکاری ۹۸
- شکل (۱۱-۶): کاهش شدت تفرق اشعه‌ی ایکس در صفحات کریستالی پایین‌تر در سطح نمونه‌ی بدون تنش ۹۹

- شکل (۱۲-۶): نمونه‌ایی از منحنی $\sin^2 \Psi$ نسبت به فاصله صفحه کریستالی جهت محاسبه‌ی تنش پسماند
- شکل (۱۳-۶): ترکیب روش *LOOCVM* و الگوریتم ژنتیک جهت شناسایی بهترین ساختار شبکه
- شکل (۱۴-۶): ساختار شبکه‌ی عصبی بکار گرفته شده در روش *LOOCVM*
- شکل (۱۷-۶): منحنی همگرایی آموزش شبکه‌ی عصبی تنش پسماند توسط الگوریتم ژنتیک
- شکل (۱۸-۶): مقایسه‌ی بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش بینی شده شامل داده‌های آموزش و داده‌های آزمایش
- شکل (۱۹-۶): تغییرات تنش پسماند در سرعت‌های برشی و پیشروی مختلف و در عمق برشی مختلف
- شکل (۲۰-۶): تغییرات تنش پسماند در سرعت‌های برشی و عمق برشی مختلف و در پیشروی مختلف
- شکل (۲۱-۶): تغییرات تنش پسماند در سرعت‌های برشی و عمق برشی مختلف و در پیشروی مختلف
- شکل (۲۲-۶): نحوه‌ی بهینه‌سازی تنش پسماند در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸
- شکل (۲۳-۶): مقدار بهینه‌ی تنش پسماند در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸
- شکل (۲۴-۶): منحنی همگرایی آموزش شبکه‌ی عصبی زبری سطح توسط الگوریتم ژنتیک
- شکل (۲۵-۶): مقایسه‌ی بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش بینی شده‌ی زبری سطح
- شکل (۲۶-۶): تغییرات زبری سطح در سرعت‌های برشی و عمق برشی مختلف و در مختلف
- شکل (۲۷-۶): تغییرات زبری سطح در سرعت‌های برشی و پیشروی مختلف و در عمق مختلف
- شکل (۲۸-۶): تغییرات زبری سطح در عمق برش و نرخ پیشروی مختلف و در سرعت برشی مختلف
- شکل (۲۹-۶): منحنی همگرایی زبری سطح در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸
- شکل (۳۰-۶): محاسبه‌ی معیار ازدحام جمعیت برای اعضای یک جبهه‌ی پرتو
- شکل (۳۱-۶): پرتوی بهینه بر روی تابع آزمایش *KUR* توسط الگوریتم‌های مختلف
- شکل (۳۲-۶): پرتوی بهینه بدست آمده در این تحقیق بر روی تابع آزمایش
- شکل (۳۳-۶): پرتوی بهینه بدست آمده برای بهینه‌سازی تنش پسماند و زبری سطح
- شکل (۳۴-۶): فلوجارت پیاده‌سازی شده در روش *GONNS*
- شکل (۱-۷) منحنی تنش سیلان مدل‌های مواد مختلف برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸
- شکل (۲-۷) ماشینکاری متعامد سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و استفاده از ترموکوپل جهت اندازه‌گیری دمای ماشینکاری
- شکل (۳-۷) نحوه‌ی مش بندی قطعه کار جهت شبیه‌سازی فرآیند براده برداری
- شکل (۴-۷) شبیه‌سازی نیروی اصلی ماشینکاری با در نظر گرفتن معیار شکست
- شکل (۵-۷) شبیه‌سازی براده‌ی دندان‌اره‌ایی و باند برش آدیباتیک از لحظه‌ی شروع تا رسیدن به حالت پایدار
- شکل (۶-۷) پیش بینی دما در فرآیند براده برداری و معرفی مشخصه‌های هندسه‌ی براده
- شکل (۷-۷) شبیه‌سازی هندسه‌ی براده با مدل‌های ماده‌ی مختلف و مقایسه با براده‌ی تجربی
- شکل (۸-۷) میانگین خطای شبیه‌سازی با انواع مدل ماده در شرایط ماشینکاری مختلف
- شکل (۹-۷) میانگین خطای شبیه‌سازی با انواع مدل ماده برحسب خروجی مورد بررسی
- شکل (۱۰-۷) نحوه‌ی کالیبره کردن پارامترهای شبیه‌سازی
- شکل (۱۱-۷) مقایسه‌ی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی با سختی قطعه کار (الف) ۴۳/۵ و (ب) ۴۵/۸
- شکل (۱۲-۷) میانگین درصد خطای شبیه‌سازی کل برای سختی قطعه کار (الف) ۴۳/۵ و (ب) ۴۵/۸
- شکل (۱۳-۷) استراتژی پیاده‌سازی شده جهت شبیه‌سازی تغییرات میکروساختاری
- شکل (۱۴-۷) نحوه‌ی کالیبره کردن ضرایب ثابت جهت شبیه‌سازی تغییرات میکروساختاری
- شکل (۱۵-۷) تغییرات کرنش ذخیره شده در قطعه کار در مقابل تغییرات کرنش بحرانی

- ۱۵۲ شکل (۷-۱۶) توزیع دما در قطعه‌ی ماشینکاری شده در نرخ پیشروی مختلف ابزار
- ۱۵۳ شکل (۷-۱۷) توزیع حرارت بوجود آمده در فرآیند ماشینکاری متعامد
- ۱۵۶ شکل (۷-۱۸) پیاده سازی زیر برنامه جهت شبیه سازی تغییرات دانه بندی در ماشینکاری سوپر آلیاژ ۷۱۸
- ۱۵۷ شکل (۷-۱۹) پیاده سازی زیر برنامه جهت شبیه سازی تغییرات سختی در ماشینکاری سوپر آلیاژ ۷۱۸

فهرست جداول

۳۳	جدول (۱-۲): محدوده‌ی درصد عناصر تشکیل دهنده‌ی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸
۳۶	جدول (۱-۳): مقادیر ضریب جذب و چگالی چند ماده با منابع مختلف تولید اشعه ایکس
۸۸	جدول (۱-۶): سطوح مختلف پارامترهای ماشینکاری
۸۹	جدول (۲-۶): طراحی آزمایش بکار گرفته شده در این تحقیق به همراه شرایط هر تست
۹۱	جدول (۳-۶): محدوده دمایی و زمانی جهت عملیات حرارتی نمونه‌های اینکونل ۷۱۸
۱۰۱	جدول (۴-۶): مشخصات و پارامترهای اعمال شده جهت آنالیز تنش در دستگاه XRD
۱۰۲	جدول (۵-۶): نتایج تجربی تنش پسماند ذخیره شده در قطعه کار در شرایط مختلف ماشینکاری
۱۰۵	جدول (۶-۶): شناسایی بهترین ساختار شبکه‌ی عصبی
۱۰۵	جدول (۷-۶): آموزش نهایی شبکه عصبی تنش پسماند توسط الگوریتم ژنتیک
۱۱۲	جدول (۸-۶): زبری سطح میانگین در پارامترهای ماشینکاری مختلف
۱۱۳	جدول (۹-۶): آموزش نهایی شبکه عصبی زبری سطح توسط الگوریتم ژنتیک
۱۲۵	جدول (۱۰-۶): مجموعه جواب‌های جبهه‌ی پرتوی بهینه
۱۲۸	جدول (۱۱-۶): نتایج بدست آمده از روش <i>GONNS</i>
۱۳۳	جدول (۱-۷): ثوابت مدل‌های مواد مختلف برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸
۱۳۵	جدول (۲-۷): پارامترهای ماشینکاری و نتایج تجربی مورد استفاده جهت شناسایی بهترین مدل ماده
۱۴۰	جدول (۳-۷): درصد خطای شبیه سازی با مدل‌های ماده‌ی مختلف نسبت به نتایج تجربی
۱۴۳	جدول (۴-۷): نام گذاری آزمایشات تجربی جهت کالیبره کردن و اعتبار سنجی
۱۵۴	جدول (۵-۷): مقایسه‌ی نتایج شبیه سازی و تجربی تغییرات اندازه دانه و میکروسختی

فهرست علائم و نشانه‌ها

گرید ابزار اینسرتی	P20	واحد اندازه‌گیری (سانتیمتر)	Cm
جمعیت ثانویه	Q_t	فاکتور آموزش	C ₁
صافی سطح (میکرومتر)	Ra	فاکتور آموزش	C ₂
عدد تصادفی	r	فاصله صفحات کریستالی قطعه بدون تنش (mm)	d ₀
میکروسکوپ الکترونی روبشی	SEM	فاصله صفحات کریستالی قطعه با تنش (mm)	
		مدول ینگ (GPa)	E
سایش لبه ی ابزار (mm)	V_B	ماشینکاری تخلیه الکتریکی	EDM
تفرق اشعه ایکس	XRD	جبهه‌ی پرتو اول	F ₁
فضای اهداف بهینه سازی	Z	جبهه‌ی پرتو دوم	F ₂
		بهترین جواب کلی	G _{best}
علائم یونانی			
زاویه‌ی بین اشعه تابیده شده و سطح اولیه نمونه	Ψ	الگوریتم ژنتیک	GA
طول موج اشعه (انگستروم)		عمق نفوذ اشعه‌ی ایکس λ	G _x
زاویه بین اشعه تابیده شده و سطح نمونه	Θ	ناحیه‌ی متأثر از حرارت	HAZ
چگالی ماده	ρ	واحد سنجش سختی	HRC
کرنش صفحات کریستالی		شدت اشعه‌ی عبوری ϵ	I
تنش اصلی ذخیره شده در قطعات		شدت اشعه‌ی بازتابیده شده σ	I ₀
زاویه‌ی بین اشعه تابیده شده و سطح اولیه نمونه	Ψ	گرید ابزار اینسرتی	K20
نسبت پواسون		یکی از امواج اشعه‌ی ایکس ν	
		یکی از امواج اشعه‌ی ایکس	
		شیب خط	m
		مرتبه‌ی انعکاس اشعه ایکس	n
		الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه	NSGA-II
		جمعیت اولیه	P _t
		بهترین جواب شخصی	P _{best}

۱-۱. مقدمه

فرآیند ماشینکاری یکی از روش‌های تولید قطعات می‌باشد که از دیرباز به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های تولید به‌شمار آمده است. در سال‌های اخیر با رشد صنعت و نیاز به استفاده از مواد سخت در صنایع مختلف، اهمیت ماشینکاری مواد سخت بیش از پیش احساس شده است. فرآیند سنگ‌زنی به عنوان روش متداول جهت پرداخت مواد سخت دارای معایبی می‌باشد که در سال‌های اخیر توجه محققین را به استفاده از فرآیندهای ماشینکاری سنتی به عنوان جایگزین این روش معطوف کرده است. اما سختی بالای قطعه‌کار در فرآیند تراشکاری محدودیت‌های زیادی را به دنبال دارد و می‌تواند منجر به کاهش کیفیت قطعه‌ی ماشینکاری شده گردد. به همین دلیل این مسئله اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته و تلاش‌هایی در خصوص بهبود قابلیت ماشینکاری مواد سخت صورت پذیرفته است [۱].

یکپارچگی سطح قطعه‌ی ماشینکاری شده یکی از مهم‌ترین موضوعات در ماشینکاری می‌باشد که همواره مورد توجه مهندسين خصوصاً در صنایع حساسی همچون صنایع هوایی قرار گرفته است. در واقع یکپارچگی سطح به تغییرات هندسی و دگرگونی‌های فیزیکی و متالورژیکی سطح پس از ماشینکاری اطلاق می‌شود. عمدتاً زبری سطح قطعه‌کار و تنش‌های پسماند ناشی از

ماشینکاری به ترتیب به عنوان اصلی‌ترین شاخصه جهت ارزیابی یکپارچگی سطح در نظر گرفته می‌شوند [۱].

سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به عنوان یک ماده‌ی سخت دارای ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشد که کاربرد آن را در صنایع پیشرفته‌ای همچون صنایع هوایی بسیار گسترده کرده است. به همین منظور بهبود یکپارچگی سطح این سوپرآلیاژ در ماشینکاری نهایی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد.

زبری بالای سطح ماشینکاری شده احتمال شیوع ترک در قطعه را افزایش می‌دهد، همچنین تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعه‌کار منجر به کاهش عمر خستگی آن می‌گردد. از آنجا که زبری سطح و تنش‌های پسماند ذخیره شده در فرآیند براده‌برداری تابعی از پارامترهای ماشینکاری می‌باشد [۱]، نیاز است که شرایط بهینه‌ی ماشینکاری جهت افزایش عمر کاری قطعه‌کار تعیین گردد. اما از آنجا که انجام آزمایشات تجربی متعدد جهت یافتن شرایط بهینه‌ی ماشینکاری امری هزینه بر و طولانی می‌باشد، استفاده از سیستم‌های هوشمند می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد جهت یافتن شرایط بهینه بکار گرفته شود. اینرو در قسمت اول از این رساله با استفاده از مطالعات تجربی و بکارگیری سیستم‌های هوشمند به بهینه‌سازی یکپارچگی سطح (شامل تنش‌های پسماند و زبری سطح) در فرآیند تراشکاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته می‌شود.

از طرفی دیگر شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند ماشینکاری که در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه محققین قرار گرفته است، می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد جهت فهم بیشتری از فرآیند براده‌برداری بکار گرفته شود. مهم‌ترین مسئله در این راستا دقت نتایج مدل اجزای محدود و قابلیت شبیه‌سازی خروجی‌های حائز اهمیتی همچون شاخصه‌های یکپارچگی سطح می‌باشد. اینرو قسمت دوم از این رساله به شبیه‌سازی اجزای محدود براده‌برداری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و بررسی موارد مذکور در ماشینکاری این آلیاژ اختصاص یافته است. در ابتدا راهکارهای موثری جهت بهبود دقت نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد، سپس با استفاده از زیر برنامه نویسی پیشرفته

برای اولین بار تغییرات میکروساختاری در ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ شبیه سازی می‌شود. لازم به ذکر است که در تمامی مراحل نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی متناظر مقایسه می‌شود.

بر اساس مطالب ذکر شده‌ی فوق در فصل دوم از این تحقیق به معرفی یکپارچگی سطح در فرآیند ماشینکاری پرداخته می‌شود، در ادامه نیز قابلیت ماشینکاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ و مطالعات صورت پذیرفته در خصوص ماشینکاری این ماده معرفی می‌گردد. فصل بعد نیز در ابتدا به معرفی مفهوم تنش پسماند و دلایل ایجاد آن در فرآیند ماشینکاری پرداخته می‌شود، سپس نحوه‌ی اندازه‌گیری تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند ماشینکاری با روش پراش اشعه‌ی ایکس مطرح می‌گردد. در فصل چهارم نیز بعد از معرفی سیستم‌های هوشمند و کاربرد آنها در فرآیندهای ماشینکاری، به بررسی مطالعات صورت پذیرفته در این خصوص پرداخته شده است.

در فصل پنجم نحوه‌ی شبیه سازی اجزای محدود فرآیند براده‌برداری و پارامترهای تنظیمی آن معرفی می‌گردد. در فصل ششم بخش نخست از مطالعات صورت پذیرفته شامل آزمایشات تجربی و بهینه سازی تنش پسماند و زبری سطح در ماشینکاری نهایی اینکونل ۷۱۸ مطرح می‌گردد. در فصل بعد قسمت دوم از مطالعات به عمل آمده که در راستای شبیه سازی اجزای محدود فرآیند ماشینکاری متعامد اینکونل ۷۱۸ صورت پذیرفت، تشریح می‌گردد. فصل هشتم و انتهای این رساله نیز به جمع بندی و خلاصه‌ی نتایج بدست آمده اختصاص داده شده است.

مفهوم یکپارچگی سطح و ماشینکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸

۲-۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا به معرفی فرآیند ماشینکاری مواد سخت و سپس مفهوم و اهمیت یکپارچگی سطح در ماشینکاری این مواد پرداخته می‌شود. در ادامه به معرفی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به عنوان یک ماده‌ی سخت و کاربرد آن در صنعت پرداخته می‌شود. در انتها نیز مطالعات صورت پذیرفته در زمینه‌ی ماشینکاری این آلیاژ خصوصاً یکپارچگی سطح آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲. فرآیند تراشکاری مواد سخت^۱

تراشکاری مواد سخت به عنوان یکی از عملیات‌های ماشینکاری کارآمد، به فرآیند تراشکاری مواد با سختی بالاتر از HRC ۴۲ اطلاق می‌گردد. این مواد عمدتاً شامل مواردی از جمله فولادهای ابزار و قالب‌سازی^۲، فولادهای یاتاقانی^۳، فولادهای سخت‌کاری شده سطحی^۴، سوپر آلیاژهای پایه

¹ Hard turning process

² Die and tool steels

³ Bearing steels

⁴ Case-hardened steels

نیکل^۱ و پایه تیتانیوم می‌باشند. فرآیند تراشکاری مواد سخت دارای مزایایی است که کاربرد و ضرورت آنرا نزد صنعتگران روز به روز افزایش داده است. اما از طرفی این فرآیند دارای ابهامات و محدودیت‌هاییست که زمینه‌ساز تحقیقات و مطالعات گسترده‌ایی خصوصا در سال‌های اخیر شده است [۱]. در ادامه علاوه بر مقایسه این روش با فرآیند سنگ‌زنی، به بررسی محدودیت‌ها و محاسن تراشکاری مواد سخت پرداخته می‌شود.

عموما از فرآیند سنگ‌زنی به منظور عملیات پرداخت مواد با سختی بالا استفاده می‌شود. اما امروزه از عملیات برش سخت^۲ و با در نظر گرفتن ابزارهایی از جنس و مشخصات هندسی مناسب، به عنوان جایگزین فرآیند سنگ‌زنی بهره گرفته می‌شود که می‌تواند به خوبی پاسخگوی نیاز صنعتگران باشد. تراشکاری مواد سخت که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، دارای تفاوت‌های ذاتی و محاسنی نسبت به فرآیند سنگ‌زنی است که از جمله آنان می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۲]:

۱- نرخ براده برداری بالاتر در فرآیند تراشکاری نسبت به سنگ‌زنی و اختصاص زمان کمتری برای پرداخت قطعه کار

۲- قابلیت پرداخت قطعات پیچیده و انعطاف پذیری بیشتر توسط دستگاه تراش

۳- حرارت ماشینکاری و تنش‌های حرارتی کمتر در فرآیند تراشکاری

۴- اجرای عملیات خشن کاری و پرداخت با یک گیره بندی، قابلیت اتوماسیون فرآیند و سهولت تعویض ابزار در دستگاه CNC



۵- قابلیت تراشکاری در شرایط خشک^۳ و در نتیجه حذف هزینه‌های مربوط به استفاده از خنک‌کار و سازگاری بیشتر با محیط زیست

در شکل (۱-۲) مقایسه‌ی بین فرآیند سنگ‌زنی و تراشکاری مواد سخت با معیارهای مختلف قابل مشاهده می‌باشد.

¹ Nickel-based alloys

² Hard cutting operations

³ Dry machining

	hard cutting	grinding	legend:
			+ positive valuation n neutral - negative valuation ? valuation not possible
economical aspects	+ -	+ -	processing time
	+	-	material removal rate
	n +	n -	cost of acquisition
	-	+	tool costs
flexibility	+	-	multi-face machining
	+	- n	profile machining
ecological aspects	+	-	power requirement
	+	-	coolant
	+	-	chip recycling
quality	?	+	workpiece quality
	?	+	process reliability
	?	+	surface integrity

شکل (۱-۲): مقایسه بین فرآیند سنگزنی و تراشکاری مواد سخت با معیارهای مختلف [۳]

به طور کلی، تراشکاری مواد سخت از لحاظ اقتصادی، انعطاف پذیری تولید و سازگاری با محیط زیست نسبت به فرآیند سنگزنی دارای برتریهایی می باشد. اما همانطور که در این شکل مشاهده می گردد، وضعیت کیفیت قطعه‌ی ماشینکاری شده در فرآیند تراشکاری مواد سخت مشخص نیست و نیازمند مطالعه بیشتری می باشد. یکپارچگی سطح^۱ قطعات ماشینکاری شده که شامل مهم‌ترین معیارها جهت ارزیابی کیفیت قطعات می باشد، یکی از موضوعات ضروری و حیاتی در عملیات پرداخت به شمار می آید [۱]. این مسئله در فرآیند تراشکاری مواد سخت از اهمیت بالاتری برخوردار بوده و با گسترش این فرآیند در سال‌های اخیر، زمینه‌ساز تحقیقات قابل توجهی شده است. اما مطالعات صورت پذیرفته در این راستا کافی نبوده و مستلزم تحقیقات بیشتر و جامع‌تری می باشد [۴،۳]. در ادامه به بررسی معیارهای مختلف جهت ارزیابی یکپارچگی سطح در قطعات ماشینکاری شده پرداخته می شود.

۲-۳. یکپارچگی سطح در فرآیند ماشینکاری

یکپارچگی سطح دربرگیرنده‌ی مطالعاتی است که انواع دگرگونی‌هایی را که ممکن است در طی ساخت قطعات بوجود آید، مورد بررسی قرار می دهد. از این رو کنترل و بررسی یکپارچگی سطح یکی از خواسته‌ها و معیارهای اصلی مصرف کنندگان می باشد [۴]. یکپارچگی سطح از دو دیدگاه کلی مورد بررسی قرار می گیرد.

¹ Surface integrity