دانشکده: فنی و مهندسی

رساله دکتری رشته: مهندسی مواد گرایش: پوشش، خوردگی و مهندسی سطح

عنوان رساله:

ایجاد پوشش چند لایه TiN/TiC به روش PACVD و بررسی ساختار و خواص آن

نام دانشجو:

محبوبه آزادی

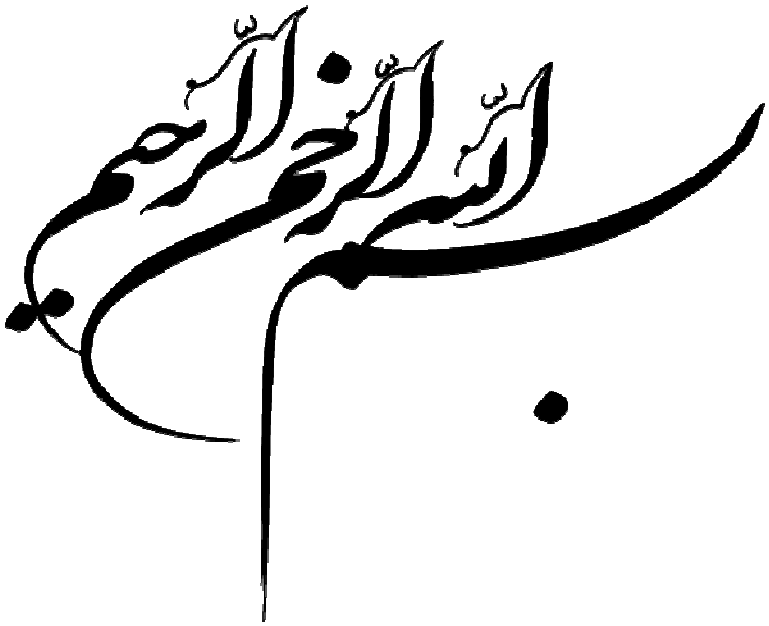
استاد راهنما (اصلی):

دکتر علیرضا صبور روح اقدم

استاد راهنما(دوم):

دکتر شاهرخ آهنگرانی

بهمن ماه ۱۳۹۲


بسم الله الرحمن الرحیم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای محبوبه آزادی رساله ۲۴ واحدی خود را **با عنوان ایجاد پوشش چند لایه TiN/TiC به روش PACVD وبررسی ساختار وخواص آن** در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲ 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 مواد - خوردگی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر علیرضا صبور روح اقدم	دانشیار	
استاد راهنمای دوم	دکتر شاهرخ آهنگرانی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر امیر عبداله زاده	استاد	
استاد مشاور	دکتر تقی شهرابی فراهانی	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمود علی اف خضرایی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر رضا میراسمعیلی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر عبداله افشار	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمود حیدر زاده سهی	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمود علی اف خضرایی	استادیار	

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری 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 هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

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

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب محبوبه آزادی دانشجوی رشته مهندسی مواد- خوردگی و پوشش و مهندسی مواد ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۸ مقطع دکتری دانشکده فنی و مهندسی متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: .....

تاریخ: ۹۲/۱۱/۱۴

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 مهندسی مواد است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر علیرضا صبور روح اقدم و آقای دکتر شاهرخ آهنگرانی، مشاوره جناب آقای دکتر تقی شهرابی فرهانی و جناب آقای دکتر امیر عبداله زاده 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 را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت 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 شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب محبوبه آزادی دانشجوی رشته مهندسی مواد گرایش خوردگی و پوشش و مهندسی سطح مقطع دکتری تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: محبوبه آزادی

تاریخ و امضا: ۹۲/۱۱/۱۴

دانشکده : فنی و مهندسی

رساله دکتری رشته: مهندسی مواد گرایش: پوشش، خوردگی و مهندسی سطح

عنوان رساله:

ایجاد پوشش چند لایه TiN/TiC به روش PACVD و بررسی ساختار و خواص آن

نام دانشجو:

محبوبه آزادی

استاد راهنما(اصلی):

دکتر علیرضا صبور روح اقدم

استاد راهنما(دوم):

دکتر شاهرخ آهنگرانی

استاد مشاور(اول):

دکتر تقی شهرابی فرهانی

استاد مشاور(دوم):

دکتر امیر عبداله زاده

بهمن ماه سال ۱۳۹۲

تقدیم

خدای را بسیار سپاسگزارم که از روی فضل و کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخت تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم، از ریشه آنها، شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، زیرا که این دو وجود پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی پر فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم انسان بودن را معنا کردند، حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان.

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است،

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید،

و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

این رساله را به بهترین‌های زندگی‌ام، **مادر فداکار و پدر دلسوزم** تقدیم می‌نمایم.

تشکر و قدردانی

سپاس پروردگاری را که نیروی اراده و پشتکار، تلاش و کوشش را به بشر عنایت فرمود و او را همواره در راه رسیدن به اهداف عالی و متعالی انسانی راهنمایی و مدد ساخت. به پایان رساندن این پروژه بدون یاری خداوند متعال، پشتوانه خانواده، راهنمایی‌ها و دلگرمی‌های اساتید گرانقدر و محترم جناب آقای دکتر علیرضا صبور روح اقدم و جناب آقای دکتر شاهرخ آهنگرانی میسر نبود.

علاوه بر این، لازم است از همکاری صمیمانه اساتید مشاور جناب آقای دکتر تقی شهرابی و جناب آقای دکتر امیر عبداله زاده و هم چنین مسئولین محترم در صنایع دفاعی مهام مخصوصاً سرکار خانم مهندس مریم ولیی و آزمایشگاه‌های بخش مواد که مرا در انجام و تحقق این پروژه یاری کرده اند، تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

پوشش‌های سخت مانند نیترید تیتانیم و کاربید تیتانیم به دلیل داشتن خواص منحصر به فرد، همانند سختی و استحکام بالا، مقاومت بالا به سایش و خوردگی، در محیط‌های صنعتی مانند ابزارهای برش، سایش و قالب‌های اکستروژن، کاربرد دارند. در صورتی‌که این نوع پوشش‌ها به صورت چند لایه استفاده شوند، خواص مکانیکی بهتری از خود نشان می‌دهند. پوشش‌های نازک و سخت معمولاً توسط تکنیک-های مختلف ترسیب از فاز بخار فیزیکی و شیمیایی ایجاد می‌شوند. در این تحقیق، پوشش‌های چند لایه نیترید تیتانیم/کاربید تیتانیم با ضخامت کلی ۰/۵±۲/۵ میکرومتر با متغیر تعداد لایه‌های پوشش، بر روی سطح فولاد ابزار گرم کار از روش ترسیب از فاز بخار شیمیایی به کمک پلاسما (PACVD) ایجاد شد. سپس ساختار و خواص مکانیکی آن، مانند مقاومت به سایش، سختی و چقرمگی با پوشش‌های تک لایه نیترید تیتانیم و کاربید تیتانیم مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشانگر این مطلب است که با افزایش تعداد لایه‌های پوشش از ۲ تا ۱۰، میزان سختی، مدول الاسیتیسیته و مقاومت به خراش در ابعاد نانو، حدود ۸-۳۷ درصد نسبت به پوشش تک لایه نیترید تیتانیم افزایش می‌یابد. دلیل افزایش سختی به افزایش فصل مشترک‌ها برای ایجاد کردن موانع، به منظور جلوگیری از حرکت نابه‌جائی‌ها مرتبط است. چقرمگی پوشش‌های چند لایه نیز نسبت به پوشش تک لایه نیترید تیتانیم (۶۲-۱۰۰ درصد) و کاربید تیتانیم (۷-۳۵) افزایش می‌یابد که این امر نیز به انکسار ترک‌ها در فصل مشترک‌های میان لایه‌ها مربوط می-باشد. میزان مقاومت به سایش، برای پوشش ده لایه بیشترین مقدار خود را دارد و نسبت به پوشش تک لایه کاربید تیتانیم ۱۰۰ درصد افزایش داشته است. کمترین و بیشترین میزان ضریب اصطکاک در آزمون سایش به ترتیب مربوط به پوشش تک لایه کاربید تیتانیم و نیترید تیتانیم است و با افزایش تعداد لایه‌ها حدود ۴۰ درصد نسبی از میزان ضریب اصطکاک نسبت به پوشش تک لایه نیترید تیتانیم در آزمون سایش کاسته می‌شود.

کلید واژه: پوشش چند لایه، نیترید تیتانیم، کاربید تیتانیم، سایش، چقرمگی، سختی، روش ترسیب از فاز بخار شیمیایی به کمک پلاسما.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱- مقدمه ۱

فصل ۲- مروری بر مطالعات انجام شده ۴

۲-۱- پیشینه تحقیق ۴

۲-۱-۱- روش ترسیب از فاز بخار فیزیکی ۷

۲-۱-۲- روش ترسیب از فاز بخار شیمیایی گرمایی ۱۶

۲-۱-۳- روش ترسیب از فاز بخار شیمیایی به کمک پلاسما ۲۱

۲-۱-۳-۱- پوشش‌های تک لایه ۲۲

۲-۱-۳-۲- پوشش‌های چند لایه، چند جزئی و گرادیانی ۲۶

۲-۲- اهداف رساله ۳۰

فصل ۳- مواد و روش‌ها ۳۳

۳-۱- مراحل آماده‌سازی نمونه ۳۳

۳-۲- عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی ۳۵

۳-۳- عملیات پوشش‌دهی ۳۶

۳-۳-۱- پوشش نیترید تیتانیم ۳۷

۳-۳-۲- پوشش کاربید تیتانیم ۳۸

۳-۳-۳- پوشش دو لایه ۳۹

۳-۳-۴- پوشش چند لایه ۴۰

۳-۴- آزمون‌های بررسی خواص پوشش ۴۱

۳-۴-۱- آزمون پراش پرتو ایکس ۴۱

۳-۴-۲- آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه ۴۲

۳-۴-۳- آزمون آنالیز عنصری طیف‌سنجی پرتو ایکس ۴۲

۳-۴-۴- میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ۴۲

۳-۴-۵- میکروسکپ نوری ۴۳

۳-۴-۶- میکروسکپ نیروی اتمی ۴۳

۳-۴-۷- آزمون سختی‌سنجی ۴۴

۳-۴-۸- آزمون سایش ۴۴
۳-۴-۹- نحوه اندازه‌گیری چقرمگی پوشش‌های نازک و فرمول‌های مربوطه ۴۵
فصل ۴- نتایج و بحث ۴۹
۴-۱- بررسی ظاهری و رنگ پوشش ۴۹
۴-۲- بررسی ترکیب شیمیایی پوشش ۵۱
۴-۲-۱- نتایج آزمون پراش پرتو ایکس ۵۱
۴-۲-۱-۱- بررسی بافت پوشش ۵۴
۴-۲-۱-۲- بررسی اندازه دانه ۵۵
۴-۲-۲- بررسی نتایج آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه ۵۶
۴-۲-۳- نتایج آزمون آنالیز عنصری طیف‌سنجی پرتو ایکس ۵۷
۴-۳- بررسی ساختار پوشش ۶۰
۴-۴- نتایج آزمون سختی ۶۷
۴-۵- نتایج آزمون سایش ۶۹
۴-۵-۱- مقاومت به سایش و تغییرات ضریب اصطکاک ۷۰
۴-۵-۲- مکانیزم سایش در پوشش‌ها ۷۵
۴-۵-۲-۱- مکانیزم سایش در پوشش نیترید تیتانیم تک لایه ۷۶
۴-۵-۲-۲- مکانیزم سایش در پوشش کاربید تیتانیم تک لایه ۷۸
۴-۵-۲-۳- مکانیزم سایش در پوشش چند لایه ۷۹
۴-۶- نتایج آزمون چقرمگی ۸۳
۴-۶-۱- ارزیابی نتایج آزمون چقرمگی پوشش نیترید تیتانیم تک لایه ۸۷
۴-۶-۲- ارزیابی نتایج آزمون چقرمگی پوشش کاربید تیتانیم تک لایه ۸۸
۴-۶-۳- ارزیابی نتایج آزمون چقرمگی پوشش چند لایه ۸۹
۴-۷- نتایج ارزیابی پوشش توسط میکروسکپ نیروی اتمی ۹۷
۴-۷-۱- توپوگرافی، اندازه و ارتفاع دانه‌ها در پوشش‌ها ۹۷
۴-۷-۲- زبری پوشش‌ها ۱۰۳
۴-۷-۳- آزمون دندانه‌گذاری به منظور اندازه‌گیری میزان سختی و مدول الاسیتیسیته ۱۰۴
۴-۷-۴- بررسی چقرمگی، مقاومت به سایش و تنش پسماند ۱۱۱
۴-۷-۵- میزان پلاسیتیسیته ۱۱۸

۴-۷-۶- آزمون نانوخراش ۱۲۰
۴-۸- مقایسه نانوسختی، میکروسختی و چقرمگی ۱۲۳
نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۷
فهرست منابع ۱۲۹
پیوست الف- بررسی نحوه اندازه‌گیری چقرمگی پوشش‌های نازک از لحاظ تئوری
پیوست ب- نمودارهای فازی
چکیده انگلیسی

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: خصوصیات مختلف پوشش کاربید تیتانیم و نیترید تیتانیم ۱۳
جدول ۲-۲: خصوصیات مختلف پوشش نیترید تیتانیم ۲۵
جدول ۳-۱: ترکیب (درصد وزنی) استاندارد عناصر آلیاژی فولاد ابزار گرم کار ۳۴
جدول ۳-۲: ترکیب (درصد وزنی) عناصر آلیاژی فولاد مورد استفاده ۳۴
جدول ۳-۳: پارامترهای فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی ۳۶
جدول ۳-۴: پارامترهای فرایند پوشش‌دهی نمونه‌های مختلف ۳۹
جدول ۴-۱: ضریب بافت در جهات مختلف برای پوشش‌های تک و چند لایه ۵۴
جدول ۴-۲: نتایج آزمون میکروسختی پوشش‌ها و نتایج مراجع جهت مقایسه ۶۸
جدول ۴-۳: نتایج مربوط به سرعت سایش و ضریب اصطکاک و نتایج مراجع جهت مقایسه ۷۱
جدول ۴-۴: نتایج مربوط به آزمون چقرمگی ۹۵
جدول ۴-۵: اندازه دانه و ارتفاع دانه‌ها برای پوشش‌های متفاوت و نتایج مراجع جهت مقایسه ۹۸
جدول ۴-۶: نتایج مربوط به میزان زبری سطحی برای پوشش‌های متفاوت و نتایج مراجع جهت مقایسه .....

۱۰۴.....
جدول ۴-۷: میزان نانوسختی و نانو مدول الاستیک برای پوشش‌های متفاوت و نتایج مراجع جهت مقایسه ۱۰۶
جدول ۴-۸: نتایج مربوط به تخمین میزان تنش پسماند ۱۱۶
جدول ۴-۹: پارامترهای مربوط به کرنش پلاستیک و بازیابی الاسیتیسیته ۱۱۹
جدول ۴-۱۰: نتایج مربوط به آزمون نانوخراش برای پوشش‌های متفاوت ۱۲۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: نمودار تغییرات سختی و چقرمگی با تغییر تعداد لایه‌های پوشش برای پوشش چند لایه ۸
شکل ۲-۲: شماتیک نمودار تغییرات سختی و چقرمگی با مساحت فصل مشترک‌ها ۹
شکل ۲-۳: تصویر و ساختار لایه $TiC/TiC_{0.25}N_{0.75}/TiN$ ۱۳
شکل ۲-۴: نمودار ضریب اصطکاک برای پوشش‌های تک لایه متفاوت ۱۴
شکل ۲-۵: مقایسه ترک خوردگی در پوشش الف- تک لایه و ب- چند لایه ۲۰
شکل ۲-۶: نمودار تغییرات دما و میزان کلر و نمودار تغییرات میکروسختی ویکرز با نیروی ده نیوتن با میزان کلر در پوشش نیترید تیتانیم با ضخامت سه میکرومتر ۲۳
شکل ۲-۷: بررسی تغییرات سختی با نوع و تعداد لایه‌های پوشش ۲۸
شکل ۲-۸: ساختار پوشش چند لایه با ساختار ستونی ۲۹
شکل ۳-۱: شماتیک ایجاد پوشش چهار لایه ۴۱
شکل ۳-۲: شماتیک نحوه چگونگی انجام آزمون نانوخراش همراه با معرفی پارامترهای مربوطه ۴۴
شکل ۳-۳: نمودار کلی روش انجام پروژه ۴۸
شکل ۴-۱: نتیجه آزمون پراش پرتو ایکس پوشش نیترید تیتانیم: الف- نمونه ۱ و ب- نمونه ۲ ..... ۵۲
شکل ۴-۲: نتایج آزمون پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های مختلف ۵۳
شکل ۴-۳: مقایسه اندازه دانه کریستالی پوشش‌ها با استفاده از فرمول شرر (رابطه ۴-۲) ۵۶
شکل ۴-۴: نتیجه آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه پوشش کاربید تیتانیم (نمونه ۶) ۵۷
شکل ۴-۵: نتیجه آزمون آنالیز عنصری برای پوشش نیترید تیتانیم (نمونه ۱) ۵۸

شکل ۴-۶: نتیجه آنالیز عنصری دو بعدی برای پوشش دو لایه ۵۹
شکل ۴-۷: نتیجه آنالیز عنصری خطی برای پوشش ده لایه ۶۰
شکل ۴-۸: تصویر میکروسکپ الکترونی سطح مقطع پوشش نیترید تیتانیم ۶۱
شکل ۴-۹: تصاویر میکروسکپ الکترونی سطح مقطع پوشش‌ها: الف- کاربید تیتانیم و ب- دو لایه ۶۲
شکل ۴-۱۰: تصاویر میکروسکپ الکترونی سطح مقطع پوشش‌ها: الف- سه لایه و ب- چهار لایه ۶۳
شکل ۴-۱۱: تصویر میکروسکپ الکترونی سطح مقطع پوشش شش لایه ۶۴
شکل ۴-۱۲: تصاویر میکروسکپ الکترونی سطح مقطع پوشش دو لایه در دو فرایند پوشش‌دهی پیوسته (سمت راست) و منقطع (سمت چپ) ۶۴
شکل ۴-۱۳: تصاویر میکروسکپ الکترونی سطح پوشش‌های چند لایه: الف- دو لایه، ب- چهار لایه، ج- شش لایه، د- ده لایه و و- تک لایه کاربید تیتانیم ۶۶
شکل ۴-۱۴: نمودار تغییرات نرخ سایش و ضریب اصطکاک با تغییرات تعداد لایه‌های پوشش ۷۲
شکل ۴-۱۵: نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش با تغییرات تعداد لایه‌های پوشش ۷۳
شکل ۴-۱۶: تصاویر میکروسکپ نوری مسیر سایش پوشش نیترید تیتانیم ۷۶
شکل ۴-۱۷: نتیجه آزمون آنالیز عنصری در مسیر سایش پوشش ده لایه ۷۷
شکل ۴-۱۸: تصاویر میکروسکپ نوری مسیر سایش پوشش کاربید تیتانیم ۷۸
شکل ۴-۱۹: تصاویر میکروسکپ نوری مسیر سایش پوشش دو لایه ۷۹
شکل ۴-۲۰: تصاویر میکروسکپ نوری مسیر سایش پوشش سه لایه ۸۰
شکل ۴-۲۱: تصاویر میکروسکپ نوری مسیر سایش پوشش چهار لایه ۸۱
شکل ۴-۲۲: تصویر میکروسکپ نوری مسیر سایش پوشش شش لایه ۸۲
شکل ۴-۲۳: تصاویر میکروسکپ نوری مسیر سایش پوشش ده لایه ۸۲
شکل ۴-۲۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی مسیر سایش: الف- پوشش کاربید تیتانیم، ب- پوشش چهار لایه و ج- پوشش ده لایه ۸۳
شکل ۴-۲۵: نمودار نیروی اعمالی بر حسب طول ترک ۸۵
شکل ۴-۲۶: تصاویر میکروسکوپ نوری اثر ویکرز در آزمون چقرمگی برای پوشش نیترید تیتانیم ۸۷
شکل ۴-۲۷: تصاویر میکروسکپ نوری اثر ویکرز در آزمون چقرمگی برای پوشش کاربید تیتانیم ۸۹
شکل ۴-۲۸: تصاویر میکروسکپ نوری اثر ویکرز در آزمون چقرمگی برای پوشش سه لایه ۹۰
شکل ۴-۲۹: نمودار تغییرات میزان نیروی اعمالی با طول ترک برای پوشش‌های متفاوت ۹۰
شکل ۴-۳۰: تصاویر میکروسکپ نوری اثر ویکرز در آزمون چقرمگی برای پوشش دو لایه ۹۱

شکل ۴-۳۱: تصاویر میکروسکپ نوری اثر ویکرز در آزمون چقرمگی برای پوشش چهار لایه..... ۹۲
شکل ۴-۳۲: تصاویر میکروسکپ نوری اثر ویکرز در آزمون چقرمگی برای پوشش شش لایه..... ۹۲
شکل ۴-۳۳: تصاویر میکروسکپ نوری اثر ویکرز در آزمون چقرمگی برای پوشش ده لایه ۹۳
شکل ۴-۳۴: تصویر میکروسکپ الکترونی اثر ویکرز در آزمون چقرمگی: الف- پوشش کاربید تیتانیم و ب- پوشش ده لایه ۹۳
شکل ۴-۳۵: نمودار تغییرات میزان نیروی اعمالی با طول ترک برای پوشش‌های متفاوت..... ۹۴
شکل ۴-۳۶: توپوگرافی سطح پوشش نیترید تیتانیم..... ۹۹
شکل ۴-۳۷: توپوگرافی سطح پوشش کاربید تیتانیم..... ۹۹
شکل ۴-۳۸: توپوگرافی سطح پوشش دو لایه ۱۰۰
شکل ۴-۳۹: توپوگرافی سطح پوشش سه لایه ۱۰۰
شکل ۴-۴۰: توپوگرافی سطح پوشش شش لایه..... ۱۰۱
شکل ۴-۴۱: توپوگرافی سطح پوشش ده لایه ۱۰۲
شکل ۴-۴۲: مقایسه اندازه دانه پوشش‌ها از دو روش محاسبه و تصویری ۱۰۲
شکل ۴-۴۳: نمودار نیروی اعمالی بر حسب جابه‌جائی برای پوشش تک لایه نیترید تیتانیم، کاربید تیتانیم و پوشش ده لایه ۱۰۵
شکل ۴-۴۴: نمودار تغییرات نانوسختی و مدول الاستیک با تعداد لایه‌های پوشش ۱۰۸
شکل ۴-۴۵: مقایسه میزان توان‌های مختلف از نسبت نانو سختی به مدول الاستیک با تغییرات نوع و تعداد لایه‌های پوشش..... ۱۱۲
شکل ۴-۴۶: نمودار توان سوم سختی بر توان دوم مدول الاستیک بر حسب چقرمگی ۱۱۳
شکل ۴-۴۷: منحنی نسبت نیرو به مجموع نصف ابعاد اثر فرورونده و طول ترک به عکس طول ترک ۱۱۷
شکل ۴-۸۹: نمودار ضریب خراش بر حسب زمان در آزمون نانوخراش: الف- نیترید تیتانیم، ب- کاربید تیتانیم، ج- پوشش سه لایه، د- پوشش دو لایه، ه- پوشش شش لایه و و- پوشش ده لایه ۱۲۲
شکل ۴-۴۹: مقایسه میزان نانوسختی و میکروسختی با تغییرات نوع و تعداد لایه‌های پوشش ۱۲۴
شکل ۴-۵۰: مقایسه چقرمگی با ضریب مربوطه در فرمول‌های متفاوت ۱۲۵

فصل ۱– مقدمه

پوشش‌های نیترید تیتانیم و کاربید تیتانیم به دلیل داشتن خواصی مطلوب مانند سختی و مدول الاستیک بالا، مقاومت بالا در برابر سایش و ضریب اصطکاک کمتر نسبت به مواد فلزی بدون پوشش، امروزه کاربرد گسترده‌ای را در صنعت در زمینه ساخت قطعات متفاوت چون ابزارهای برش به عنوان پوشش‌های نازک سخت به خود اختصاص داده‌اند[۳-۱].

عمده‌ترین روش‌های ایجاد این نوع پوشش‌ها، روش ترسیب از فاز بخار فیزیکی[۱] و شیمیایی می‌باشد. کم بودن نرخ رسوب‌دهی، نیاز به خلأ بسیار بالا، کاهش استحکام چسبندگی پوشش به زیر لایه و قدرت پرتاب نسبتاً کم به منظور پوشش‌دهی قطعات با هندسه پیچیده از محدودیت‌های روش ترسیب از فاز بخار فیزیکی محسوب می‌شود[۴]. در روش ترسیب از فاز بخار شیمیایی گرمایی[۲]، دمای زیاد فرایند (بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) نیز، سبب کاهش کیفیت پوشش و تغییر خواص زیر لایه می‌شود. اما روش ترسیب از فاز بخار شیمیایی به کمک پلاسما[۳]، تکنیک مناسبی برای ایجاد پوشش با کم کردن چند محدودیت ذکر شده، می‌باشد. همچنین این روش برای پوشش‌دهی سطوح قطعات با هندسه و اشکال پیچیده امکان‌پذیر می‌باشد[۵]. علاوه بر این، در این روش، کنترل ترکیب و ضخامت پوشش به راحتی صورت گرفته و در هنگام پوشش‌دهی نیازی به چرخش نمونه نمی‌باشد، زیرا که قدرت پرتاب، در این روش بسیار بالا می‌باشد و امکان ایجاد یک پوشش کاملاً یکنواخت در سطوح ناصاف و یا پله‌ای راحت می‌باشد[۳و۷-۶].

[1] Physical Vapor Deposition (PVD)
[2] Thermal Chemical Vapor Deposition (CVD)
[3] Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition (PACVD) or Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)

از آنجا که پوشش‌های سخت همانند کاربید تیتانیم به علّت تردی نسبتاً بالا معمولاً برای استفاده در قالب‌های شکل‌دهی، آهنگری، سمبه و ماتریس (شرایط بارگذاری دینامیک یا ضربه‌ای) مناسب نمی‌باشد، لذا در تحقیقات اخیر، از سنتز پوشش‌های چند لایه برای رفع این مشکل استفاده شده است[۹-۸]، زیرا که هر لایه از پوشش‌های چند لایه، دارای خواص مخصوص به خود است که استفاده همزمان از این لایه‌ها، سبب بهبود کارکرد قطعات می‌شود.

مزیت استفاده از پوشش‌های چند لایه را نیز می‌توان به افزایش سختی با توجه به قفل شدن حرکت نابه‌جایی‌ها در فصل مشترک پوشش‌ها و افزایش چقرمگی را با توجه به تغییر میزان رشد ترک‌ها در فصول مشترک لایه‌های پوشش‌ها و تغییر تنش پسماند در پوشش نسبت داد. لذا در این تحقیق، با توجه به مزایای ذکر شده در رابطه با روش ترسیب از فاز بخار شیمیایی به کمک پلاسما مخصوصاً در صنعت، ایجاد و بررسی خواص پوشش چند لایه نیترید تیتانیم/ کاربید تیتانیم انجام می‌شود. از آنجا که انکسار ترک‌ها در فصل مشترک میان لایه‌ها می‌تواند میزان انرژی لازم را برای رشد ترک‌ها افزایش دهد، این‌گونه پیش‌بینی می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌های پوشش، میزان چقرمگی و مقاومت به سایش نیز افزایش یابد. همچنین کاهش ضخامت لایه‌ها در پوشش‌های چند لایه، موجب افزایش میزان فصل مشترک‌ها شده که خود می‌تواند عاملی برای تغییر سختی باشد. لذا تغییر تعداد لایه‌های پوشش (۱۰-۱) به عنوان عامل متغیر و طرح جدید برای تغییر خواص مکانیکی (همانند سختی، چقرمگی و مقاومت به سایش) پوشش چند لایه نیترید تیتانیم/ کاربید تیتانیم در یک ضخامت کلی ثابت (۰/۵±۲/۵ میکرومتر) در این تحقیق مطرح می‌باشد.

بعد از مقدمه، در فصل دوم این تحقیق در بخش پیشینه تحقیق به مرور مطالعات انجام شده توسط محققین دیگر پرداخته خواهد شد. پیشینه تحقیق نیز به تقسیم نوع روش پوشش‌دهی و ترتیب سال تحقیق محققین از دهه هشتاد میلادی تا سال ۲۰۱۳ میلادی منظم خواهد شد. در انتهای فصل دوم نیز، به اهداف رساله اشاره می‌شود. در فصل سوم، مواد و روش‌های تحقیق با ذکر جزئیات مربوط به انواع آزمون‌های لازم برای بررسی ساختار، ترکیب و خواص مکانیکی پوشش‌های چند لایه در مقایسه با

پوشش‌های تک لایه، بیان می‌شود. نتایج و بحث در فصل چهارم قرار گرفته که شامل هشت بخش اصلی (بررسی ظاهری و رنگ پوشش، ترکیب شیمیایی پوشش، بررسی ساختار پوشش، نتایج آزمون سختی، سایش، چقرمگی، نتایج ارزیابی پوشش توسط میکروسکپ نیروی اتمی و مقایسه نانوسختی، میکروسختی و چقرمگی) می‌باشد. در آخرین فصل نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات ذکر خواهد شد.

فصل ۲- مروری بر مطالعات انجام شده

در این فصل در ابتدا مطالعات انجام شده توسط دیگر محققین به عنوان پیشینه تحقیق، مورد بررسی قرار گرفته و سپس در انتهای فصل، اهداف رساله و نوآوری آن بیان شده است.

۲-۱- پیشینه تحقیق

پوشش‌هایی با سختی بالا معمولاً بر روی فلزات با استحکام مناسب همانند ابزار برش، برای افزایش طول عمر و بهبود کارکرد قطعات[۴] ایجاد می‌شوند، زیرا که مقاومت این پوشش‌ها، در برابر انواع سایش‌ها مخصوصاً سایش خراشان زیاد می‌باشد. اخیراً نیز از این پوشش‌ها در ساخت دیگر قطعات صنعتی چون قالب‌های تزریقی به منظور بهبود خواص و عملکرد آن‌ها استفاده می‌شود. در این گونه قطعات که امکان خوردگی و صدمات حفره‌ای وجود دارد، پوشش‌های سخت و مستحکم می‌توانند یک مانع مناسب برای نفوذ خوردگی و همچنین یک مانع ضد سایش باشند که طول عمر این قالب‌ها را به پنج برابر مقدار اولیه خود افزایش می‌دهد[۱۲-۱۰]. بنابراین پوشش‌های مقاوم به سایش، فرسایش و خوردگی معمولاً بر روی فولادهای صنعتی، فولادهای ابزار کبالت-کاربید تنگستنی، فولادهای تندبر و ویفرهای سیلیکنی ایجاد می‌شوند[۶و۱۳].

پوشش نیترید تیتانیم به دلیل داشتن خواصی چون مقاومت بالا در برابر سایش، سطح نهایی مناسب و مقاومت بالا به خوردگی در محیط‌های اسیدی و حاوی کلرید برای پوشش‌دهی لوازم جراحی و کاشت قطعات پزشکی در بدن انسان، و هم‌چنین به علت داشتن رنگ طلایی برای تزیین وسایل مختلف چون فریم عینک و ساعت، همواره مورد توجه بوده است[۱۵-۱۴]. پوشش نیترید تیتانیم و کاربید تیتانیم در

صنعت میکروالکترونیک هم به دلیل ویژگی‌های خاص چون پایداری دمایی بالا، مقاومت الکتریکی پایین و سد نفوذی مناسب هم کاربرد دارند[۱۷-۱۵]. علاوه بر خواص ذکر شده، پایداری ساختاری نیترید تیتانیم به عنوان یک ویژگی منحصر به فرد محسوب می‌شود، زیرا که نیترید تیتانیم با ترکیب شیمیایی متفاوت با تغییر درصد نیتروژن اتمی از ۰/۶ تا ۱/۲ ساختار کریستالی خود را حفظ می‌کند[۱۸].

همچنین ابزارهای صنعتی همانند ابزار برش، معمولاً به دلیل تماس زیاد با قطعات دیگر دچار سایش می‌شوند. برای جلوگیری و کاهش نرخ این نوع سایش، می‌توان از پوشش‌های متفاوت سخت و مقاوم به سایش، همانند کاربید تیتانیم یا نیترید تیتانیم استفاده کرد. علاوه بر سختی بالا، در ابزارهای برش و شکل‌دهی، نیاز به پوشش‌هایی با ضریب اصطکاک کم می‌باشد، زیرا با کاهش ضریب اصطکاک، خاصیت روغنکاری[1] بهبود می‌یابد. همچنین در ابزارهای مختلف چون ابزار شکل‌دهی، میزان نیروی لازم برای فرایند شکل‌دهی بر اساس کم شدن میزان ضریب اصطکاک کاهش یافته و در ابزارهای برش به دلیل کاهش میزان گرمای تولید شده در حین فرایند، میزان طول عمر (دیر کند شدن لبه‌های ابزار برش) آن‌ها حدود دو تا سه برابر نسبت به ابزارهای برش بدون پوشش افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط نیروهای ضربه‌ای همانند قالب‌های سمبه و ماتریس، نیاز به پوشش‌هایی با چقرمگی بالا می‌باشد[۲۰-۱۹].

بطور کلی می‌توان گفت پوشش‌های چند لایه به سه دسته تقسیم می‌شوند: گروه اول، پوشش از چند ماده متفاوت با تعداد لایه‌های محدود (۱۳-۳) با شبکه‌های تقریباً یکسان ترسیب می‌شود که معمولاً هدف جلوگیری از دانه‌بندی ستونی، کاهش اندازه دانه و افزایش سختی است. گروه دوم، پوشش از دو ماده کاملاً متفاوت (از لحاظ ساختار شبکه، پارامتر شبکه، سختی و ....) به صورت متناوب ترسیب می‌شوند. هدف از ایجاد این نوع پوشش، ایجاد حجم زیادی از فصل مشترک‌ها با خواص متفاوت برای افزایش سختی تا ۴۶ گیگاپاسکال می‌باشد. گروه سوم، پوشش از دو ماده با خواص یکسان از لحاظ ساختار، پارامتر شبکه‌ای، پیوند شیمیایی و شعاع اتمی (مانند نیترید تیتانیم و کاربید تیتانیم یا نیترید

[1] Lubricity