

روزنامه اطلاعات آذربایجان  
شماره ۱۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۳۳۱۳

کتابخانه تخصصی  
دانشگاه صنعتی اصفهان



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

۱۳۸۱ / ۴ / ۳۰

جوشکاری اصطکاکی تیتانیوم / کاربرد تنگستن - کبالت و ارزیابی خواص اتصال

رساله دکترای مهندسی مواد

مرتضی شمعیان اصفهانی

استادان راهنما

دکتر احمد ساعتچی

دکتر مهدی صالحی

استادان مشاور

Dr. Thomas H. North

دکتر حسین ادريس

آبان ماه ۱۳۸۰

۴۱۲۴۴



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

رساله دکتری مهندسی مواد آقای مرتضی شمعیان  
تحت عنوان

جوشکاری اصطکاکی تیتانیوم / کاربرد تنگستن - کبالت و ارزیابی خواص اتصال

در تاریخ ۸۰/۸/۲۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و اصالت و صحت مطالب رساله مورد تایید قرار گرفت.

- ۱ - استاد راهنمای رساله (رییس هیات داوران): ..... دکتر مهدی صالحی
- ۲ - استاد راهنمای رساله (رییس هیات داوران): ..... دکتر احمد ساعتچی
- ۳ - استاد مشاور: ..... دکتر حسین ادریس
- ۴ - استاد داور: ..... دکتر محمدعلی گلغذار
- ۵ - استاد داور: ..... دکتر امیرحسین کوکبی
- ۶ - استاد داور: ..... دکتر ابوالقاسم دهقان
- ۷ - استاد داور: ..... دکتر علی سعیدی
- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی مواد: ..... دکتر احمد ساعتچی

## من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق

### تشکر و قدردانی

در آغاز بر خود لازم می دانم از اساتید ارجمند و بزرگوارم آقایان دکتر مهدی صالحی، دکتر احمد ساعتچی، دکتر حسین ادريس و پرفسور توماس نورث به لحاظ کمک های بی دریغ، مباحث مفید و نقش موثر ایشان در هدایت این پژوهش تشکر و قدردانی نموده و اجر زحمات ایشان را از درگاه احدیت خواستار گردم. از زحمات و مساعدت های بی دریغ آقایان دکتر محمد حسن عباسی، پرفسور محمدعلی گلعداز و دکتر محمود مرآتیان در طی دوره دکتری سپاسگزاری می نمایم.

از پدر و مادر گرامیم بخاطر تلاشهای آنان در طی دوران تحصیلات خویش متشکرم. از همسر عزیزم بخاطر تشویق ها، دلگرمی ها و تحمل صبورانه وی در طی این پژوهش سپاسگزارم. از خانواده گرانقدر همسرم بخاطر مساعدت آنان در طی دوره دکتری قدردانی می نمایم.

از سروران عزیزم در دانشگاه صنعتی اصفهان آقایان دکتر بهزاد نیرومند، مهندس جعفر صفریان، مهندس کامران صائبی، آقای محمود صادقی، خانم مهندس علوی و سرکار خانم شوشتریان و خانم رفیعیان و همچنین دوستان گرامیم در دانشگاه تورنتو کانادا آقایان پرفسور U.Erb، دکتر H.Xin، J.Calloway، S.Bocchio و F.Neub که در طی این پژوهش اینجانب را یاری نمودند تشکر می نمایم.

در پایان از ریاست محترم دانشگاه، معاونت محترم مالی و اداری، معاونت محترم آموزشی، معاونت محترم پژوهشی، معاونت محترم دانشجویی، ریاست محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه و کلیه اساتید و کارکنان محترم دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان بخاطر مساعدت آنان در طی دوران تحصیلات دانشگاهی خود نهایت سپاس و تشکر را دارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع  
این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به همسر

که بدون پشتیبانی او این تحقیق میسر نبود

*To My Wife*

Without her support , this research would never have been finished

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	چکیده .....
۲	فصل اول : مقدمه .....
۴	فصل دوم : مرور مطالعاتی .....
۴	۲-۱- خواص متالورژیکی تیتانیم .....
۵	۲-۱-۱- دسته بندی آلیاژهای تیتانیم .....
۱۰	۲-۱-۲- آلیاژهای دوتایی تیتانیم .....
۱۲	۲-۱-۳- آلیاژهای چندتایی تیتانیم .....
۱۳	۲-۱-۴- آلیاژهای صنعتی تیتانیم .....
۱۷	۲-۲- تکنولوژی و متالورژی جوشکاری آلیاژهای تیتانیم .....
۱۹	۲-۲-۱- جوش پذیری آلیاژهای تیتانیم .....
۲۰	۲-۲-۲- عملیات حرارتی پس از جوشکاری .....
۲۰	۲-۳- خواص تریبولوژیکی آلیاژهای تیتانیم .....
۲۴	۲-۴- کاربرد تنگستن - کبالت (WC-Co) .....
۲۴	۲-۴-۱- تولید کاربرد تنگستن - کبالت .....
۳۰	۲-۴-۲- ریزساختار کاربرد تنگستن - کبالت .....
۳۱	۲-۴-۳- خواص فیزیکی و مکانیکی کاربرد تنگستن - کبالت .....
۳۱	۲-۴-۴- شکست کاربیدهای تنگستن - کبالت .....
۳۲	۲-۴-۵- محاسبه پارامترهای ریزساختاری در کاربرد تنگستن - کبالت .....
۳۳	۲-۵- جوشکاری اصطکاکی .....
۳۵	۲-۵-۱- جوشکاری اصطکاکی مداوم .....
۳۹	۲-۵-۲- جوشکاری اصطکاکی لحظه ای .....

مرکز مطالعات و تحقیقات  
 آلیاژهای تیتانیم  
 تهران - آذر ۱۳۸۷

.....	۲-۵-۳- انواع طرح های اتصال در فرایند جوشکاری اصطکاکی	۴۰
.....	۲-۵-۴- مزایا و محدودیت های جوشکاری اصطکاکی	۴۱
.....	۲-۵-۵- جنبه های حرارتی جوشکاری اصطکاکی	۴۲
.....	۲-۵-۶- تاثیر لایه میانی بر فرایند و خواص جوش های اصطکاکی	۴۵
.....	۲-۵-۷- تاثیر لایه میانی بر توزیع تنش ها در جوشکاری اصطکاکی	۴۷
.....	۲-۵-۸- تشکیل و رشد ترکیبات بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی	۵۰
.....	۲-۵-۹- شبیه سازی شکست ذرات در جوشکاری اصطکاکی کامپوزیت ها	۵۰
.....	۲-۵-۱۰- تنش های پسماند و تاثیر آن بر خواص جوش های اصطکاکی	۵۳
.....	۲-۵-۱۱- جوش پذیری مواد در جوشکاری اصطکاکی	۵۶
.....	۲-۵-۱۲- جوشکاری اصطکاکی تیتانیم و آلیاژهای آن	۵۷
.....	۲-۵-۱۳- جوشکاری اصطکاکی مواد غیرمشابه	۵۷
.....	۲-۵-۱۴- کاربردهای جوشکاری اصطکاکی	۵۹
.....	۲-۶-۶- بررسی نمودار فازی سیستم Ni-Co و Ti-Ni ، Ti-Co	۵۹
.....	۲-۶-۱- نمودار فازی سیستم Ti- Co	۶۰
.....	۲-۶-۲- نمودار فازی سیستم Ti-Ni	۶۱
.....	۲-۶-۳- نمودار فازی سیستم Ni-Co	۶۲
.....	فصل سوم : مواد و روش آزمایش ها	۶۳
.....	۳-۱- مواد مصرفی	۶۳
.....	۳-۲- لایه میانی نیکل	۶۷
.....	۳-۳- آماده سازی نمونه ها و جوشکاری اصطکاکی	۶۷
.....	۳-۴- آزمایش متالوگرافی	۶۸
.....	۳-۵- آزمایش پراش پرتو ایکس	۶۸
.....	۳-۶- آزمایش مکانیکی	۶۹



## فصل چهارم : نتایج و بحث ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی

۷۰	..... جوش های اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC-CO)
۷۰	..... ۱-۴- انتخاب پارامترهای جوشکاری
۷۱	..... ۱-۱-۴- فشار اصطکاکی
۷۴	..... ۲-۱-۴- زمان اصطکاک
۷۶	..... ۳-۱-۴- فشار فورج
۷۶	..... ۲-۴- ارزیابی دما ضمن جوشکاری اصطکاکی
۷۸	..... ۳-۴- ریزساختار جوش های اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC-CO)
۸۶	..... ۴-۴- خواص مکانیکی جوش های اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC-Co)
۸۸	..... ۵-۴- بررسی سطوح و مقاطع شکست

## پنجم : نتایج و بحث تاثیر لایه میانی نیکل بر ساختار میکروسکوپی و

۹۴	..... خواص مکانیکی جوش های اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC-Co)
۹۵	..... ۱-۵- لایه میانی نیکل و تاثیر آن بر پارامترهای جوشکاری
۹۵	..... ۱-۱-۵- ایجاد لایه نیکل بر سطح مقطع قطعات
۱۰۱	..... ۲-۱-۵- فشار اصطکاکی
۱۰۱	..... ۳-۱-۵- زمان اصطکاک
۱۰۱	..... ۴-۱-۵- فشار فورج
۱۰۲	..... ۲-۵- ساختار میکروسکوپی جوش ها
۱۰۵	..... ۳-۵- بررسی تاثیر ریزساختار بر خواص مکانیکی جوش ها
۱۰۹	..... ۱-۳-۵- جوش های اصطکاکی Ti6Al4V/Ni/WC-6 wt.%Co
۱۱۰	..... ۲-۳-۵- جوش اصطکاکی Ti6Al4V/Ni/WC-11 wt.%Co و Ti6Al4V/Ni/WC-24wt.%Co...
۱۱۶	..... ۳-۳-۵- تشکیل ترکیبات بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی (Ti6Al4V/Ni/(WC-Co)
۱۲۱	..... ۴-۵- بررسی سطوح مقاطع شکست

فصل ششم : نتیجه گیری ..... ۱۲۶

مراجع ..... ۱۳۰

## فهرست جدول ها

صفحه

عنوان

### فصل دوم : مرور مطالعاتی

- جدول ۱-۲. برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی تیتانیم خالص ..... ۵
- جدول ۲-۲. دسته بندی ساختاری آلیاژهای تیتانیم ..... ۶
- جدول ۳-۲. خواص انواع آلیاژهای تیتانیم ..... ۹
- جدول ۴-۲. ترکیب شیمیایی آلیاژ  $Ti6Al4V$  ..... ۱۳
- جدول ۵-۲. خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ  $Ti6Al4V$  ..... ۱۴
- جدول ۶-۲. فرایندهای متداول جوشکاری تیتانیم و آلیاژهای آن ..... ۱۹
- جدول ۷-۲. انواع عملیات پوشش دهی سطح آلیاژهای تیتانیم ..... ۲۲
- جدول ۸-۲. خواص فیزیکی و مکانیکی مواد مصرفی در تولید انواع کاربیدهای سمانته ..... ۲۵
- جدول ۹-۲. خواص برخی از انواع کاربیدهای تنگستن ( $WC-Co$ ) ..... ۳۱

### فصل سوم : مواد و روش آزمایش ها

- جدول ۱-۳. ترکیب شیمیایی آلیاژ تیتانیم  $Ti6Al4V$  ..... ۶۴
- جدول ۲-۳. پارامترهای میکروسکوپی در ساختار کاربید تنگستن-کبالت ( $WC-CO$ ) ..... ۶۴
- جدول ۳-۳. خواص فیزیکی آلیاژ تیتانیم  $Ti6Al4V$  و سه نوع کاربید تنگستن-کبالت ..... ۶۴
- جدول ۴-۳. خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیم  $Ti6Al4V$  و سه نوع کاربید تنگستن-کبالت ( $WC-Co$ ) ..... ۶۵
- جدول ۵-۲. شرایط حمام آبکاری الکتریکی نیکل ..... ۶۷

### فصل چهارم : نتایج و بحث ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی جوش های اصطکاکی

#### $Ti6Al4V/(WC-CO)$

- جدول ۱-۴. پارامترهای ریزساختاری و خواص مکانیکی آلیاژ  $Ti6Al4V$  و کاربید تنگستن - کبالت ..... ۷۳
- جدول ۲-۴. تنش فشاری، بار متوسط اعمالی بر هر ذره  $WC$ ، شعاع انحناء و مدول الاستیک معدل در جوش های اصطکاکی  $Ti6Al4V/WC-Co$  ..... ۷۳

- جدول ۳-۴. پارامترهای جوشکاری اصطکاکی آلیاژ Ti6Al4V با سه نوع کاربید تنگستن - کبالت ..... ۷۶
- جدول ۴-۴. خواص مکانیکی جوش های اصطکاکی Ti6Al4V/WC- 24 wt. Co ..... ۸۸
- جدول ۵-۴. ضرایب انبساط حرارتی آلیاژ Ti6Al4V و سه نوع کاربید تنگستن- کبالت ..... ۸۸

فصل پنجم: نتایج و بحث تاثیر لایه میانی نیکل بر ساختار میکروسکوپی و

خواص مکانیکی جوش های اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC-Co)

- جدول ۱-۵. برخی از خواص مکانیکی آلیاژ Ti6Al4V و کاربید تنگستن- کبالت و نیکل ..... ۹۹
- جدول ۲-۵. مدول الاستیک معادل زوج های مختلف ..... ۹۹
- جدول ۳-۵. استحکام شکست جوش های اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC-Co) در غیاب و در حضور لایه میانی نیکل با ضخامت های مختلف ..... ۱۰۵

## فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

### فصل دوم : مرور مطالعاتی

- شکل ۲-۱. تاثیر عناصر آلیاژی بر نمودار فاز Ti-X ..... ۶
- شکل ۲-۲. ساختار میکروسکوپی تیتانیم خالص تجارتي ..... ۸
- شکل ۲-۳. شمایی از دسته بندی برای آلیاژهای دوتایی تیتانیم ..... ۱۱
- شکل ۲-۴. شمایی از دسته بندی برای آلیاژهای دوتایی تیتانیم ..... ۱۲
- شکل ۲-۵. مقاطع هم دمای نمودار فازی Ti-Al-V ..... ۱۵
- شکل ۲-۶. تاثیر دما و سرعت سرد شدن بر ساختار میکروسکوپی آلیاژ  $Ti_6Al_4V$  ..... ۱۶
- شکل ۲-۷. تاثیر آلوده شدن حوضچه جوش تیتانیم بر سختی فلز جوش ..... ۱۸
- شکل ۲-۸. ارتباط بین سختی و شکنندگی فلز جوش تیتانیم آلوده شده با هوا ..... ۱۸
- شکل ۲-۹. مراحل تولید کاربید تنگستن- کبالت ..... ۲۵
- شکل ۲-۱۰. درصد کربن کاربید تنگستن بر حسب دمای کربوره کردن ..... ۲۶
- شکل ۲-۱۱. تغییرات دمایی در مراحل زینتر کردن کاربیدهای سماته ..... ۲۸
- شکل ۲-۱۲. نمودار فاز سیستم WC-Co ..... ۲۸
- شکل ۲-۱۳. تاثیر زینتر کردن بر رشد دانه های مخلوط WC-25 wt.%Co ..... ۲۹
- شکل ۲-۱۴. تاثیر دمای زینتر کردن بر چگالی مخلوط پودری WC-11 wt.%Co ،  
زمان نگهداری ۳۰ دقیقه ..... ۲۹
- شکل ۲-۱۵. تصویر میکروسکوپی الکترونی از بلور کاربید تنگستن، ریزساختار WC-6 wt.%Co و  
WC-11 wt.%Co ..... ۳۰
- شکل ۲-۱۶. چهار مسیر شکست احتمالی در ریزساختار WC/Co ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۷. شمایی از فرایند جوشکاری اصطکاکی ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۸. تغییرات پارامترهای مؤثر در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی مداوم ..... ۳۶

- شکل ۲-۱۹. تغییرات سرعت، گشتاور و کوتاه شدن محوری در طی مرحله ایجاد حرارت (اصطکاکی) در فرایند جوشکاری اصطکاکی مداوم ..... ۳۷
- شکل ۲-۲۰. سطح تماس بین دو نمونه که نشان دهنده سطح تماس ظاهری و واقعی و ناهمواریهای سطحی است ..... ۳۸
- شکل ۲-۲۱. مراحل مختلف در طی مرحله ایجاد حرارت در جوشکاری اصطکاکی مداوم ..... ۳۸
- شکل ۲-۲۲. تغییرات پارامترهای مؤثر در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی لحظه ای ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۳. شمایی از جوشکاری اصطکاکی دو مفتول ..... ۴۳
- شکل ۲-۲۴. منحنی تغییرات دما - زمان در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی ..... ۴۵
- شکل ۲-۲۵. تاثیر یک لایه میانی بر خواص جوش های اصطکاکی مواد غیر مشابه ..... ۴۶
- شکل ۲-۲۶. مثالی از تاثیر لایه میانی بر ضریب اصطکاک یک ماده سخت ..... ۴۷
- شکل ۲-۲۷. بارگذاری خطی یک محیط نیمه بی نهایت ..... ۴۸
- شکل ۲-۲۸. توزیع تنش عمودی ایجاد شده در اثر مجموعه ای از بارهای خطی عمودی و مماسی در سطح تماس ( $y=0$ ) ..... ۴۹
- شکل ۲-۲۹. توزیع تنش عمودی ایجاد شده در اثر مجموعه ای از بارهای خطی عمودی و مماسی در طول خط  $y=0/1$  ..... ۴۹
- شکل ۲-۳۰. سطح تماس بین یک کامپوزیت MMC و قطعه مقابل (مدل سطح موجی) ..... ۵۱
- شکل ۲-۳۱. نحوه توزیع تنش (تنش عمود بر موضع اتصال) در قسمت محیطی جوش اصطکاکی Ti/AISI 304L ..... ۵۴
- شکل ۲-۳۲. توزیع تنش های پسماند حرارتی در موضع اتصال فولاد  $Si_3N_4$  (به روش المان محدود) دمای اتصال  $975^\circ C$  ..... ۵۵
- شکل ۲-۳۳. قابلیت جوش پذیری مجموعه زوج های مختلف به روش جوشکاری اصطکاکی ..... ۵۶
- شکل ۲-۳۴. ریزساختار و تغییرات ترکیب شیمیایی در موضع اتصال تیتانیوم خالص تجارتي و فولاد زنگ نزن 304 L ..... ۵۸
- شکل ۲-۳۵. کاربرد جوشکاری اصطکاکی در صنعت اتومبیل سازی ..... ۵۹

- شکل ۲-۳۶. نمودار فازی سیستم Ti-Co ..... ۶۰
- شکل ۲-۳۷. نمودار فازی سیستم Ti-Ni ..... ۶۱
- شکل ۲-۳۸. نمودار فازی سیستم Ni-Co ..... ۶۲

## فصل سوم: مواد و روش آزمایش ها

- شکل ۳-۱. ساختار میکروسکوپی آلیاژ تیتانیم Ti6Al4V ..... ۶۵
- شکل ۳-۲. ساختار میکروسکوپی کاربرد تنگستن-کبالت ..... ۶۶
- شکل ۳-۳. طرح ساده ای از آزمایش خمش سه نقطه ای ..... ۶۹

## فصل چهارم: نتایج و بحث ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی

## جوش های اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC-CO)

شکل ۴-۱. شکست ذرات WC در موضع جوش اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC-6 wt.%Co)

(فشار اصطکاکی ۳۰ MPa، زمان اصطکاک ۲ ثانیه، فشار فورج ۱۰۰ MPa و زمان فورج ۵ ثانیه) ..... ۷۳

شکل ۴-۲. تاثیر زمان اصطکاک بر استحکام شکست جوش های اصطکاکی

..... ۷۴ Ti6Al4V/WC-11 wt.%Co

شکل ۴-۳. شمایی از تاثیر زمان اصطکاک بر کیفیت جوشهای اصطکاکی

..... ۷۵ بین Ti6Al4V و (WC-Co)

شکل ۴-۴. موضع اتصال جوش اصطکاکی Ti6Al4V/WC 24 wt.%Co (قبل از اچ کردن) ..... ۸۰

شکل ۴-۵. ساختار میکروسکوپی موضع اتصال جوش اصطکاکی Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co (مرکز اتصال) ..... ۸۰

شکل ۴-۶. ساختار میکروسکوپی میکروسکوپی الکترونی از فصل مشترک جوش های اصطکاکی

الف) Ti6Al4V/WC-6 wt.%Co ب) Ti6Al4V/WC-11 wt.%Co

..... ۸۱ ج) Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co

شکل ۴-۷. سطح آلیاژ Ti6Al4V پس از تماسی کوتاه (۰/۲ ثانیه) با WC-24wt.%Co

..... ۸۲ در طی جوشکاری اصطکاکی