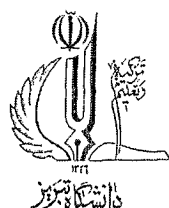


۱۷/۱/۱۷۲۶  
۱۷۰۰۵۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی

عنوان

تأثیر تنش‌های باقیمانده روی عمر خستگی اتصالات نقطه جوش

استاد راهنما

دکتر محمد زهساز

استاد مشاور

دکتر تاج‌بخش نوید چاخارلو

پژوهشگر

سوران حسنی فرد

آبان‌ماه ۱۳۸۷

۱۰۸۴۰۳

تفصیل بہ:

پدر و مادر

## تقدیر و تشکر:

خداوند را شاکر و سپاسگزارم که به اینجانب توفیق انجام این کار را عطا نمود.

لازم می‌دانم که از زحمات و حمایت‌های ارزشمند استاد راهنمای محترم، جناب آقای دکتر زهرا که در طول این دوره همواره از راهنمایی‌های ایشان بهره‌برده‌ام، تشکر نمایم.

از استاد راهنمای دوره فرصت مطالعاتی ام در دانشگاه شیر و کاژان جناب پروفور *Tohgo* به دلیل همکاری صمیمانه‌شان در انجام آزمایشات تجربی و نیز راهنمایی‌های ارزشمندشان قدردانی می‌نمایم.

از آقای دکتر نوید به خاطر مشاوره این پایان‌نامه و از جناب آقای دکتر وکیلی به دلیل آنکه همواره مشوق اینجانب در انجام هر چه بهتر این پایان‌نامه بوده‌اند سپاسگزار می‌نمایم.

نهایت تشکر و قدردانی را از کارشناسان محترم کارگاه جویندگی، آزمایشگاه مقاومت مصالح و آزمایشگاه عملیات حرارتی، آقایان ایرانیان، کریمانی و الماسی، که در تهیه نمونه‌ها و انجام تست‌های تجربی به اینجانب کمک نموده‌اند دارم.

در انتها از کلیه دوستان و آشنایان که به هر نحوی مراد انجام این پایان‌نامه یاری رسانده‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

نام خانوادگی دانشجو: حسنی فرد	نام: سوران
عنوان پایان نامه: تأثیر تنش‌های باقیمانده روی عمر خستگی اتصالات نقطه جوش	
استاد راهنما: دکتر محمد زهساز	
استاد مشاور: دکتر تاج بخش نوید چاخارلو	
مقطع تحصیلی: دکتری	رشته: مهندسی مکانیک
گرایش: طراحی کاربردی	مکانیک
مقطع تحصیلی: دکتری	گرایش: طراحی کاربردی
دانشکده: فنی مهندسی مکانیک	تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۸۷/۸/۲۳
تعداد صفحات: ۱۲۸	مکانیک
کلید واژه‌ها: جوش مقاومتی نقطه‌ای، خستگی، عمر آغاز ترک خستگی، مکانیزم شکست، تنش پسماند، تنش میانگین، روش عمر- کرنش.	
<b>چکیده:</b>	
<p>هدف اصلی از انجام این پایان‌نامه، بررسی اثر تنش‌های پسماند و فاصله ایجاد شده بین صفحات اتصال -به عنوان مهمترین اثرات ناشی از فرآیند جوش مقاومتی نقطه‌ای- روی استحکام خستگی اتصالات نقطه جوش می‌باشد. به همین منظور ابتدا با استفاده از روش المان محدود، میدان درجه حرارت در اطراف نقطه جوش با استفاده از مدل Axi-symmetric الکترودها و صفحات اتصال بدست آمده است. با استفاده از این میدان درجه حرارت، تنش‌های پسماند محاسبه شده و علاوه بر آن، شکل ناگت و ناحیه ذوب شده مشخص و در مرحله بعدی قطر ناگت و فواصل ایجاد شده بین صفحات اتصال بدست آمده‌اند. برای ارزیابی و تخمین عمر خستگی اتصالات نقطه جوش، مدل‌های سه بعدی اتصالات مورد نظر که از جنس آلیاژ آلومینیوم 5083-O می‌باشند، ایجاد شده و آنالیز غیر خطی جهت بدست آوردن مقادیر تنش و کرنش در اطراف نقطه جوش با استفاده از نرم افزار ANSYS انجام شده است. سپس از روش عمر-کرنش برای بدست آوردن عمر خستگی اتصالات مورد نظر استفاده شده و تنش‌های پسماند بدست آمده از تحلیل عددی گذرا به عنوان یک تنش میانگین اضافی در نظر گرفته شده و در نهایت عمر خستگی اتصال، یک بار با احتساب اثرات تنش پسماند و یک بار بدون در نظر گرفتن این اثرات، با همدیگر مقایسه شده است.</p> <p>اثرات نیروی الکترود روی ابعاد هندسی نقطه جوش و نیز فاصله ایجاد شده بین صفحات اتصال، استحکام استاتیکی و خستگی، سختی و ریز ساختار نواحی مختلف اتصال از جمله ناحیه ذوب شده، ناحیه حرارت دیده و فلز پایه بررسی شده است. سه سطح بار مختلف <math>2500\text{N}</math>، <math>3000\text{N}</math> و <math>3500\text{N}</math> برای نیروی الکترود مد نظر قرار گرفته در حالیکه زمان جوش و مقدار جریان الکتریکی در طول فرآیند جوش مقاومتی نقطه‌ای ثابت فرض شده است. نتایج مربوط به این قسمت نشان داده است که افزایش نیروی الکترود از <math>2500\text{N}</math> به <math>3000\text{N}</math> تأثیر چندانی روی اندازه قطر ناگت و استحکام خستگی نمونه‌ها نداشته است، در حالیکه افزایش نیروی الکترود از <math>3000\text{N}</math> به <math>3500\text{N}</math> علیرغم کاهش در قطر نقطه جوش باعث افزایش چشمگیر عمر خستگی اتصالات شده است. نتایج همچنین نشان داده است که افزایش نیروی الکترود باعث افزایش عمر</p>	

مربوط به آغاز ترک خستگی اتصالات نقطه جوش می شود.

در بخش دیگری از این پایان نامه، اثر تنش میانگین روی حد خستگی و عمر مربوط به آغاز ترک خستگی مواد با استحکام نهایی متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور روش عمر-کرنش برای تخمین عمر آغاز ترک خستگی دو نوع اتصال کششی و برشی نقطه جوش از جنس فولادهای Mild Steel JSC270D و Ultra-High Strength Steel JSC980Y مورد استفاده قرار گرفته است. اتصالات مذکور توسط مدل‌های سه بعدی المان محدود شبیه‌سازی شده و پس از بدست آوردن مقادیر تنش موضعی و محدوده کرنش، رابطه Morrow برای تخمین عمر آغاز ترک خستگی اتصالات مورد نظر استفاده شده است. نتایج این تحلیل با داده‌های تست تجربی مربوط به مشاهده رشد ترک مقایسه شده است. همچنین در مورد اختلاف حد خستگی نمونه‌های صاف و نیز اتصالات نقطه جوش برای مواد مورد نظر بحث کاملی ارائه گردیده است. نتایج نشان داده است که مقادیر تنش میانگین در فولاد JSC980Y می تواند حد خستگی اتصالات نقطه جوش را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. دلیل این امر آنست که حتی در نسبت بارهای پایین، تنش‌ها در ریشه نقطه جوش از حد تسلیم می‌گذرند، این در حالی است که مقادیر تنش میانگین در فولاد JSC270D برای نسبت بار مشابه بسیار کمتر از مقدار متناظر آن در فولاد JSC980Y می‌باشد. مقایسه بین تخمین‌های عددی مربوط به عمر آغاز ترک خستگی و داده‌های تست تجربی نشان داده است که تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد. نتایج همچنین نشان داده است که در بعضی از حالات، بسته به نوع اتصال، عمر مربوط به آغاز ترک خستگی می تواند بخش مهمی از عمر نهایی خستگی را به خود اختصاص دهد.

در اتصالاتی با بیش از یک عدد نقطه جوش، نحوه چیدمان نقطه جوش‌ها در اتصال مورد نظر، پارامتر مؤثری در بررسی استحکام استاتیکی و خستگی اتصال می باشد. به منظور بررسی این پارامتر، اتصالاتی که دارای چهار عدد نقطه جوش بوده و با سه نوع چیدمان مختلف عرضی، طولی و دو ردیفه را در نظر گرفته و استحکام مکانیکی آنها بطور تجربی مورد بررسی قرار گرفته و یک تحلیل تنش نیز برای بررسی و مطالعه اختلاف‌های موجود در استحکام‌های اتصالات مورد نظر انجام شده است.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۴	۱- فصل اول: بررسی منابع و پیشینه پژوهش
۵	۱-۱- مقدمه
۱۰	۱-۲- مبانی تئوری
۱۰	۱-۲-۱- روش عمر خستگی بر پایه تنش
۱۲	۱-۲-۱-۱- تنش سازه‌ای اسمی در صفحات اتصال
۱۴	۱-۲-۱-۲- تنش سازه‌ای اسمی در ناگت
۱۵	۱-۲-۲- روش عمر خستگی بر پایه کرنش
۱۵	۱-۲-۲-۱- رابطه بهبود یافته مارو (Morrow)
۱۶	۱-۲-۲-۲- پارامتر اسمیت-واتسون-تاپر (SWT)
۱۷	۱-۳- روش مکانیک شکست
۱۸	۱-۴- روش انرژی
۲۱	۱-۳- مدلسازی اتصالات نقطه جوش به روش المان محدود
۲۲	۱-۴- بررسی پارامترهای مؤثر در عمر خستگی
۲۳	۱-۴-۱- فاصله بین صفحات اتصال
۲۳	۱-۴-۲- تنش پسماند
۲۴	۱-۵- پیشینه پژوهش در مورد روش‌های خستگی و تنش پسماند

- ۳۴-۶-۱- جمع بندی کلی منابع و بررسی مسائلی که هنوز جای تحقیق دارند.....
- ۳۵-۷- اهداف تحقیق حاضر.....
- ۳۵-۱-۷-۱- تحلیل الکتریکی-حرارتی.....
- ۳۶-۲-۷-۱- تحلیل حرارتی-مکانیکی.....
- ۳۶-۳-۷-۱- تحلیل خستگی و تست‌های تجربی مربوطه.....

## ۲- فصل دوم: اثرات تنش‌های پسماند و فواصل بین صفحات روی استحکام مکانیکی اتصالات

- ۳۹- نقطه جوش.....
- ۴۰-۱-۲- مقدمه.....
- ۴۱-۲-۲- مواد و نمونه‌ها.....
- ۴۲-۳-۲- آماده سازی نمونه‌ها و بررسی اثر نیروی الکتروود روی شکل گیری نقطه جوش.....
- ۴۳-۴-۲- تست‌های تجربی.....
- ۴۳-۱-۴-۲- تست کشش.....
- ۴۳-۲-۴-۲- تست خستگی.....
- ۴۴-۳-۴-۲- ریز ساختارها و سختی سنجی.....
- ۴۵-۵-۲- نتایج تجربی.....
- ۴۵-۱-۵-۲- نتایج تست کشش.....
- ۴۷-۲-۵-۲- نتایج تست خستگی.....
- ۴۸-۳-۵-۲- مودهای شکست.....
- ۴۹-۴-۵-۲- مکانیزم رشد ترک خستگی.....
- ۵۲-۵-۵-۲- مشاهده ریز ساختارها.....



۵۵	۶-۵-۲- نتایج سختی سنجی
۵۶	۶-۲- تحلیل عددی حالت گذرا
۵۹	۱-۶-۲- تحلیل مقاومت الکتریکی
۵۹	۲-۶-۲- مؤلفه‌های مقاومت الکتریکی
۶۱	۳-۶-۲- محاسبه مقاومت الکتریکی
۶۱	۴-۶-۲- مقاومت استاتیکی
۶۲	۵-۶-۲- مقاومت دینامیکی
۶۲	۶-۶-۲- محاسبه مقاومت الکتریکی تماسی بصورت تئوری
۶۳	۷-۶-۲- مقاومت حرارتی تماسی (Thermal Contact Resistance)
۶۵	۸-۶-۲- نتایج تحلیل عددی گذرا
۷۰	۷-۲- شارش گرما در جوش مقاومتی نقطه‌ای
۷۳	۸-۲- تحلیل عددی حالت پایدار برای بدست آوردن عمر خستگی اتصالات
۷۴	۱-۸-۲- تحلیل المان محدود
۷۶	۲-۸-۲- نتایج تخمین عمر خستگی و مقایسه با نتایج تجربی
۷۸	۹-۲- بحث و نتیجه‌گیری

### ۳- فصل سوم: بررسی اثر تنش میانگین روی عمر مربوط به آغاز ترک خستگی و حد خستگی

۸۱	اتصالاتی از جنس موادی با استحکام‌های نهایی متفاوت
۸۲	۱-۳- مقدمه
۸۳	۲-۳- مواد و نمونه‌ها
۸۵	۳-۳- روش عمر-کرنش

۳-۴- آزمایش‌های تجربی.....	۸۹
۳-۵- تحلیل المان محدود.....	۹۵
۳-۶- نتایج تحلیل المان محدود.....	۹۸
۳-۷- بحث و نتیجه‌گیری.....	۱۰۲
۴- فصل چهارم: اثر چیدمان نقطه جوش‌ها در اتصالاتی با چهار عدد نقطه جوش.....	۱۰۴
۴-۱- مقدمه.....	۱۰۵
۴-۲- خصوصیات مواد.....	۱۰۶
۴-۳- استحکام کششی اتصالات نقطه جوش چهارتایی.....	۱۰۶
۴-۴- تست خستگی.....	۱۰۸
۴-۵- تحلیل تنش.....	۱۰۹
۴-۶- مکانیزم شکست خستگی.....	۱۱۲
۴-۷- بحث و نتیجه‌گیری.....	۱۱۵
۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری کلی و پیشنهاد برای کارهای آینده.....	۱۱۷
۵-۱- نتیجه‌گیری کلی.....	۱۱۸
۵-۲- پیشنهاد برای کارهای آینده.....	۱۲۴
مراجع:	۱۲۵

ضمیمه: لیست مقالات مستخرج از پایان‌نامه

چکیده انگلیسی

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- پارامترهای جوش و روش تشکیل ناگت ..... ۶
- شکل ۲-۱- جوش مقاومتی نقطه‌ای با جریان الکتریکی بیش از حد معمول ..... ۷
- شکل ۳-۱- جوش مقاومتی نقطه‌ای با نیروی الکتروود بیش از حد معمول ..... ۸
- شکل ۴-۱- مدل هسته صلب برای تنش‌های سازه‌ای صفحات ..... ۱۲
- شکل ۵-۱- منحنی عمر-انرژی برای بارگذاری کششی خالص و پارامترهای متناظر بر پایه روش انرژی ۲۰ ..... ۲۰
- شکل ۶-۱- مقایسه نتایج عمر خستگی حاصل از روش Sines با داده‌های تجربی برای نمونه‌های سه‌لایه نقطه جوش از جنس فولاد SHCP40 برای صفحه وسطی و فولادهای SAPH45 و SHCP40 برای صفحات کناری ..... ۲۵
- شکل ۷-۱- خصوصیات نیروی فورجینگ ..... ۳۱
- شکل ۱-۲- هندسه اتصال نقطه جوش کششی-برشی ..... ۴۱
- شکل ۲-۲- سطح مقطع اتصال نقطه جوش به همراه ویژگی‌های آن ..... ۴۲
- شکل ۳-۲- نمودار نیرو-تغییر طول و بار شکست استاتیکی ماکزیمم برای اتصال نقطه جوش نوع A ..... ۴۵
- شکل ۴-۲- نمودار نیرو-تغییر طول و بار شکست استاتیکی ماکزیمم برای اتصال نقطه جوش نوع B ..... ۴۵
- شکل ۵-۲- نمودار نیرو-تغییر طول و بار شکست استاتیکی ماکزیمم برای اتصال نقطه جوش نوع C ..... ۴۶
- شکل ۶-۲- نمودار محدوده تنش بر حسب تعداد تناوب‌های خستگی برای هر سه نوع اتصال A، B و C ..... ۴۷

- شکل ۷-۲- مکانیزم شکست خستگی اتصالات نقطه جوش از نوع A ..... ۴۹
- شکل ۸-۲- ترک‌های خستگی در سطح بار ۴۰٪ بار نهایی برای اتصالات نوع A، B و C ..... ۴۹
- شکل ۹-۲- شماتیک رشد ترک‌های اولیه و ثانویه در سطوح بار متوسط و پایین ..... ۵۰
- شکل ۱۰-۲- نسبت عمق ترک‌های اندازه‌گیری شده به ضخامت صفحات اتصال (a/t) بر حسب نسبت عمر به عمر نهایی اتصال ( $N/N_f$ ) ..... ۵۱
- شکل ۱۱-۲- ریز ساختار نواحی مختلف نقطه جوش برای اتصال نوع A ..... ۵۲
- شکل ۱۲-۲- جزئیات ساختارهای نواحی مختلف نقطه جوش ..... ۵۴
- شکل ۱۳-۲- توزیع مقدار سختی از مرکز ناگت به سمت فلز پایه برای اتصال نوع A ..... ۵۵
- شکل ۱۴-۲- توزیع مقدار سختی از مرکز ناگت به سمت فلز پایه برای اتصال نوع B ..... ۵۵
- شکل ۱۵-۲- توزیع مقدار سختی از مرکز ناگت به سمت فلز پایه برای اتصال نوع C ..... ۵۶
- شکل ۱۶-۲- مدل سخت‌شوندگی کرنشی ایزوتروپیک دو خطی آلیاژ آلومینیوم 5083-O در دماهای مختلف ..... ۵۷
- شکل ۱۷-۲- فلوچارت کوپل تحلیل‌های الکتریکی-حرارتی، حرارتی-مکانیکی، گذرا-پایدار و خستگی ..... ۵۷
- شکل ۱۸-۲- مدل مش بندی شده تقارن محوری صفحات اتصال و الکترودها به همراه شرایط مرزی ..... ۵۸
- شکل ۱۹-۲- مدار یک دستگاه جوش مقاومتی نقطه‌ای ..... ۵۹
- شکل ۲۰-۲- مقاومت‌های مؤثر در شکل‌گیری یک جوش مقاومتی نقطه‌ای (مقاومت الکترودها، فلز صفحات و مقاومت تماسی) ..... ۶۰
- شکل ۲۱-۲- تصویر بزرگ شده سطح تماس بین دو جامد ..... ۶۳

- شکل ۲-۲۲- اثرات فشار سطح، درجه حرارت تماس و زبری روی هدایت حرارتی سطح تماس..... ۶۴
- شکل ۲-۲۳- توزیع درجه حرارت در صفحه اتصال و الکتروود در انتهای سیکل جوش..... ۶۵
- شکل ۲-۲۴- مقایسه ناگت تشکیل شده به روش المان محدود با یک عکس تهیه شده از سطح مقطع یک اتصال نقطه جوش از نوع A در شرایط یکسان..... ۶۶
- شکل ۲-۲۵- توزیع درجه حرارت گذرا در مرکز ناگت تا انتهای سیکل خنک‌کاری..... ۶۷
- شکل ۲-۲۶- پروفیل تنش پسماند در راستای طولی در الکتروود و صفحه بالایی اتصال برای اتصال از نوع A..... ۶۷
- شکل ۲-۲۷- پروفیل تنش پسماند در راستای طولی در الکتروود و صفحه بالایی اتصال برای اتصال از نوع B..... ۶۷
- شکل ۲-۲۸- پروفیل تنش پسماند در راستای طولی در الکتروود و صفحه بالایی اتصال برای اتصال از نوع C..... ۶۸
- شکل ۲-۲۹- توزیع تنش پسماند کششی در راستای طولی صفحات اتصال برای سه نوع اتصال A، B و C..... ۶۸
- شکل ۲-۳۰- توزیع تنش پسماند پس از پایان هرکدام از سیکل‌های جوش نقطه‌ای برای اتصال نوع A..... ۶۹
- شکل ۲-۳۱- توزیع تنش پسماند پس از پایان هرکدام از سیکل‌های جوش نقطه‌ای برای اتصال نوع B..... ۶۹
- شکل ۲-۳۲- توزیع تنش پسماند پس از پایان هرکدام از سیکل‌های جوش نقطه‌ای برای اتصال نوع C..... ۷۰
- شکل ۲-۳۳- مسأله ایده‌آل سازی شده مربوط به جوش مقاومتی نقطه‌ای برای بدست آوردن رابطه انتقال حرارت در مختصات کارترین..... ۷۱

- شکل ۲-۳۴- حل تجلیلی توزیع درجه حرارت از ابتدای سیکل جوش تا سیکل خنک کاری ..... ۷۲
- شکل ۲-۳۵- مدل مش بندی شده یک اتصال نقطه جوش ..... ۷۵
- شکل ۲-۳۶- نمودار محدوده تنش بر حسب عمر آغاز ترک خستگی بدست آمده از تحلیل عددی برای اتصال نوع A، با و بدون احتساب تنش پسماند ..... ۷۷
- شکل ۲-۳۷- نمودار محدوده تنش بر حسب عمر آغاز ترک خستگی بدست آمده از تحلیل عددی برای اتصال نوع B، با و بدون احتساب تنش پسماند ..... ۷۷
- شکل ۲-۳۸- نمودار محدوده تنش بر حسب عمر آغاز ترک خستگی بدست آمده از تحلیل عددی برای اتصال نوع C، با و بدون احتساب تنش پسماند ..... ۷۷
- شکل ۲-۳۹- مقایسه عمر آغاز ترک خستگی برای سه نوع اتصال A، B و C بدون احتساب تنش پسماند ..... ۷۸
- شکل ۲-۴۰- مقایسه عمر آغاز ترک خستگی برای سه نوع اتصال A، B و C با احتساب تنش پسماند ..... ۷۸
- شکل ۳-۱- منحنی تنش- کرنش حقیقی دو فولاد JSC270D و JSC980Y ..... ۸۴
- شکل ۳-۲- هندسه دو نوع نمونه برشی و کششی اتصالات نقطه جوش ..... ۸۴
- شکل ۳-۳- نمودار تجربی محدوده تنش بر حسب تناوب های خستگی تا شکست برای نمونه های صاف فولادهای JSC270D و JSC980Y ..... ۸۵
- شکل ۳-۴- فلوچارت بدست آوردن عمر آغاز ترک خستگی ..... ۸۶
- شکل ۳-۵- نمودار دامنه کرنش الاستیک بر حسب تناوب های خستگی تا شکست برای نمونه های صاف فولادهای JSC270D و JSC980Y ..... ۸۷

- شکل ۳-۶- نمودار تنش حقیقی- کرنش پلاستیک حقیقی برای فولاد JSC980Y ..... ۸۸
- شکل ۳-۷- نمودار تنش حقیقی- کرنش پلاستیک حقیقی برای فولاد JSC270D ..... ۸۸
- شکل ۳-۸- نمودار محدوده تنش بر حسب تعداد تناوب‌های خستگی تا شکست برای اتصالات برشی و کششی فولادهای JSC980Y و JSC270D ..... ۸۹
- شکل ۳-۹- رشد ترک خستگی در مرکز سطح مقطع نمونه‌های برشی و کششی اتصالات نقطه جوش ..... ۹۱
- شکل ۳-۱۰- توقف تست خستگی نمونه‌های برشی در سطوح بار ۲۰٪ و ۴۰٪ بارهای نهایی برای فولاد JSC980Y و سطوح بار ۳۰٪ و ۴۰٪ بارهای نهایی برای فولاد JSC270D ..... ۹۱
- شکل ۳-۱۱- توقف تست خستگی نمونه‌های کششی در سطح بار ۲۰٪ بار نهایی برای فولاد JSC980Y و سطح بار ۷۵٪ بار نهایی برای فولاد JSC270D ..... ۹۲
- شکل ۳-۱۲- نمودار نسبت عمق ترک به ضخامت صفحات اتصال برحسب مقادیر  $N/N_r$  برای نمونه‌های برشی ..... ۹۲
- شکل ۳-۱۳- نمودار نسبت عمق ترک به ضخامت صفحات اتصال برحسب مقادیر  $N/N_r$  برای نمونه‌های کششی ..... ۹۳
- شکل ۳-۱۴- شکست از نوع پارگی نقطه جوش اتصال برشی برای فولاد نرم JSC270D ..... ۹۳
- شکل ۳-۱۵- شکست از نوع پارگی نقطه جوش اتصال برشی برای فولاد با استحکام بالا JSC980Y ..... ۹۴
- شکل ۳-۱۶- شکست از صفحه برای اتصالات نقطه جوش کششی ..... ۹۵
- شکل ۳-۱۷- مدل‌های المان محدود نمونه‌های برشی و کششی اتصالات نقطه جوش ..... ۹۶

- شکل ۳-۱۸- پروفیل و توزیع کرنش اصلی ماکزیمم در راستای خط منحنی ریشه نقطه جوش برای نمونه اتصال نقطه جوش کششی ( $\Delta\sigma = 100 \text{ MPa}$ ) ..... ۹۷
- شکل ۳-۱۹- نمودار تنش-کرنش موضعی معادل در نقطه آغاز ترک خستگی برای نمونه‌های برشی ..... ۹۸
- شکل ۳-۲۰- نمودار تنش-کرنش موضعی معادل در نقطه آغاز ترک خستگی برای نمونه‌های کششی ..... ۹۸
- شکل ۳-۲۱- تخمین عمر آغاز ترک خستگی به روش عددی برای نمونه‌های برشی ..... ۹۹
- شکل ۳-۲۲- تخمین عمر آغاز ترک خستگی به روش عددی برای نمونه‌های کششی ..... ۹۹
- شکل ۳-۲۳- اثر تنش میانگین روی عمر مربوط به آغاز ترک خستگی برای نمونه‌های نقطه‌جوش برشی به روش عددی برای فولاد با استحکام بالا JSC980Y ..... ۱۰۰
- شکل ۳-۲۴- اثر تنش میانگین روی عمر مربوط به آغاز ترک خستگی برای نمونه‌های نقطه‌جوش برشی به روش عددی برای فولاد نرم JSC270D ..... ۱۰۱
- شکل ۳-۲۵- اثر تنش میانگین روی عمر مربوط به آغاز ترک خستگی برای نمونه‌های نقطه‌جوش کششی به روش عددی برای فولاد با استحکام بالا JSC980Y ..... ۱۰۱
- شکل ۳-۲۶- اثر تنش میانگین روی عمر مربوط به آغاز ترک خستگی برای نمونه‌های نقطه‌جوش کششی به روش عددی برای فولاد نرم JSC270D ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱- اتصالات نقطه جوش چهارتایی؛ الف) اتصال دوردیفه، ب) اتصال عرضی، ج) اتصال طولی ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۲- نمودار تنش-کرنش مهندسی فولاد کم کربن ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۳- نمودار تنش-کرنش برای اتصال نقطه جوش طولی ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۴- نمودار تنش-کرنش برای اتصال نقطه جوش عرضی ..... ۱۰۷



- شکل ۴-۵- نمودار تنش- کرنش برای اتصال نقطه جوش دو ردیفه..... ۱۰۷
- شکل ۴-۶- شکست استاتیکی اتصال نقطه جوش نوع طولی..... ۱۰۸
- شکل ۴-۷- شکست استاتیکی اتصال نقطه جوش نوع عرضی..... ۱۰۸
- شکل ۴-۸- شکست استاتیکی اتصال نقطه جوش نوع دو ردیفه..... ۱۰۸
- شکل ۴-۹- نمودار تعداد تناوب‌های خستگی تا شکست بر حسب نیروی ماکزیمم برای هر سه نوع اتصال طولی، عرضی و دو ردیفه ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۱۰- مدل مش‌بندی شده اتصال نقطه جوش طولی... ۱۱۰
- شکل ۴-۱۱- مدل مش‌بندی شده اتصال نقطه جوش دوردیفه..... ۱۱۰
- شکل ۴-۱۲- مدل مش‌بندی شده اتصال نقطه جوش عرضی..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۳- پروفیل تنش اصلی ماکزیمم برای اتصال نقطه جوش طولی..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۴- پروفیل تنش اصلی ماکزیمم برای اتصال نقطه جوش دو ردیفه..... ۱۱۲
- شکل ۴-۱۵- پروفیل تنش اصلی ماکزیمم برای اتصال نقطه جوش عرضی..... ۱۱۲
- شکل ۴-۱۶- شکست از نوع پارگی نقطه جوش در تنش  $104/7\text{MPa}$  برای اتصال نقطه جوش عرضی (سیکل  $N=32045$ )..... ۱۱۳
- شکل ۴-۱۷- شکست از نوع پارگی نقطه جوش در تنش  $209/4\text{MPa}$  برای اتصال نقطه جوش عرضی (سیکل  $N=540$ )..... ۱۱۳
- شکل ۴-۱۸- شکست ورق در راستای ضخامت صفحات اتصال در تنش  $62/8\text{MPa}$  برای اتصال نقطه جوش عرضی (سیکل  $N=814811$ )..... ۱۱۳

- شکل ۴-۱۹- شکست نقطه جوش در راستای سطح مشترک صفحات اتصال در تنش  $125/6 \text{MPa}$  برای اتصال نقطه جوش طولی (سیکل  $N=28703$ )..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۰- شکست نقطه جوش در راستای سطح مشترک صفحات اتصال در تنش  $146/5 \text{MPa}$  برای اتصال نقطه جوش طولی (سیکل  $N=9260$ )..... ۱۱۴
- شکل ۴-۲۱- شکست ورق در راستای ضخامت صفحات اتصال در تنش  $62/8 \text{MPa}$  برای اتصال نقطه جوش طولی (سیکل  $N=145426$ )..... ۱۱۴
- شکل ۴-۲۲- شکست نقطه جوش در راستای سطح مشترک صفحات اتصال در تنش  $146/5 \text{MPa}$  برای اتصال نقطه جوش دو ردیفه (سیکل  $N=37109$ )..... ۱۱۴
- شکل ۴-۲۳- شکست ورق در راستای ضخامت صفحات اتصال در تنش  $62/8 \text{MPa}$  برای اتصال نقطه جوش دوردیفه (سیکل  $N=857037$ )..... ۱۱۴

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱- مشخصات تست‌های تجربی اتصالات نقطه جوش از جنس آلیاژ آلومینیوم 5083-O..... ۳۷
- جدول ۲-۱- مشخصات تست‌های تجربی اتصالات نقطه جوش از جنس فولاد کم کربن..... ۳۷
- جدول ۳-۱- مشخصات تست‌های تجربی اتصالات نقطه جوش از جنس فولاد با استحکام بالا (JSC980Y) و فولاد نرم (JSC270D)..... ۳۸
- جدول ۱-۲- ترکیبات شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 5083-O..... ۴۱
- جدول ۲-۲- خصوصیات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 5083-O..... ۴۱

- جدول ۲-۳- خصوصیات فیزیکی آلیاژ آلومینیوم 5083-O ..... ۴۱
- جدول ۲-۴- قطر ناگت و فاصله بین صفحات برای هر سه نوع اتصال A، B و C ..... ۴۳
- جدول ۲-۵- نتایج تجربی مربوط به عمر آغاز ترک خستگی برای هر سه نوع اتصال A، B و C ..... ۵۱
- جدول ۲-۶- مقادیر عددی نسبت مقدار سطوح تخلخل به سطوح نواحی ذوب شده برای هر سه نوع اتصال A، B و C ..... ۵۴
- جدول ۲-۷- مقادیر عددی مقاومت الکترودها، صفحات فلز آلومینیومی و مقاومت‌های تماسی ..... ۶۳
- جدول ۲-۸- مقایسه نتایج تجربی و المان محدود مربوط به ابعاد نقطه جوش (قطرناگت و فاصله بین صفحات) برای هر سه نوع اتصال A، B و C ..... ۶۶
- جدول ۲-۹- پارامترهای خستگی برای آلیاژ آلومینیوم 5083-O از قانون ماده یکنواخت ..... ۷۴
- جدول ۲-۱۰- نتایج عددی تنش میانگین و محدوده کرنش برای سه نوع اتصال A، B و C ..... ۷۵
- جدول ۲-۱۱- مقایسه نتایج تجربی و عددی عمر آغاز ترک خستگی برای هر سه نوع اتصال A، B و C ..... ۷۶
- جدول ۳-۱- ترکیبات شیمیایی دو فولاد JSC270D و JSC980Y ..... ۸۳
- جدول ۳-۲- خصوصیات مکانیکی دو فولاد JSC270D و JSC980Y ..... ۸۳
- جدول ۳-۳- پارامترهای خستگی برای دو فولاد JSC270D و JSC980Y ..... ۸۷
- جدول ۳-۴- مقایسه نتایج بین روش عمر-کرنش (عددی) و مشاهده تجربی رشد و انتشار ترک خستگی ..... ۱۰۰
- جدول ۴-۱- خصوصیات مکانیکی فولاد کم‌کربن برای ایجاد اتصالات طولی، دو ردیفه و عرضی ..... ۱۰۶

## مقدمه

از جوش مقاومتی نقطه‌ای<sup>۱</sup> برای اتصال دائمی صفحات در اکثر صنایع، بخصوص در صنعت خودروسازی و همچنین در مقیاس کوچک در بیشتر وسایل الکترونیکی، به دلیل داشتن قابلیت‌های انعطاف‌پذیری، سرعت زیاد پروسه جوش، کیفیت بالای اتصال و همچنین هزینه کم، بطور وسیعی استفاده می‌شود. جنس ورق‌های اتصالی بسته به نوع کاربرد می‌تواند آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای فولاد و یا در برخی موارد صفحات غیر همجنس باشند [۱].

موادی که برای اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای مناسب می‌باشند را می‌توان برطبق یک دسته بندی کلی به مواد آهنی و مواد غیرآهنی تقسیم کرد. خصوصیات فیزیکی مواد آهنی نظیر فولاد کم کربن در برابر کاهش ناگهانی درجه حرارت که معمولاً در انتهای "زمان جوش" اتفاق می‌افتد، تغییر چندانی نمی‌کند. ایجاد جوش مقاومتی نقطه‌ای در مواد غیرآهنی معمولاً به دلیل داشتن محدوده پایین ناحیه پلاستیک، مقاومت الکتریکی پایین و هدایت حرارتی بالا، مشکل‌تر از مواد آهنی می‌باشد. همچنین برای مواد غیرآهنی در مورد ضخامت یکسان صفحات اتصال، معمولاً زمان جوش کمتر و جریان الکتریکی بیشتر در مقایسه با مواد آهنی مورد نیاز می‌باشد. این مسأله باعث ایجاد انقباض و انقباض سریع ماده بین الکترودها شده و لذا نیروی الکتروود بیشتری برای جوش مورد نیاز می‌باشد.

در ارزیابی عمر خستگی اتصالات نقطه جوش پارامترهای بسیاری مؤثر می‌باشند که از آن جمله می‌توان به تنش‌های پسماند<sup>۲</sup>، اثر تنش میانگین، فواصل ایجاد شده بین صفحات اتصال، قطر نقطه جوش‌ها و ابعاد صفحات اتصالی، جنس صفحات، نوع بارگذاری تناوبی و غیره اشاره کرد.

در بررسی رفتار جوش‌ها در حالت کلی و نقطه جوش‌ها در حالت خاص، می‌توان دو نوع تجزیه و تحلیل گذرا و پایا را مطرح نمود. تجزیه و تحلیل گذرا مربوط به مرحله شروع فرآیند جوش تا انتهای آن، شکل‌گیری جوش، ایجاد تنش‌های پسماند و در کل تمامی پارامترهایی که به زمان بستگی دارند، می‌شود. این تجزیه و تحلیل در مورد اتصالات نقطه جوش، شامل مراحل اعمال نیروی مکانیکی ناشی

1- Resistance Spot Welding (RSW)

2- Residual Stresses