

به نام خداوند بخشنده و مهربان

۱۴۲۴



دانشگاه شهردرعی

دانشکده: مهندسی

گروه: مکانیک

پایان نامه:

برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک

عنوان:

تأثیر تنش های پسماند اتفاقی بر عمر خستگی اتصالات جوش

استادان راهنما:

دکتر غلامحسین مجذوبی (استاد دانشگاه بوعلی سینا)

دکتر غلامحسین فرهی (استاد دانشگاه صنعتی شریف)

استاد راهنما
تسبیحی

پژوهشگر:

عباس فدائی

۱۳۸۸/۱۰/۲

دیماه ۱۳۸۷

۱۲۸۶۷۱



دانشگاه شاهرود
دانشکده مهندسی

بیتالی

تاریخ
شماره
پوست

گواهی تصویب پایان نامه

موضوع پایان نامه: تاثیر تنش بر ساند آنتاچی روی عمر خستگی صفحات فولاد سرد

بدینوسیله گواهی می شود جلسه دفاعیه پایان نامه خانم / آقای: غلامرضا محمدی در رشته: مهندسی مکانیک ورودی: ۸۰۰۰۰۰ نیمسال انتخابی: اول در روز: یکشنبه مورخ: ۱۳۸۷/۱۱/۲۹ ساعت: ۱۱:۳۰ تحت سرپرستی:
۱- استاد راهنما: جناب آقای / سرکار خانم: دکتر غلامرضا محمدی
۲- استاد مشاور: جناب آقای / سرکار خانم:

در محل کمیته تنظیفات برگزار گردید که پس از بررسی از طرف نامبردگان پایان نامه فوق با نمره ۷۰ و درجه خوب در تاریخ ۱۳۸۷/۱۰/۲۹ به تصویب رسید.

دکتر غلامرضا محمدی
۱۳۸۷/۱۰/۲۹

نام و نام خانوادگی و امضاء استاد راهنما: دکتر غلامرضا محمدی
نام و نام خانوادگی و امضاء استاد مشاور:
نام و نام خانوادگی و امضاء اساتید مدعو: ۱- دکتر غلامرضا محمدی
۲-
۳-
نام و نام خانوادگی و امضاء ناظر تحصیلات تکمیلی: دکتر غلامرضا محمدی
نام و نام خانوادگی مدیر گروه یا نماینده و امضاء: دکتر غلامرضا محمدی

مدیر گروه مهندسی:
نام و نام خانوادگی و امضاء:

.....

تقدیم به روح پدرم

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب پایان نامه در مجلات، کنفرانس ها و یا سخنرانی ها باید نام دانشگاه بوعلی سینا و نام دانشجو با ذکر ماخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

تقدیر و تشکر

در کار تدوین این پایان نامه مسیری پر پیچ و خم را طی کردم. اگر نبود عنایات الهی و همراهی اساتید بزرگوار، خانواده ام و دوستان عزیزم قطعاً به این امر موفق نمی شدم. بر خود واجب می دانم از کمک ها و راهنمایی های اساتید گرامی جناب آقای دکتر فرهی و جناب آقای دکتر مجذوبی کمال تشکر و قدردانی خود را ابراز دارم. همچنین از آقای مهندس وفائی در شرکت هیکو به جهت مساعدت وافر ایشان در تهیه نمونه های آزمایشی و آقایان مهندس نعمتی و مهندس رسولی کارشناسان آزمایشگاه مقاومت مصالح به جهت همراهی و کمک هایشان سپاسگزارم.

عباس فدائی

۱۳۸۷

عنوان پایان نامه: تاثیر تنش های پسماند اتفاقی بر عمر خستگی اتصالات جوش

اساتید راهنما: دکتر غلامحسین مجذوبی و دکتر غلامحسین فرهی

مقطع: دکتری رشته: مکانیک گرایش: خواص مکانیکی مواد دانشگاه: بوعلی سینا
 دانشکده: مهندسی تاریخ فارغ التحصیلی: ۲۹ دی ۱۳۸۷ تعداد صفحات: ۲۴۵

کلید واژه ها: جوشکاری MAG، تنش پسماند، روش سوراخ کاری، عمر خستگی، الگوریتم ژنتیک.

چکیده

جوشکاری فلزات با قوس گازی (MAG) یک فرآیند اتصال می باشد که در تعداد زیادی از سازه ها استفاده می شود. به دلیل حرارت موضعی فرآیند جوشکاری و سردکاری سریع بعد از آن، تنش های پسماند در خود جوش و در قطعه جوشکاری شده ایجاد می شوند. تنش های پسماند می توانند بر عمر خستگی قطعات جوشکاری شده تأثیر بگذارند. بنابراین، سنجش یا پیش بینی تنش های پسماند ضروری است. روش سوراخ کاری یکی از فنون تجربی است که به طور گسترده ای برای اندازه گیری تنش های پسماند مورد استفاده قرار می گیرد. به دلیل تاثیر نافذ عوامل متعدد روی طبیعت اتصالات جوش، رفتار خستگی ساختارهای جوشکاری شده پیچیده می باشد. معمولاً روش های قطعی برای تخمین قابلیت اطمینان ساختاری یا ایمنی استفاده می شوند. در این روش ها عواملی همچون استحکام خستگی، محدوده تنش و تنش های پسماند نوعاً بر اساس مقادیر متوسط سنجیده می شوند. در بعضی از صنایع، مقادیر استفاده شده برای

استحکام و محدوده تنش براساس بدترین شرایط انتخاب می شوند. این امر منجر به یک ارزیابی محتاطانه و غیر واقع بینانه از ایمنی می شود. معمولاً توزیع های آماری این عوامل در مدل های قطعی نادیده گرفته میشوند. در فن آوری جدید استفاده از روش های آماری در برنامه ریزی و تفسیر آزمایش های خستگی یک ضرورت است.

در این تحقیق، نمونه هایی از ورق های فولادی St-37 به ضخامت ۱۹ میلیمتر آماده شدند. با انجام عملیات فرزکاری و سنگ زنی ضخامت ورق ها به ۱۲/۵ میلیمتر تقلیل یافت. سپس یک ینخ V شکل استاندارد روی یک لبه از ورق ها ایجاد شد. با فرآیند جوشکاری استاندارد MAG دو ورق به صورت لب به لب جوشکاری شدند. جهت ارزیابی کیفی، جوش ها با استفاده از رادیوگرافی اریدیوم ۱۹۲ آزمون شدند. این آزمون ها نشان دادند که کلیه جوش ها مورد قبول می باشند. با استفاده از روش سوراخ کاری و در انطباق با استاندارد ASTM E837 تنش های پسماند جوشکاری روی ۲۰ نمونه اندازه گیری شدند. توزیع فراوانی تنش های پسماند، یک توزیع طبیعی با مقدار متوسط ۴۸/۷۵ مگاپاسکال را نشان داد. اثر بارگذاری متناوب روی رهائی تنش های پسماند جوشکاری جستجو شد. این تحقیق نشان داد که تنش پسماند بعد از ۱۵۰۰۰ سیکل به نصف کاهش یافته و مقدار آن بعد از ۳۵۰۰۰ سیکل به ۲۰٪ مقدار اولیه خود می رسد. آزمایش های خستگی محوری با کنترل بار جهت تعیین عمر خستگی نمونه ها مطابق استاندارد ASTM E466 انجام گردید. نتایج آزمایش ها نشان دادند که توزیع فراوانی نسبی عمر خستگی نمونه ها به خوبی توسط توزیع طبیعی گوسی تقریب زده می شود، در حالی که بیشترین فراوانی بین ۶۵۰۰۰ تا ۷۵۰۰۰ سیکل قرار داشت. روش های آماری- احتمالاتی جهت تحلیل نتایج استفاده شدند. تنش های پسماند اندازه گیری شده در ۲۰ نمونه نشان دادند که تنش پسماند جوشکاری یک کمیت اتفاقی بوده و اثر آن باید به روش های احتمالاتی مطالعه شود. اثرات رهائی تنش پسماند در مطالعه رشد ترک باید در نظر گرفته شود. مقادیر نرخ رشد ترک از آزمایش ها به دست آمدند. تصویربرداری از سطوح شکست در نمونه های آزمایشی نشان داد که هشت نمونه در مقطعی دچار

شکست شدند که ترک سطحی اولیه در آن ایجاد شده بود. رشد ترک در عرض و ضخامت نمونه ها برای این نوع شکست مشاهده گردید. دو نوع مکانیزم شکست شناسائی شد. در تعدادی از نمونه ها، ترک به صورت متقارن نسبت به صفحه میانی سطح شکست رشد نمود. در مابقی نمونه ها، ترک به صورت نامتقارن رشد کرد. الگوریتم ژنتیک برای پیش بینی مقدار تنش پسماند در قطعات چوشکاری شده با استفاده از مقادیر نرخ رشد ترک که از آزمایش ها به دست آمده بودند، انجام گرفت. نتایج نشان داد که با استفاده از مقادیر نرخ رشد ترک اندازه گیری شده و مدل الگوریتم ژنتیک، تنش های پسماند با تقریب خوبی می توانند تخمین زده شوند.

لغات کلیدی: چوشکاری MAG، تنش پسماند، روش سوراخ کاری، عمر خستگی، الگوریتم ژنتیک.

فهرست مطالب

<u>شماره صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	فصل اول: مقدمه
۷	فصل دوم: پیشینه پژوهش
۱۹	فصل سوم: تئوری ها
۲۰	۳-۱ آمار و احتمالات
۲۰	۳-۱-۱ مقدمه
۲۱	۳-۱-۲ تعریف پارامترهای آماری
۲۲	۳-۱-۳ احتمالات
۲۳	۳-۱-۴ تابع توزیع طبیعی
۲۸	۳-۱-۵ بازه های اطمینان
۳۳	۳-۲ خستگی
۳۳	۳-۲-۱ توصیف خستگی
۳۵	۳-۲-۲ تحلیل شروع ترک
۳۵	۳-۲-۳ تحلیل انتشار ترک
۳۶	۳-۲-۴ ضریب شدت تنش
۳۷	۳-۲-۵ سفتی شکست
۳۹	۳-۳ محاسبات انتشار ترک
۴۱	۳-۴ نواقص جوش
۴۳	۳-۵ تنش های پسماند

۴۸	۳-۶	مروری بر توزیع های تنش پسماند
۵۴	۳-۷	توزیع مجدد تنش پسماند
۵۶	۳-۸	مکانیک شکست احتمالاتی
۶۰	۳-۹	الگوریتم ژنتیک
۶۵		فصل چهارم: نتایج تحقیق
۶۵	۴-۱	شرح ماده و نمونه های آزمایشی
۷۱	۴-۲	اندازه گیری تنش پسماند
۷۳	۴-۳	رها سازی تنش پسماند
۷۴	۴-۴	آزمایش های خستگی
۸۰	۴-۵	تحلیل نرخ رشد ترک
۸۴	۴-۶	تحلیل احتمالاتی اثر تنش پسماند
۸۴	۴-۶-۱	مقدمه
۹۰	۴-۶-۲	روند محاسبه رشد ترک
۹۱	۴-۶-۳	محاسبه ضریب شدت تنش پسماند
۹۳	۴-۶-۴	محاسبه عمر خستگی
۹۸	۴-۶-۵	توزیع مجدد تنش پسماند
۱۰۴	۴-۷	تصویر برداری از سطوح شکست
۱۱۳	۴-۸	پیش بینی تنش پسماند توسط الگوریتم ژنتیک
۱۱۸		فصل پنجم: شبیه سازی اجزاء محدود
۱۱۸	۵-۱	مقدمه
۱۱۸	۵-۲	Marc Mentat 2007 r1 نرم افزار
۱۱۹	۵-۳	مدل

۱۲۳	۵-۴ مرحله اول جوش کاری
۱۵۸	۵-۵ مرحله دوم جوش کاری
۱۷۰	۵-۶ مرحله سوم جوش کاری
۱۸۳	۵-۷ مرحله چهارم جوش کاری
۱۹۶	۵-۸ مرحله پنجم جوش کاری
۲۰۹	بحث در مورد نتایج
۲۱۵	نتیجه گیری و پیشنهادها
۲۱۸	مراجع
۲۲۳	پیوست

فهرست اشکال

<u>شماره شکل</u>	<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
شکل (۱-۱)	تغییرپذیری در توزیع احتمالاتی برای تنش تسلیم در فولاد ۱۰۳۵	۳
شکل (۱-۲)	عدم قطعیت در قاعده ماینرز	۴
شکل (۱-۳)	تغییرپذیری توزیع تنش پسماند	۴
شکل (۳-۱)	نمایش تابع چگالی احتمالاتی طبیعی و تابع توزیع تجمعی آن	۲۴
شکل (۳-۲)	نمونه ای از علائم ساحلی در یک سطح شکست حاصل از خستگی	۳۳
شکل (۳-۳)	نمونه ای از منحنی های S-N	۳۵
شکل (۳-۴)	شکل های انتشار ترک	۳۶
شکل (۳-۵)	تغییرات سفتی شکست با درجه حرارت	۳۷
شکل (۳-۶)	تغییرات سفتی شکست با ضخامت نمونه	۳۸
شکل (۳-۷)	تغییرات ΔK_{th} بر حسب نسبت تنش، R، برای آلیاژهای آهنی	۳۹
شکل (۳-۸)	نمایش شماتیکی تنش های پسماند نوع I، II و III	۴۴
شکل (۳-۹)	(الف): دستگاه نمایشگر کرنش ها، (ب): نمای عمومی از دستگاه سوراخکاری جهت اندازه گیری تنش پسماند	۴۷

- شکل (۳-۱۰) توزیع های تنش پسماند عرضی در جوش لب به لب ۵۰
ورق گزارش شده توسط محققان مختلف
- شکل (۳-۱۱) توزیع های تنش پسماند طولی در جوش لب به لب ورق ۵۰
گزارش شده توسط محققان مختلف
- شکل (۳-۱۲) توزیع های تنش پسماند در اتصال درز جوش لوله ها ۵۱
- شکل (۳-۱۳) توزیع های تنش پسماند حلقه ای در اتصالات لب به لب ۵۱
محیطی لوله ها
- شکل (۳-۱۴) توزیع های تنش پسماند طولی در اتصالات جوش لب به ۵۲
لب محیطی لوله ها
- شکل (۳-۱۵) توزیع های تنش پسماند در جوش لب به لب T شکل ۵۲
- شکل (۳-۱۶) توزیع های تنش پسماند عرضی در جوش لوله به ورق ۵۳
- شکل (۳-۱۷) توزیع های تنش پسماند طولی در جوش لوله به ورق ۵۴
- شکل (۳-۱۸) هندسه نمونه آزمایشی ۵۵
- شکل (۳-۱۹) توزیع مجدد تنش پسماند به دلیل رشد ترک خستگی ۵۵
- شکل (۳-۲۰) نمونه ای از دیاگرام درختی نواقص در گسیختگی در ۵۸
قطعات جوشکاری شده
- شکل (۳-۲۱) محاسبه مقدار عدد π به روش مونت کارلو ۵۹
- شکل (۴-۱) جزئیات پنخ V شکل ۶۷
- شکل (۴-۲) نمایش شماتیک نمونه های آزمایشی ۶۸
- شکل (۴-۳) (الف): نمای عمومی یکی از نمونه های آزمایشی، (ب): ۶۹
نمای نزدیک از جوش، (ج): ۲۰ نمونه آزمایشی در کنار
یکدیگر

- شکل (۴-۴) (الف): نمایش شماتیک ترک سطحی مرکزی در لبه
 جوش، (ب): نمای نزدیک از ترک مصنوعی، (پ): نمای
 نزدیک دیگری برای ترک سطحی مرکزی ایجاد شده در
 نمونه های آزمایشی، (ت): الکتروود برنجی برای
 ماشینکاری EDM
- شکل (۴-۵) (الف): نمای دور از نمونه آزمایشی با کرنش سنج نصب
 شده روی آن، (ب): نمای نزدیک از کرنش سنج روزت
 نصب شده روی نمونه
- شکل (۴-۶) نمودار فراوانی نسبی برای حداکثر تنش پسماند
- شکل (۴-۷) مقایسه بین نمودار توزیع فراوانی تجمعی برای نتایج
 آزمایش و توزیع طبیعی
- شکل (۴-۸) رهاسازی در تنش پسماند بر حسب تعداد سیکل
 بارگذاری
- شکل (۴-۹) بارگذاری سینوسی اعمال شده در آزمایش های خستگی
- شکل (۴-۱۰) (الف): نمودار فراوانی نسبی عمر خستگی در نمونه های
 آزمایشی، (ب): مقایسه بین فراوانی تجمعی عمر
 خستگی نمونه های آزمایشی و توزیع طبیعی
- شکل (۴-۱۱) منحنی تغییرات da/dN بر حسب ΔK برای معادلات
 تئوری و اطلاعات آزمایش ها
- شکل (۴-۱۲) منحنی تغییرات da/dN بر حسب ΔK برای نمونه
 شماره ۸

۸۲	منحنی تغییرات da/dN بر حسب ΔK برای نمونه شماره ۹	شکل (۴-۱۳)
۸۳	منحنی تغییرات da/dN بر حسب ΔK برای نمونه شماره ۱۱	شکل (۴-۱۴)
۸۳	منحنی تغییرات da/dN بر حسب ΔK برای نمونه شماره ۱۲	شکل (۴-۱۵)
۸۴	منحنی تغییرات da/dN بر حسب ΔK برای نمونه شماره ۱۳	شکل (۴-۱۶)
۸۴	منحنی تغییرات da/dN بر حسب ΔK برای نمونه شماره ۱۴	شکل (۴-۱۷)
۸۵	منحنی تغییرات da/dN بر حسب ΔK برای نمونه شماره ۱۶	شکل (۴-۱۸)
۸۵	منحنی تغییرات da/dN بر حسب ΔK برای نمونه شماره ۱۷	شکل (۴-۱۹)
۸۹	ورق جوشکاری شده نامحدود با یک ترک میانی تحت اثر بار کششی یکنواخت	شکل (۴-۲۰)
۹۲	تغییرات K_r بر حسب نسبت $c = a/b$	شکل (۴-۲۱)
۹۴	توزیع احتمالاتی تجمعی برای عمر خستگی	شکل (۴-۲۲)
۹۵	توزیع عمر خستگی محاسبه شده	شکل (۴-۲۳)
۹۶	مقایسه بین توزیع عمر خستگی محاسبه شده و توزیع طبیعی	شکل (۴-۲۴)
۹۶	تغییرات متوسط عمر خستگی بر حسب متوسط حداکثر	شکل (۴-۲۵)

تنش پسماند

- شکل (۴-۲۶) تغییرات متوسط عمر خستگی بر حسب ضریب تغییرات
 ۹۷ حداکثر تنش پسماند
- شکل (۴-۲۷) تغییرات متوسط عمر خستگی بر حسب متوسط مقدار b
 ۹۷
- شکل (۴-۲۸) تغییرات متوسط عمر خستگی بر حسب مقدار ضریب
 ۹۸ تغییرات مربوط به b
- شکل (۴-۲۹) تابع توزیع تجمعی برای عمر خستگی با منظور شدن
 ۹۹ توزیع مجدد تنش پسماند
- شکل (۴-۳۰) تابع توزیع عمر خستگی با منظور شدن توزیع مجدد
 ۱۰۰ تنش پسماند
- شکل (۴-۳۱) مقایسه بین توزیع محاسبه شده برای عمر خستگی و
 ۱۰۰ توزیع طبیعی استاندارد
- شکل (۴-۳۲) تغییرات متوسط عمر خستگی با لحاظ شدن توزیع
 ۱۰۱ مجدد تنش پسماند بر حسب متوسط حداکثر تنش
 پسماند کششی
- شکل (۴-۳۳) تغییرات متوسط عمر خستگی با لحاظ شدن توزیع
 ۱۰۱ مجدد تنش پسماند بر حسب ضریب تغییرات حداکثر
 تنش پسماند کششی
- شکل (۴-۳۴) تغییرات متوسط عمر خستگی با لحاظ شدن توزیع
 ۱۰۲ مجدد تنش پسماند بر حسب متوسط b
- شکل (۴-۳۵) تغییرات متوسط عمر خستگی با توزیع مجدد تنش
 ۱۰۲ پسماند بر حسب COV مربوط به b

- شکل (۴-۳۶) تغییرات عمر خستگی بر حسب مقدار متوسط پارامتر β ۱۰۳
- شکل (۴-۳۷) تغییرات عمر خستگی بر حسب مقدار COV پارامتر β ۱۰۳
- شکل (۴-۳۸) (الف): دو تکه شکسته شده نمونه در کنار هم، (ب) و (پ): دو نما با بزرگنمایی متفاوت از مقطع یکی از تکه های نمونه آزمایشی شکسته شده، (ت): نمای دیگر با بزرگنمایی متفاوت از مقطع یکی از تکه های نمونه آزمایشی شکسته شده، (ث): علائم ساحلی بصورت قطاع های دایروی در مقطع شکست، (ج): مقطع شکست دو تکه نمونه در کنار هم، (چ) و (ح): نمای جلو و پشت نمونه شکسته شده ۱۰۷
- شکل (۴-۳۹) (الف): مقطع شکست دو تکه نمونه در کنار یکدیگر، (ب) و (پ): دو نمای نزدیک با بزرگنمایی متفاوت از مقطع شکست، (ت): نمای روبرو، (ث): نمای پشت و (ج): نمای جانبی دو تکه نمونه شکسته شده در کنار یکدیگر ۱۰۸
- شکل (۴-۴۰) مقطع شکست در موضع سوراخ ایجاد شده برای اندازه گیری تنش پسماند در نمونه، دو تصویر با بزرگنمایی های مختلف ۱۱۰
- شکل (۴-۴۱) تصاویر شکست در موضع لبه جوش، (الف): نمای پشت، تصاویر شکست در موضع لبه جوش (ب): نمای جلو، (پ) نمای جانبی از نمونه، (ت) نمای مقطع شکست ۱۱۱

۱۱۲	تصاویر شکست در موضع نزدیک به سربند نمونه	شکل (۴-۴۲)
	آزمایشی شماره ۱۰، (الف): نمای دور، (ب): نمای	
	نزدیک از نمونه	
۱۱۰	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۴	شکل (۴-۴۳)
۱۱۰	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۶	شکل (۴-۴۴)
۱۱۱	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۸	شکل (۴-۴۵)
۱۱۱	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۹	شکل (۴-۴۶)
۱۱۲	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۱۱	شکل (۴-۴۷)
۱۱۲	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۱۲	شکل (۴-۴۸)
۱۱۳	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۱۳	شکل (۴-۴۹)
۱۱۳	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۱۴	شکل (۴-۵۰)
۱۱۴	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۱۶	شکل (۴-۵۱)
۱۱۴	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۱۷	شکل (۴-۵۲)
۱۱۵	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۱۸	شکل (۴-۵۳)
۱۱۵	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۱۹	شکل (۴-۵۴)
۱۱۶	منحنی مقدار شایستگی برای نمونه شماره ۲۰	شکل (۴-۵۵)
۱۲۰	ورق و پنج مرحله جوش قوسی برای آن	شکل (۵-۱)
۱۲۱	المان شماره ۱۹ در نرم افزار Marc	شکل (۵-۲)
۱۲۱	المان شماره ۳۹ در نرم افزار Marc	شکل (۵-۳)
۱۲۵	مدل هندسی و شبکه بندی اجزاء محدود ورق	شکل (۵-۴)
	هندسه ورق و پاس اول جوش به همراه شبکه بندی اجزاء محدود آنها،	شکل (۵-۵)
۱۲۷	نمای دور	

هندسه ورق و پاس اول جوش به همراه شبکه بندی اجزاء محدود آنها،	شکل (۵-۶)
۱۲۷ نمای نزدیک	
۱۲۹ مدل بعد از تعریف جنس ورق و فیلر	شکل (۵-۷)
۱۳۱ نمایش دو بعدی مدل پس از تعریف مشخصات جوش	شکل (۵-۸)
۱۳۲ نمایش سه بعدی مدل پس از تعریف مشخصات جوش	شکل (۵-۹)
۱۳۳ مدل پس از تعریف مشخصات تماس ورق و فیلر	شکل (۵-۱۰)
۱۳۵ مدل پس از اعمال شرط مرزی اول	شکل (۵-۱۱)
۱۳۶ مدل پس از اعمال شرط مرزی دوم	شکل (۵-۱۲)
۱۳۷ مدل پس از اعمال شرط مرزی سوم	شکل (۵-۱۳)
۱۴۰ توزیع درجه حرارت در پایان جوش کاری (بعد از ۱۸ ثانیه)	شکل (۵-۱۴)
توزیع درجه حرارت در ورق حاصل از مرحله اول جوش کاری بر حسب	شکل (۵-۱۵)
۱۴۱ زمان	
۱۴۴ کرنش کل پلاستیک معادل در ورق پس از پایان جوش کاری	شکل (۵-۱۶)
۱۴۶ موج گسترش کرنش پلاستیک از شروع تا انتهای جوش کاری	شکل (۵-۱۷)
۱۴۹ توزیع تنش پسماند عرضی در ورق طی فرآیند جوش کاری	شکل (۵-۱۸)
توزیع تنش پسماند عرضی پس از جوش کاری در ورق: (الف)- به صورت	شکل (۵-۱۹)
۱۵۰ طیف رنگی و، (ب)- به صورت خطوط تنش ثابت	
۱۵۱ نمونه ای از نمایش مقادیر تنش پسماند عرضی در گره ها	شکل (۵-۲۰)
۱۵۲ توزیع تنش پسماند عرضی در نقاط بالائی ورق	شکل (۵-۲۱)
۱۵۲ توزیع تنش پسماند طولی در ورق طی فرآیند جوش کاری	شکل (۵-۲۲)
توزیع تنش پسماند طولی پس از جوش کاری در ورق:	شکل (۵-۲۳)