بسم الله الرحمن الرحیم

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب **هیدی احمدی** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکرگردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف(در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی اثر متعلق به دانشگاه شهید رجایی می‌باشد.

امضاء

هیدی احمدی

دانشکده مهندسی مکانیک

تحلیل تجربی تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی جوش لبه روی هم کامپوزیت پلی‌پروپیلن

نگارش:
هیدی احمدی

اساتید راهنما : دکتر نصرالله بنی مصطفی عرب
دکتر فرامرز آشنای قاسمی

استاد مشاور : دکتر رضا اسلامی فارسانی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم به:

دست‌های مهربان مادرم

و

لطف بیکران پدرم

تقدیر و تشکر

خداوند رحمن و رحیم را شاکرم که به این بنده حقیر بذل عنایت فرمودند تا این پایان‌نامه را با موفقیت به پایان برسانم. بدیهی است که انجام این مهم را مدیون زحمات بی‌شائبه پدر و مادر دلسوز و فداکارم هستم که از هیچ کمکی در بهبود این مسیر دریغ نورزیدند. از برادر و خواهران عزیزم که مشوق و پشتیبان من در این دوره از زندگی بودند سپاسگزارم. از استاد عزیز و بزرگوارم جناب آقای دکتر نصرالله بنی مصطفی عرب به واسطه حمایت‌های فکری و عملی و نیز صبر و حوصله ایشان در انجام این تحقیق کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. از استاد راهنمای دیگرم آقای دکتر فرامرز آشنای قاسمی و استاد مشاورم آقای دکتر رضا اسلامی فارسانی نیز تشکر می‌کنم. همچنین از دانشجوی مقطع دکتری مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت آقای عبدالحمید صلاحی به خاطر مشاورت و همکاری در انجام بخش طراحی آزمایشات این پایان‌نامه به روش تاگوچی سپاسگزارم. همچنین وظیفه خود می‌دانم از همکاری صمیمانه آقایان مهندس یعقوب دادگر اصل ، ساسان فرهمند و محمد علی حسن علی در کارگاه ماشین ابزار دانشگاه تشکر نمایم. از مساعدت و همکاری دکتر حمید رحیمی عضو هیئت علمی پژوهشکده پلیمر و پتروشیمی ایران و آقای زرگر تکنسین محترم کارگاه کامپوزیت پژوهشکده پلیمر و پتروشیمی ایران تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین از همکاری آقای مهندس جبارزاده مدیر عامل محترم شرکت کیمیا فروز نیز تشکر می‌نمایم.

در خاتمه این پایان نامه را تقدیم به خانواده عزیزم که همیشه مشوق حال من در طول دوران تحصیلم بوده‌اند می‌نمایم.

چکیده

کاربرد الفین‌های ترموپلاستیک مانند پلی‌پروپیلن در سال‌های اخیر به علت قابلیت بازیافت مجدد، چگالی پایین، مقاومت در برابر تغییرات شیمیایی و هزینه خرید پایین در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری افزایش پیدا کرده است. از انواع الیاف‌های تقویت‌کننده‌ای که برای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بکار برده می‌شوند می‌توان به شیشه، کربن و آرامید اشاره کرد. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به علت اینکه از مزایای بسیاری مانند مقاومت در برابر خوردگی، خواص مکانیکی مناسب و هزینه ساخت پایین برخوردار هستند بطور گسترده در صنایع مختلف و تکنولوژی مدرن بکار برده می‌شوند. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های نوین جوشکاری حالت جامد است که در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در آن صورت گرفته است. در این پایان نامه از این نوع جوشکاری پیشرفته برای اتصال لبه رویهم کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه و ۲۰٪ الیاف کربن استفاده شده است. در ابتدا کیفیت سطح جوش و استحکام کششی- برشی اتصال لبه رویهم ورق‌های با ضخامت ۴ mm با استفاده از چهار نوع ابزار مختلف در سرعت‌های دورانی، خطی و زاویه کلگی گوناگون مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از ابزار با پین استوانه‌ای- مخروطی پیچی نتایج بهتری را از خود نشان داد. پس از یافتن بهترین هندسه ابزار که یکی از پارامترهای مهم فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است به منظور کاهش تعداد آزمایشات و هزینه، اثر سایر پارامترها بر کیفیت سطح و استحکام کششی- برشی جوش به کمک روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق برای کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه نشان داد که سرعت دورانی، سرعت خطی و زاویه کلگی به ترتیب بیشترین تاثیر را بر کیفیت سطح و استحکام کششی- برشی جوش لبه رویهم این نوع کامپوزیت دارند. نتایج نشان داد که مقدار بهینه برای استحکام کششی- برشی در سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm، سرعت خطی ۲۰ mm/min و زاویه کلگی ۱ degree بدست آمد. سپس مقدار ماکزیمم استحکام کششی- برشی با انتخاب بهینه‌ی پارامترهای فرآیند ۵/۰۸ MPa تخمین زده شد که با مقدار واقعی آن که ۴/۹۰ MPa بود ۳/۶۷ ٪ خطا داشت.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی، کامپوزیت پلی پروپیلن، الیاف شیشه، الیاف کربن، استحکام کششی - برشی، روش تاگوچی، آنالیز واریانس.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

تائیدیه هیئت داوران ..... ا
تقدیم ..... ب
تقدیر و تشکر ..... ج
چکیده ..... د
فهرست مطالب ..... ه
فهرست جداول ..... ح
فهرست اشکال ..... ط
فهرست علائم و اختصارات ..... ک

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- روش‌های اتصال کامپوزیت‌های ترموپلاستیک ۲
۱-۲-۱- جوشکاری اصطکاکی ۴
۱-۲-۱-۱- جوشکاری چرخشی ۴
۱-۲-۱-۲- جوشکاری ارتعاشی ۶
۱-۲-۱-۳- جوشکاری التراسونیک ۸
۱-۲-۱-۴- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۹
۱-۳- انتخاب فرآیند جوشکاری مطلوب برای انجام پایان‌نامه ۱۱
۱-۴- کارهای انجام شده ۱۱
۱-۵- ساختار پایان‌نامه ۱۳

فصل دوم: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

۲-۱- مقدمه ۱۵
۲-۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۱۵
۲-۲-۱- تغییرات ریز ساختار ۱۷
۲-۲-۲- منطقه‌ی جوش ۱۹
۲-۲-۳- متغیرهای فرآیند ۲۰
۲-۲-۳-۱- هندسه ابزار ۲۰
۲-۲-۳-۲- سرعت گردشی و سرعت پیشروی ۲۶
۲-۲-۳-۳- زاویه انحراف ۲۶
۲-۲-۳-۴- سایر متغیرها ۲۷
۲-۲-۴- طراحی اتصال ۲۷
۲-۲-۴-۱- اتصالات لب به لب ۲۷
۲-۲-۴-۲- اتصالات لبه رویهم ۲۸
۲-۲-۴-۳- انواع اتصالات دیگر ۲۸

۲-۲-۵- مقایسه‌ی خواص جوش FSW با روش‌های ذوبی ۲۹
۲-۲-۶- تاریخچه‌ی حرارت ورودی و نحوه‌ی انتشار آن در فرآیند FSW ۲۹
۲-۲-۷- شکل‌گیری عیوب در فرآیند FSW ۳۲
۲-۲-۸- مزایا و محدودیت‌های فرآیند FSW ۳۳
۲-۲-۹- کاربردها ۳۴

فصل سوم: کامپوزیت‌ها

۳-۱- مقدمه ۳۹
۳-۲- معرفی کامپوزیت‌ها ۳۹
۳-۳- طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها ۴۰
۳-۳-۱- کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۴۱
۳-۳-۲- کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی ۴۲
۳-۳-۳- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری ۴۳
۳-۴- فرآیندهای ساخت کامپوزیت‌ها ۴۴
۳-۴-۱- روش لایه‌گذاری دستی ۴۴
۳-۴-۲- روش قالبگیری فشاری ۴۵
۳-۴-۳- روش فن‌اوری پرس داغ ۴۵

فصل چهارم: روش تحقیق

۴-۱- مقدمه ۴۷
۴-۲- انتخاب ماده زمینه ۴۷
۴-۳- انتخاب الیاف ۴۸
۴-۳-۱- الیاف شیشه ۴۸
۴-۳-۲- الیاف کربن ۵۰
۴-۴- فرآیند ساخت ورق کامپوزیت ترموپلاستیک ۵۱
۴-۴-۱- اکستروژن ۵۱
۴-۴-۲- پرس داغ ۵۲
۴-۵- خصوصیات مواد اولیه ۵۵
۴-۶- ساخت فیکسچر ۵۵
۴-۷- طراحی و ساخت ابزار ۵۶
۴-۷-۱- جنس ابزار ۵۷
۴-۷-۲- طراحی ابزار ۵۷
۴-۸- عملیات حرارتی ۵۸
۴-۹- هندسه ابزار ۵۸
۴-۱۰- آزمایش کششی - برشی ۶۵

فصل پنجم: طراحی و انجام آزمایشات

۵-۱- مقدمه ۶۸
۵-۲- تعیین محدوده‌ی پارامترهای FSW ۶۸

۵-۲-۱- سرعت دورانی ۶۸
۵-۲-۲- سرعت خطی ۶۸
۵-۲-۳- زاویه کلگی ۶۹
۵-۳- طراحی آزمایشات ۶۹
۵-۳-۱- مقدمه ۶۹
۵-۳-۲- روش تاگوچی در طراحی آزمایشات ۶۹
۵-۳-۳- نسبت سیگنال به نویز (Signal to Noise) ۷۰
۵-۳-۴- آنالیز واریانس ۷۱
۵-۳-۵- مراحل روش تاگوچی در طراحی آزمایشات ۷۴
۵-۳-۶- استفاده از روش تاگوچی در این تحقیق ۷۵
۵-۴- انجام جوشکاری ۷۷

فصل ششم: نتایج و تفسیر آنها

۶-۱- مقدمه ۸۲
۶-۲- هندسه ابزار ۸۲
۶-۲-۱- تاثیر هندسه ابزار بر شکل ظاهری جوش ۸۲
۶-۲-۲- تاثیر هندسه ابزار بر استحکام کششی - برشی جوش ۸۴
۶-۳- بررسی تاثیر سه پارامتر دیگر بر جوش ۸۷
۶-۳-۱- کاربرد نسبت S/N در بررسی تاثیر سه پارامتر فرایند FSW ۸۷
۶-۳-۲- کاربرد آنالیز واریانس در بررسی تاثیر سه پارامتر فرآیند FSW ۹۳
۶-۳-۳- تخمین مقدار بهینه استحکام کششی- برشی ۹۶
۶-۳-۴- صحه گذاری مدل ۹۷
۶-۳-۵- تحلیل تاثیر پارامترها بر استحکام کششی- برشی توسط نمودار دو بعدی ۹۸

فصل هفتم: جمع بندی نتایج و پیشنهادات

۷-۱- مقدمه ۱۰۲
۷-۲- نتایج ۱۰۲
۷-۳- پیشنهادات ۱۰۳

منابع و مراجع ۱۰۴

فهرست جداول

جدول ۳-۱ طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها و مزایا و معایب آنها ۴۱
جدول ۳-۲ تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۴۲
جدول ۴-۱ برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌پروپیلن ۴۷
جدول ۴-۲ ترکیب درصد شیمیایی تعدادی از الیاف‌های متداول ۴۹
جدول ۴-۳ نیروی گسیختگی، تنش حداکثر و کرنش کامپوزیت‌های مورد استفاده در تحقیق ۵۵
جدول ۴-۴ ترکیب شیمیایی فولاد تندبر به درصد وزنی ۵۷
جدول ۵-۱ آرایه متعامد L9 ..... ۷۶
جدول ۵-۲ مقادیر مربوط به کدهای ماتریس طراحی ۷۷
جدول ۵-۳ شماره آزمایش و مقادیر هر یک از پارامترهای جوشکاری برای کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه ... ۷۷
جدول ۶-۱ نیروی گسیختگی، تنش حداکثر و کرنش در نمونه‌های جوشکاری شده کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه ۸۵
جدول ۶-۲ نیروی گسیختگی، تنش حداکثر و کرنش در نمونه‌های جوشکاری شده کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف کربن ۸۶
جدول ۶-۳ جدول طراحی آزمایش‌ها بر اساس آرایه متعامد L9 ..... ۸۸
جدول ۶-۴ نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها ۸۹
جدول ۶-۵ پاسخ‌های Means برای استحکام کششی- برشی ۹۰
جدول ۶-۶ پاسخ‌های نسبت S/N برای استحکام کششی- برشی ۹۱
جدول ۶-۷ آنالیز واریانس برای Means ۹۳
جدول ۶-۸ آنالیز واریانس برای نسبت S/N ۹۴
جدول ۶-۹ نتایج مجموع مربعات خالص و درصد سهمی برای Means ۹۴
جدول ۶-۱۰ نتایج مجموع مربعات خالص و درصد سهمی برای نسبت S/N ۹۴
جدول ۶-۱۱ نتایج آزمایش‌های واقعی و پیش‌بینی شده برای استحکام کششی- برشی در سطوح بهینه ۹۶
جدول ۶-۱۲ نتایج آزمایش‌های تأئیدی برای استحکام کششی- برشی ۹۷
جدول ۶-۱۳ نتایج آزمایش‌های جدید تأئیدی برای استحکام کششی- برشی ۹۸

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ دسته بندی انواع روش‌های اتصال کامپوزیت‌های ترموپلاستیک ۲
شکل ۱-۲ دسته بندی روش‌های جوشکاری ترموپلاستیک ۳
شکل ۱-۳ شماتیک جوشکاری چرخشی ۵
شکل ۱-۴ شماتیک دستگاه جوشکاری چرخشی ۵
شکل ۱-۵ شماتیک جوشکاری ارتعاشی ۶
شکل ۱-۶ شماتیک دستگاه جوشکاری ارتعاشی ۷
شکل ۱-۷ طرح‌های مختلف برای هدایت کننده‌های انرژی ۸
شکل ۱-۸ شماتیک دستگاه جوشکاری التراسونیک ۹
شکل ۱-۹ شماتیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۱۰
شکل ۲-۱ شماتیک فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۱۶
شکل ۲-۲ نواحی ریز ساختاری مختلف موجود در روش جوشکاری FSW ۱۸
شکل ۲-۳ شکل منطقه اغتشاش آلیاژ A356 در اثر جوشکاری با سرعت‌های گردشی و پیشروی : (الف) ۹۰۰ rpm و ۲۰۳ mm/min (ب) ۳۰۰ rpm و ۵۵ mm/min ۲۰
شکل ۲-۴ (الف) شماتیک ترسیم شده از ابزار جوشکاری FSW ، (ب) نمونه ابزار کارآمد ساخته شده توسط TWI ، (ج) هندسه نمای تحتانی از شانه‌های مختلف ۲۲
شکل ۲-۵ نمونه اولیه پروب Whorl ۲۳
شکل ۲-۶ شماتیک چند نمونه پروب Whorl با فرم‌های مختلف جهت بهبود سیلان مواد در حین فرآیند جوشکاری ۲۴
شکل ۲-۷ نمونه اولیه ابزار Triflute با سه شیار و لبه‌های مارپیچ در اطراف آنها ۲۴
شکل ۲-۸ (الف) مقطع جوش متصل شده توسط ابزار چند مرحله‌ای (ب) شماتیک ابزار چند مرحله‌ای و جوشکاری با آن (ج) مقطع جوش متصل شده توسط ابزار جوشکاری لب به لب ۲۵
شکل ۲-۹ اتصال لب به لب ۲۷
شکل ۲-۱۰ اتصال لبه رویهم ۲۸
شکل ۲-۱۱ انواع اتصالات در جوش‌های FSW ، (a) اتصال لب به لب، (b) اتصال لبه‌ای، (c) اتصال لب به لب T شکل، (d) اتصال لبه رویهم، (e) اتصال لبه رویهم چند گانه، (f) اتصال لبه رویهم T شکل، (g) اتصال نواری ۲۹
شکل ۲-۱۲ شماتیک انتقال حرارت در ابزار و قطعه‌کار در حین فرآیند FSW در میانه فرآیند ۳۰
شکل ۲-۱۳ شماتیک وارد و خارج شدن ابزار در قطعه‌کار طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۳۱
شکل ۲-۱۴ عیب شیاری ایجاد شده در قطعه حین فرآیند FSW ۳۲
شکل ۲-۱۵ وجود عیب تونلی در اتصال ۳۳
شکل ۲-۱۶ کاربرد جوشکاری رباتیک FSW در بدنه خودرو ۳۵
شکل ۲-۱۷ تصویر جت سبک Eclipse 500 ..... ۳۶
شکل ۲-۱۸ کاربرد روش FSW در ساخت صنایع ریلی ۳۶
شکل ۲-۱۹ بدنه‌ی کشتی ساخته شده با روش FSW ۳۷
شکل ۳-۱ طبقه بندی انواع کامپوزیت‌ها ۴۰
شکل ۴-۱ پلی‌پروپیلن مورد استفاده در تحقیق ۴۸
شکل ۴-۲ الیاف کربن مورد استفاده در تحقیق ۵۰
شکل ۴-۳ دستگاه اکستروژن مورد استفاده در تحقیق ۵۲
شکل ۴-۴ دستگاه پرس داغ مورد استفاده در تحقیق ۵۲
شکل ۴-۵ مراحل بیرون آوردن ورق از دستگاه پرس و قالب مورد نظر ۵۴
شکل ۴-۶ نمودارهای تنش- کرنش کامپوزیت‌های مورد استفاده در تحقیق، (الف) کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه (ب) کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف کربن ۵۵

شکل ۴-۷ نحوه قرار گرفتن زیر کاری‌ها (الف) تئوری، (ب) در حین انجام آزمایشات ۵۶
شکل ۴-۸ فیکسچر نگهدارنده قطعه‌کار ۵۶
شکل ۴-۹ مشخصات ابزار FSW ۵۸
شکل ۴-۱۰ ابزار ایده‌آل تحقیق سعیدی و همکاران ۶۰
شکل ۴-۱۱ ابزار استوانه‌ای- مخروطی ۶۱
شکل ۴-۱۲ ابزار پیچی ۶۱
شکل ۴-۱۳ (الف) ابزار استوانه‌ای- مخروطی پیچی ، (ب) ابزار استوانه‌ای- مخروطی ساده ۶۲
شکل ۴-۱۴ ابزار مخروطی ۶۲
شکل ۴-۱۵ جوش‌های بدست آمده با استفاده از چهار ابزار برای کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه ۶۳
شکل ۴-۱۶ جوش‌های بدست آمده با استفاده از چهار ابزار برای کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف کربن ۶۴
شکل ۴-۱۷ ایجاد عیب پلیسه در هنگام جوشکاری ۶۵
شکل ۴-۱۸ دستگاه آزمایش کششی - برشی SANTAM STM-150 ..... ۶۶
شکل ۴-۱۹ ابعاد و شکل هندسی نمونه آزمایش کششی- برشی ۶۶
شکل ۵-۱ مراحل روش تاگوچی ۷۵
شکل ۵-۲ شکل ظاهری جوش‌های کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه حاصل از نه اتصال توسط جوشکاری FSW ۷۹
شکل ۵-۳ دستگاه آزمایش کششی- برشی ۸۰
شکل ۶-۱ جوش‌های بدست آمده با استفاده از چهار ابزار برای کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه ۸۳
شکل ۶-۲ جوش‌های بدست آمده با استفاده از چهار ابزار برای کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف کربن ۸۳
شکل ۶-۳ نمودارهای تنش- کرنش کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه مربوط به چهار ابزار مختلف ۸۵
شکل ۶-۴ نمودارهای تنش- کرنش کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ الیاف کربن مربوط به چهار ابزار مختلف ۸۶
شکل ۶-۵ نمودارهای Means برای پارامترهای فرآیند در استحکام کششی- برشی ۹۰
شکل ۶-۶ نمودارهای نسبت S/N برای پارامترهای فرآیند در استحکام کششی- برشی ۹۱
شکل ۶-۷ پلیسه‌های ایجاد شده در اثر زاویه کلگی ۲ درجه ۹۳
شکل ۶-۸ میزان سهم سه پارامتر بر استحکام کششی- برشی بر حسب Means ۹۵
شکل ۶-۹ میزان سهم سه پارامتر بر استحکام کششی- برشی بر حسب نسبت S/N ۹۵
شکل ۶-۱۰ نمودار تنش- کرنش نمونه‌ی مربوط به آزمایش واقعی برای سطوح بهینه ۹۷
شکل ۶-۱۱ نمودارهای تنش- کرنش مربوط به سه آزمایش جدید ۹۸
شکل ۶-۱۲ نمودار دو بعدی استحکام کششی- برشی بر حسب سرعت دورانی و سرعت خطی ۹۹
شکل ۶-۱۳ نمودار دو بعدی استحکام کششی- برشی بر حسب سرعت دورانی و زاویه کلگی ۱۰۰
شکل ۶-۱۴ نمودار دو بعدی استحکام کششی- برشی بر حسب سرعت خطی و زاویه کلگی ۱۰۰

فهرست علائم و اختصارات

گرمای ناشی از اصطکاک به ابزار	Q_3
گرمای خروجی بصورت همرفت از ابزار به هوای مجاور ابزار	q_1
گرمای منتقل شده به نگهدارنده‌های ابزار	Q_4
گرمای ورودی به قطعه‌کار از طریق ابزار در حین فرآیند	Q_1
حرارت خروجی از قطعه‌کار از طریق فیکسچر	Q_2
حرارت خروجی از طریق سیستم انتقال حرارت همرفت	q_2
گرمای باقی مانده در داخل قطعه‌کار	Q
چگالی گرانول	ρ
جرم گرانول	m
حجم گرانول	v
میانگین مربعات انحراف	MSD
متوسط مشاهدات در سطح i عامل A	$\overline{A}_i$
مجموع مشاهدات در سطح i عامل A	A_i
تعداد مشاهدات در سطح i عامل A	n_{A_i}
متوسط کل مشاهدات	$\overline{T}$
مجموع کل مشاهدات	T
تعداد کل مشاهدات	N
مجموع مربعات کل	SS_T
مجموع مربعات پارامتر A	SS_A
تعداد سطوح پارامتر A	K_A
مجموع مربعات خطا	SS_e
درجه آزادی کل	DF_T
درجه آزادی عامل A	DF_A
درجه آزادی خطا	DF_e
واریانس عامل A	v_A
واریانس خطا	v_e
مجموع مربعات اصلاح شده عامل A	SS'_A
مجموع مربعات اصلاح شده خطا	SS'_e
مجموع مربعات اصلاح شده کل	SS'_T
درصد سهم پارامتر A	PC_A
تخمین استحکام کششی- برشی	$\hat{\eta}$
متوسط مشاهدات استحکام کششی- برشی	η_m
متوسط مشاهدات استحکام کششی- برشی در سطوح بهینه	$\overline{\eta}_i$

فصل اول :

مقدمه

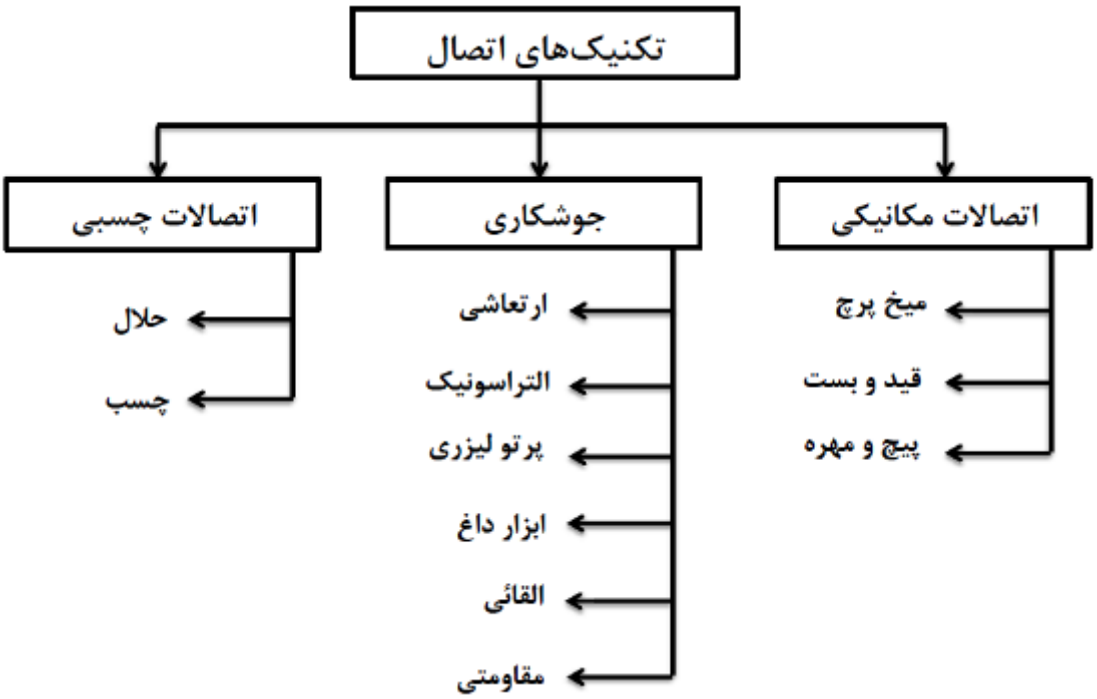
۱-۱- مقدمه

در این فصل روش‌های مختلف جوشکاری کامپوزیت‌ها ارائه شده است.

۱-۲- روش‌های اتصال کامپوزیت‌های ترموپلاستیک

امروزه در صنایع مختلف، اتصال کامپوزیت‌های ترموپلاستیک از اهمیت زیادی برخوردار گشته و بطور گسترده به جای فلزات و آلیاژهای آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. کامپوزیت‌های ترموپلاستیک به دلیل داشتن مقاومت استاتیکی بالا و تحمل بار خستگی بهتر در صنایع کشتی‌سازی، هوافضا و خودروسازی جایگاه مناسبی پیدا کرده و مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱].

روش‌های زیادی برای اتصال قطعات کامپوزیت ترموپلاستیک مورد بررسی قرار گرفته که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است[۱].



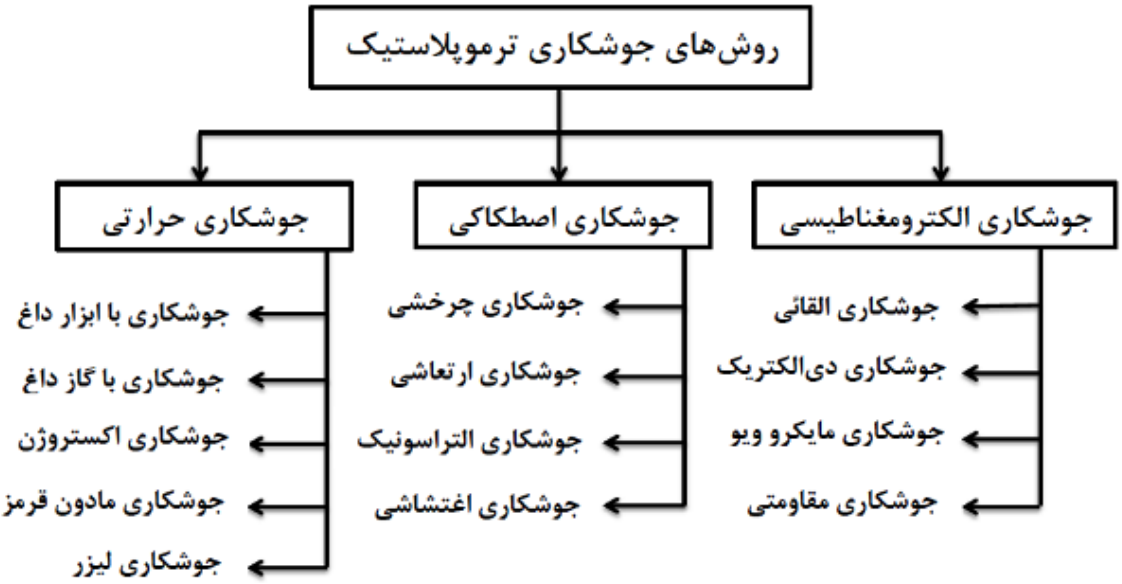
شکل ۱-۱ دسته‌بندی انواع روش‌های اتصال کامپوزیت‌های ترموپلاستیک[۱]

استفاده از اتصالات چسبی و مکانیکی مشکلاتی را ایجاد می‌کنند که به اختصار در زیر توضیح داده می‌شوند:

در اتصال قطعات ترموپلاستیک به روش اتصالات چسبی[1] به علت اینکه مواد چسبنده به سختی به پلیمرهای ترموپلاستیک می‌چسبند کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش اتصالات مکانیکی[2] مشکلاتی از قبیل تمرکز تنش در محل اتصال، خوردگی در اثر واکنش‌های شیمیایی در محل اتصال و آسیب دیدن الیاف تقویت کننده بوسیله عمل سوراخ کردن[3] در محل اتصال بوجود می‌آیند. اما روش جوشکاری در مقایسه با دو روش قبلی از پتانسیل بالاتری برای اتصال کامپوزیت‌های ترموپلاستیک برخوردار است، از اینرو عمل اتصال کامپوزیت‌های ترموپلاستیک بطور گسترده با این روش انجام می گیرد و دلیلش آن است که مشکلات ذکر شده در دو روش قبلی در حین اتصال با این روش بوجود نخواهند آمد و مشکلات ناشی از این دو روش را برطرف خواهد کرد.

شکل ۱-۱ روش‌های اتصالات اصلی را بصورت کلی برای قطعات مختلف ترموپلاستیک نشان می‌دهد و از آنجایی که همه این روش‌ها را نمی‌توان برای هر قطعه‌ی ترموپلاستیک بکار برد، لذا قبل از انجام آزمایش بایستی بصورت دقیق در مورد قطعه‌ی آزمایش تحقیق شود که کدام یک از این روش‌ها برای اتصال آن قطعه مناسب است.

روش‌های جوشکاری ترموپلاستیک‌ها با مکانیزم تولید حرارت در خط اتصال به سه دسته جوشکاری اصطکاکی[4]، جوشکاری حرارتی[5] و جوشکاری الکترومغناطیسی[6] تقسیم‌بندی می‌شوند که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شوند.



شکل ۱-۲ دسته‌بندی روش‌های جوشکاری ترموپلاستیک[۱]

[1] - Adhensive Bonding
[2] - Mechanical Fastening
[3] - Drilling
[4] - Friction welding
[5] - Thermal welding
[6] - Electomagnetic

روش جوشکاری ایده‌ال باید شرایط زیر را دارا باشد[۱]:

۱) قابل کاربرد برای انواع اتصالات باشد.
۲) قابلیت اتوماسیون را داشته باشد.
۳) قابلیت بازرسی درون خطی اتصال را داشته باشد.
۴) قابلیت تجدید پذیری را دارا باشد.
۵) اتصال محکمی را ایجاد نماید.
۶) به حداقل تمیز کاری سطح اتصال نیاز داشته باشد.
۷) فرآیند اتصال هزینه کمی را در بر بگیرد.

با توجه به اینکه خروجی و هدف این پایان نامه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت‌های ترموپلاستیک می‌باشد، بدون توضیح روش‌های جوشکاری الکترومغناطیسی و جوشکاری حرارتی به سراغ روش‌های جوشکاری اصطکاکی رفته و به توضیح آنها پرداخته می‌شود.

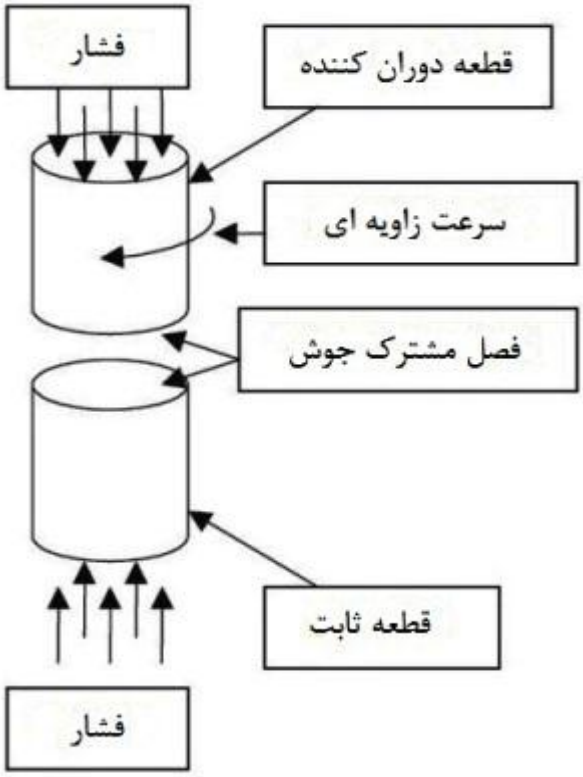
۱-۲-۱- جوشکاری اصطکاکی

یک دید کلی از جوشکاری اصطکاکی، عبارتست از : گرما و حرارت تولید شده در محل اتصال در اثر کار ناشی از اصطکاک و استفاده از فشار برای هدایت مواد. چند روش برای تولید گرما و حرارت در محل اتصال در اثر کار اصطکاکی وجود دارد. روش‌های جوشکاری اصطکاکی بر اساس تولید گرما و حرارت به روش‌های جوشکاری چرخشی[۱]، جوشکاری ارتعاشی[۲]، جوشکاری التراسونیک[۳] و جوشکاری اغتشاشی[۴] تقسیم می‌شوند.

۱-۲-۱-۱- جوشکاری چرخشی

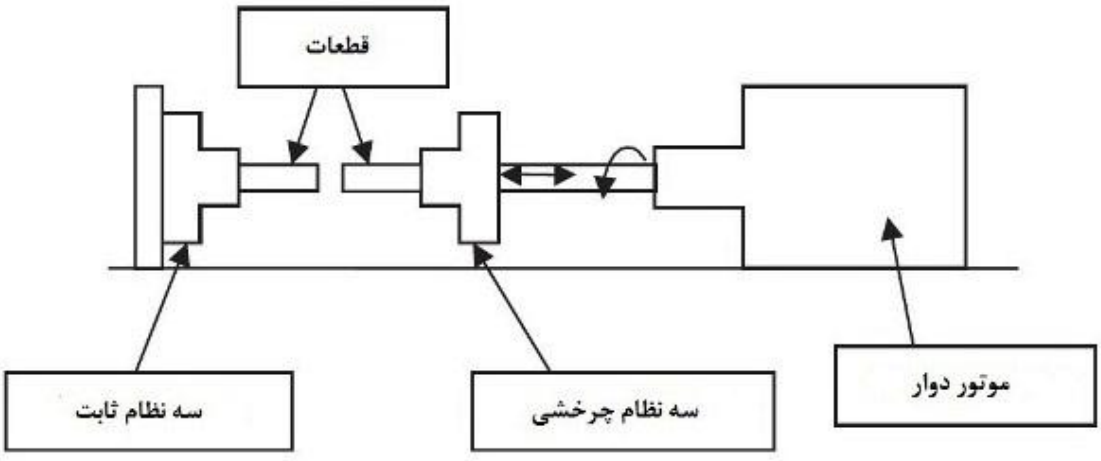
جوشکاری چرخشی یکی از متداول‌ترین روش‌های جوشکاری اصطکاکی است که برای جوش ترموپلاستیک‌ها و کامپوزیت‌های ترموپلاستیک با الیاف کوتاه تقویت‌کننده در قطعات دوار استفاده می‌شود. در این فرآیند یک قطعه ثابت است و قطعه‌ی دیگر تحت سرعت زاویه‌ای و فشار محوری مشخص دوران می‌کند تا حالت خمیری شدن در فصل مشترک دو قطعه اتفاق بیفتد. پس از خمیری شدن فصل مشترک دو قطعه و توقف قطعه دوران کننده عمل انجماد رخ می‌دهد. شکل ۱-۳ جوشکاری چرخشی را بصورت شماتیک نشان می‌دهد[۲].

[1] - Spin welding
[2] - Vibration welding
[3] - Ultrasonic welding
[4] - Stir welding



شکل ۱-۳ شماتیک جوشکاری چرخشی[۲]

جوشکاری چرخشی می‌تواند به سادگی با استفاده از یک مته فشاری یا دستگاه تراش انجام گیرد. برای رسیدن به یک کیفیت جوش مناسب، بایستی مقدار انرژی انتقال داده شده به قطعات به دقت کنترل گردد[۳و۴]. به این منظور می‌توان از یک چرخ لنگر[1] که توانایی تنظیم کردن مقدار سرعت زاویه‌ای را دارد استفاده کرد. شکل ۱-۴ شماتیک یک دستگاه جوشکاری چرخشی را نشان می‌دهد که در واقع می‌توان گفت همان دستگاه تراش است[۴].



شکل ۱-۴ شماتیک دستگاه جوشکاری چرخشی[۴]

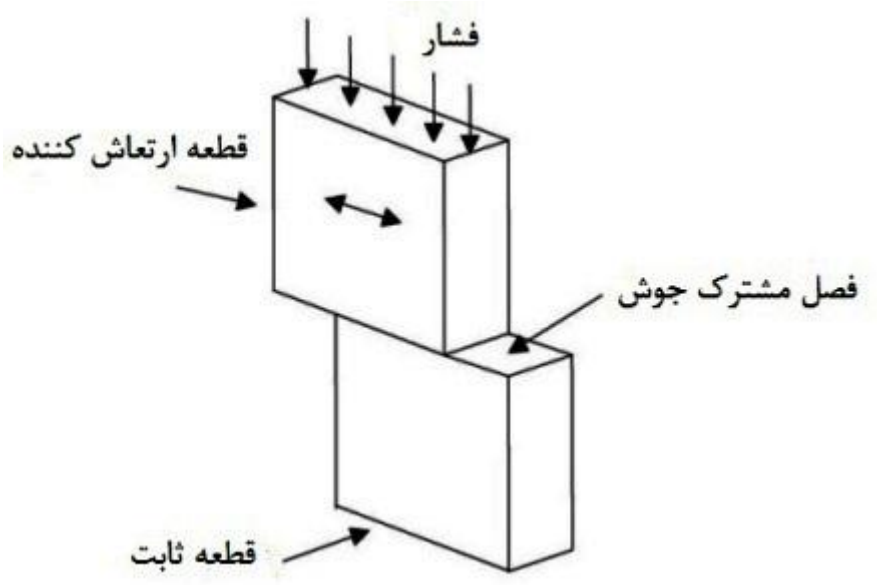
[1] - Flywheel

دو قطعه بر روی دو سه نظام دستگاه قرار می‌گیرند. یک قطعه در سه نظام ثابت دستگاه و قطعه‌ی دیگر در سه نظام متغیر دستگاه قرار می‌گیرد که سه نظام متغیر حرکت دورانی را انجام می‌دهد. قطعات به موجب حرکت دورانی سه نظام متغیر زیر فشار چرخشی با همدیگر تماس پیدا می‌کنند که این عمل در دستگاه توسط موتور دوار ایجاد می‌شود. وقتی که پلیمر ترموپلاستیک به حالت خمیری می‌رسد دستگاه متوقف می‌گردد و یک فشار فورجینگ اعمال می‌گردد. در نهایت پلیمر به حالت انجماد می‌رسد که نتیجه آن ایجاد یک جوش است.

از مزیت‌های جوشکاری چرخشی می‌توان کیفیت بالای جوش، سادگی، سرعت و قابلیت تولید مجدد را نام برد[۵]. در اکثر موارد، خیلی بندرت به تمیز کردن و آماده کردن سطح جوشکاری نیاز است. این روش برای جوشکاری قطعات دوار بسیار مناسب است.

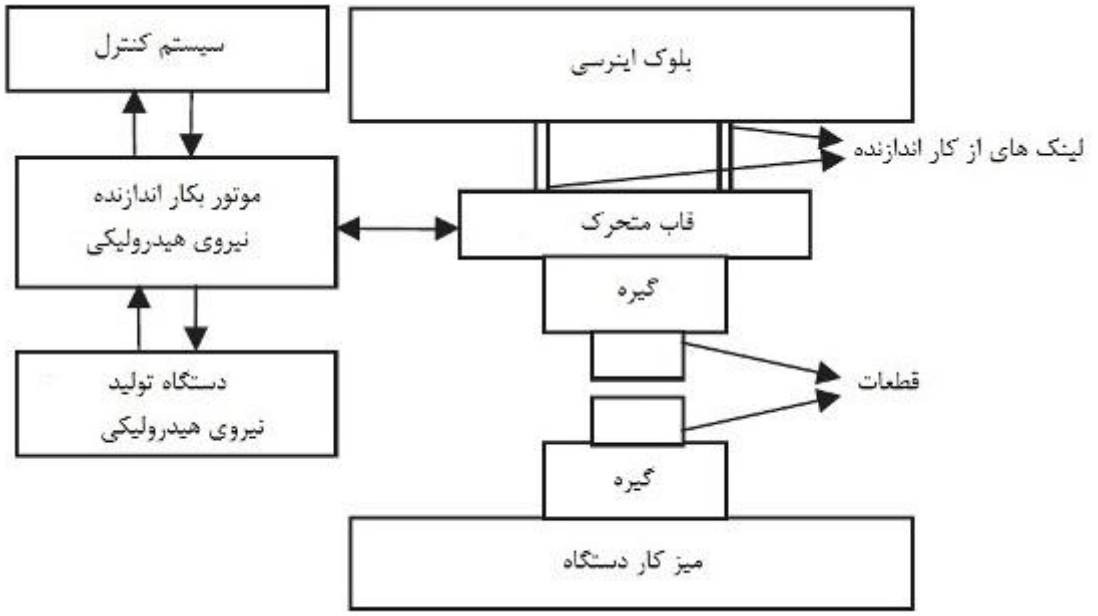
۱-۲-۱-۲- جوشکاری ارتعاشی

جوشکاری ارتعاشی بطور گسترده برای جوشکاری انواع پلیمرها و کامپوزیت‌های ترموپلاستیک استفاده می‌شود[۶-۹]. در این روش دو قطعه‌ای که قرار است به یکدیگر متصل شوند با فشار با همدیگر تماس پیدا می‌کنند. یکی از قطعات ثابت بوده و قطعه‌ی دیگر به موازات فصل مشترک دو قطعه با فرکانسی مناسب ارتعاش می‌کند تا حرارت و گرمای کافی در اثر اصطکاک و تنش برشی در فصل مشترک دو قطعه تولید شود سپس عمل خمیری شدن و ترکیب پلیمرهای ترموپلاستیک انجام گردد[۶و۷]. پس از آنکه حرکت ارتعاشی متوقف شد قطعات در یک راستا قرار می‌گیرند و پلیمر ذوب شده زیر فشار منجمد می‌گردد و در نتیجه جوش بوجود می‌آید. شکل ۱-۵ جوشکاری ارتعاشی را بصورت شماتیک نشان می‌دهد[۶].



شکل ۱-۵ شماتیک جوشکاری ارتعاشی[۶]

شکل ۱-۶ قسمت‌های مختلف یک نوع دستگاه جوشکاری ارتعاشی را بصورت شماتیک نشان می‌دهد[۷].



شکل ۱-۶ شماتیک دستگاه جوشکاری ارتعاشی[۷]

قطعات جوشکاری توسط گیره‌های دستگاه نگه داشته می‌شوند یعنی قطعه‌ی بالایی توسط گیره‌ی بالایی و قطعه‌ی پایینی توسط گیره‌ی پایینی نگه داشته می‌شوند. قطعه‌ی پایینی بر روی میز کار دستگاه قرار می‌گیرد که می‌تواند به سمت بالا یا پایین بلغزد. قطعه‌ی بالایی بر روی قاب متحرک قرار می‌گیرد که بواسطه‌ی دو لینک موازی می‌تواند موقتا مسکوت شود و از کار بیفتد. لینک‌های موازی که به بلوک اینرسی متصل هستند به عنوان فنر تشدیدکننده و ارتعاش‌کننده به کمک موتور بکار اندازنده‌ی نیروی هیدرولیکی عمل می‌کنند. نیروی لازم برای موتور بکار اندازنده‌ی نیروی هیدرولیکی توسط یک دستگاه تولید نیروی هیدرولیکی فراهم می‌شود. همچنین توسط یک سیستم کنترل فرکانس، دامنه ارتعاش، نفوذ جوشکاری و زمان جوشکاری کنترل می‌گردند. فنر تشدیدکننده (لینک‌های موازی) وظایف مختلف دارند: مقدار انتقال انرژی را به قطعات کنترل می‌کند و همچنین موقعیت قطعات در اتمام جوشکاری را قبل از منجمدشدن پلیمر ترموپلاستیک کنترل می‌کند[۷و۱۰و۱۱].

مهم‌ترین مزایای جوشکاری ارتعاشی نرخ بالای تولید، سیکل زمانی نسبتا کوتاه، توانایی جوش‌دادن چندین قطعه بطور همزمان، مناسب بودن برای جوش دادن قطعات کوچک به متوسط، توانایی جوش دادن هر نوع مواد ترموپلاستیک (پلیمرهای آمورف، نیمه کریستالی و کریستالی)، سادگی کنترل فرآیند و حساس نبودن به تمیزکاری سطح اتصال را نام برد.

از معایب این فرآیند می‌توان به مناسب نبودن این روش برای جوشکاری قطعات غیر تخت نام برد،