مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه شده

۱۳۸۰/۵/۲۰

پژوهشگاه پلیمر ایران

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه علوم وفنون مازندران

پایان‌نامه

مقطع کارشناسی ارشد

رشته: مهندسی‌شیمی

012332

عنوان: طراحی ساختارهای ساندویچی

۳۵۴۹

استاد راهنما: دکتر محمدحسین بهشتی

استاد مشاور: دکتر مهدی باریکانی

دانشجو: محمد علی کدخدایان

(پاییز ۱۳۷۹)

تقدیم به پیشگاه مقدس حضرت ولی عصر(عجج)

و تقدیم به پدر و مادرفداکارم که مرا یاری دلسوز و فداکارند

و تقدیم به خانوادهٔ عزیزم که همواره مرا دوستی مهربانند

۲۵۴۰۹

تشکر و قدردانی

حال که به یاری پروردگار پروژهٔ کارشناسی ارشد خود را با موفقیت به پایان رسانده ام، لازم است از کلیه افرادی که در این راه با من همکاری داشته اند سپاسگذاری شود.

در ابتدا مراتب سپاس خود را به استاد ارجمند، آقای دکتر بهشتی در سمت استاد راهنما که در طی اجرای پروژه راهنماییهای ارزندهٔ خود را از من دریغ ننموده اند، تقدیم می کنم.

همچنین از استاد عزیزم جناب آقای دکتر باریکانی که در سمت استاد مشاور کمال همکاری را داشته اند، سپاسگذارم.

از مجموعهٔ پژوهشگاه پلیمر ایران که امکانات انجام پروژه را فراهم آوردند، بویژه از دوستانی که نامشان خواهد آمد، بخاطر همکاری بی دریغشان قدردانی می گردد:

کارگاه کامپوزیت: آقای مهندس رضادوست و آقای زرگر

کارگاه لاستیک: آقایان مهندس نادری و اصغری و آقای انتظامی

آزمایشگاه خواص مکانیکی: خانم مؤیدی

آزمایشگاه عمومی: آقایان مهندس علوی و مقدم

پشتیبانی و تدارکات: آقای مهندس عربشاهی

کتابخانه: خانمها نوروزی نیا و جلالی

اطلاع رسانی: آقای غفاری و خانم ناصرترابی

اتاق کامپیوتر: آقایان دکتر قریشی و آوخ و خانم مهندس طباطبایی و طاهری

و دوستان عزیزم آقایان مهندس دلبری و فصیحی که در مراحل انجام پروژه همراهم بودند.

بی تردید، انجام پروژه بدون همکاری این عزیزان ممکن نبود. امید آنکه این تحقیق در جهت پیشرفت و اعتلای میهن عزیزمان مفید واقع شود.

چکیده

ساختارهای ساندویچی متشکل از دو پوستهٔ نازک، سفت و با دانسیتهٔ بالا که هستهٔ ضخیم، ضعیف و سبک را بین خود قرار داده و بوسیلهٔ لایه های چسب به آن متصل شده اند؛ گونه ای از کامپوزیتهای پیشرفته هستند که نسبت بالای استحکام و سفتی به وزن و نیز خواص عایقی آنها موجب کاربرد گسترده و متنوع آنها در صنایع مختلفی چون هوافضا، کشتی سازی، ساختمانی و غیره شده است. عوامل متعددی بر خواص(خمشی) آنها تاثیر گذارند که مهمترین آنها در طراحی سازه، ضخامت اجزا بویژه مادهٔ هسته، دانسیتهٔ اجزا، نوع و شکل مواد به کار رفته می باشند.

طراحی ساختار ساندویچی متشکل از هستهٔ فوم فنلیک- لاستیک نیتریل(٤٠%) با دانسیتهٔ $0/6 gr/cm^3$ و پوسته های کامپوزیتی تک لایه از رزین فنلیک نوع رزول مایع **IL-800** و الیاف آزبست نوع کریزوتایل با درصد وزنی الیاف٪۲±۵۰، شامل بررسی اثر ضخامت هسته بر خواص خمشی و ساخت این ساختار به روش قالبگیری فشاری به دو طریقهٔ همزمان و غیر همزمان اجزا و تعیین روش مناسبتر اهداف مورد نظر این پروژه می باشند.

نتایج حاصل نشان داد که تقریباً سه برابر شدن ضخامت هسته(کمتر از دو برابر شدن ضخامت سازه) موجب افزایش٪۵۰ در وزن واحد سطح، کاهش استحکام و مدول خمشی، تقریباً ۵ و۳ برابر شدن نسبت سفتی خمشی و برشی به پهنای سازه و افزایش٪۲۰ طول بحرانی شده اما اثر ناچیزی بر سفتی کششی داشته است. همچنین این افزایش وزن موجب به ترتیب ۵/۵ و ٤ برابر شدن نسبتهای سفتی خمشی و برشی به وزن(gr/cm^2) سازه شده است. از نتایج این مطالعه در چندین کاربرد عملی استفاده شده است.

کلید واژه: ساختار ساندویچی، فوم فنلیک-نیتریل، پوسته رزول-آزبست، طراحی سازه، اثر ضخامت، ساخت، قالبگیری فشاری.

فهرست مطالب

چکیده ..... د

فهرست مطالب ..... ه

فصل اول: کلیات ۱

فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام شده ۵

۲-۱- مقدمه ٦

۲-۲- ساختارهای ساندویچی ٦

۲-۲-۱- تعریف ٦

۲-۲-۲- ویژگیهای ساختار ساندویچی ۷

۲-۲-۳ - کاربرد ساختارهای ساندویچی ۸

۲-۳- اجزای ساختارهای ساندویچی ۹

۲-۳-۱- هسته(core) ۱۰

۲-۳-۱-۱- هستهٔ فومی ۱۰

۲-۳-۱-۲- فومهای فنلیک ۱٤

۲-۳-۱-۳- هسته های لانه زنبوری ۲۱

۲-۳-۱-٤- هسته های چوبی ۲۸

۲-۳-۱-۵- سایر مواد هسته ۲۹

۲-۳-۱-٦- مقایسهٔ هسته های مختلف ۳۲

۲-۳-۱-۷- معیارهای انتخاب هسته ۳۷

۲-۳-۲- پوسته(facing material) ۳۸

۲-۳-۲-۱- پوسته چوبی ۳۸

۲-۳-۲-۲- پوسته کامپوزیتی ۳۸

۲-۳-۲-۳- پوسته فلزی ٤٦
۲-۳-۳-لایه‌های چسب(*Adhesive Layers*) ٤٦
۲-٤- طراحی ساختارهای ساندویچی ٤٩
۲-٤-۱- تعاریف ٤٩
۲-٤-۱-۱- منحنیهای نیرو- تغییر شکل ٤٩
۲-٤-۱-۲- منحنی تنش- کرنش ٥٠
۲-٤-۱-۳- استحکام ٥٠
۲-٤-۱-٤- مدول ٥٠
۲-٤-۱-٥- سفتی ٥٠
۲-٤-۲- اصول طراحی ٥٢
۲-٤-۳- مراحل طراحی ٥٢
۲-٤-٤- طبقه‌بندی سازه‌های ساندویچی ٥٤
۲-٤-٥- خواص خمشی ٥٦
۲-٤-٥-۱- روابط خمش ٥٦
۲-٤-٥-۲- روابط برش ٦٧
۲-٤-٥-۳- روابط کشش ٧٠
۲-٤-٦- طراحی ساختارهای ساندویچی ٧٠
۲-٤-۷- مقایسهٔ داده‌های تجربی ٧٣
۲-٥- روشهای ساخت ساختارهای ساندویچی ٧٥
۲-٥-۱- لایه‌گذاری تر(wet lay-up) ٧٥
۲-٥-۱-۱- روش کار ٧٥
۲-٥-۱-۲- مشخصات ٧٩
۲-٥-۱-۳- کاربرد ٨٠

۲-۵-۲-لایه گذاری با استفاده از پیش‌آغشته‌ها(PREPREG LAY-UP) ۸۰
۲-۵-۲-۱- روش کار ۸۱
۲-۵-۲-۲- مشخصات ۸۳
۲-۵-۲-۳- کاربرد ۸٤
۲-۵-۳- پیوند با چسب (Adhesive Bonding) ۸٤
۲-۵-۳-۱- روش کار ۸۵
۲-۵-۳-۲- مشخصات ۸٦
۲-۵-۳-۳- کاربرد ۸۷
۲-۵-٤- قالبگیری مایع(Liquid Moulding) ۸۷
۲-۵-٤-۱- روش کار ۸۷
۲-۵-٤-۲- مشخصات ۹۰
۲-۵-٤-۳- کاربرد ۹۳
۲-۵-۵- لایه‌گذاری پیوسته(Continuous Lamination) ۹۳
۲-۵-٦- سایر فرآیندها ۹٤
فصل سوم: مواد و روشهای آزمون ۱۱٦
۳-۱- مقدمه ۱۱۷
۳-۲- مواد اولیه ۱۱۷
۳-۲-۱- مواداولیه هسته ۱۱۷
۳-۲-۲- مواداولیه پوسته ۱۱۷
۳-۳- آزمونهای انجام شده ۱۱۸
۳-۳-۱- دانسیته ۱۱۸
۳-۳-۱-۱- دانسیتهٔ پوسته ۱۱۸
۳-۳-۱-۲- دانسیتهٔ هسته ۱۱۹

۳-۳-۲- خواص کششی ۱۱۹
۳-۳-۲-۱- خواص کششی پوسته ۱۱۹
۳-۳-۲-۲- خواص کششی فوم ۱۲۰
۳-۳-۲-۳- خواص کششی سازه ساندویچی ۱۲۰
۳-۳-۳- خواص خمشی ۱۲۰
۳-۳-۳-۱- خواص خمشی پوسته ۱۲۰
۳-۳-۳-۱- خواص خمشی سازه ساندویچی ۱۲۱
۳-۳-٤- خواص برشی هسته ۱۲۲
۳-۳-۵- آزمون سختی ۱۲۲
۳-۳-٦- آزمون *DSC* ۱۲۲
۳-٤- دستگاههای مورد استفاده ۱۲۲
فصل چهارم: نتایج و بحث ۱۲۳
٤-۱- مقدمه ۱۲۵
٤-۲- تعیین مشخصات مواد مصرفی و ساخت تجهیزات مورد نیاز ۱۲۵
٤-۲-۱- تعیین وزن واحد سطح الیاف ۱۲۵
٤-۲-۲- تعیین درصد رطوبت و پنبه الیاف ۱۲٦
٤-۲-۳- تعیین درصد مواد جامد و فرار رزین رزول مایع ۱۲٦
٤-۲-٤- تعیین چرخهٔ پخت رزین رزول ۱۲۷
٤-۲-۵- ساخت تجهیزات مورد نیاز ۱۲۷
٤-۳- روش تهیهٔ اجزای سازهٔ ساندویچی و تعیین خواص آنها ۱۲۸
٤-۳-۱- پوسته کامپوزیتی ۱۲۸
٤-۳-۱-۱- روش تهیه ۱۲۸
٤-۳-۱-۲- تعیین خواص ۱۳۱

٤-٣-٢- هسته فومی ١٣٣
٤-٣-٢-١- روش تهیه ١٣٣
٤-٣-٢-٢- تعیین خواص ١٣٣
٤-٤- طراحی و ساخت سازه های ساندویچی ١٣٤
٤-٤-١- روش ساخت ١٣٤
٤-٤-٢- طراحی سازه های ساندویچی ١٣٧
٤-٤-٢-١- بررسی اثر ضخامت ١٣٧
٤-٤-٢-٢- مقایسهٔ نتایج ١٤٠
فصل پنجم: خلاصهٔ نتایج و پیشنهادات ۱۶۳
٥-١- خلاصه نتایج ١٦٤
٥-٢- پیشنهادات ١٦٥
مراجع ١٦٦
چکیدهٔ انگلیسی ١٦٧

فصل اول

(کلیات)

مواد مرکب یا کامپوزیتها (composites) موادی هستند که از دو یا چند مادهٔ مختلف با فازهای متفاوت تشکیل شده‌اند؛ در واقع یک کامپوزیت تشکیل شده است از یک مادهٔ زمینه یا ماتریس(matrix) و یک مادهٔ تقویت‌کننده(Reinforcement) که از خواص مکانیکی بسیار بالاتری در مقایسه با ماتریس برخوردار است. مواد گوناگونی را می‌توان به عنوان ماتریس به کاربرد؛ لذا کامپوزیتها را می‌توان از لحاظ نوع ماتریس به کامپوزیهای پلیمری، فلزی و سرامیکی طبقه‌بندی کرد. کامپوزیتهای پلیمری که مادهٔ زمینه آنها یک پلیمر یا رزین(Resin) است؛ بیشترین کاربرد را در صنایع مختلف دارند.

از ویژگیهای برجستهٔ کامپوزیتها که موجب کاربرد گسترده و متنوع آنها شده است، می‌توان به خواص مکانیکی بالا، وزن کم، فرآورش آسان، خواص عایق حرارتی و الکتریکی خوب، استحکام ویژه(نسبت استحکام به وزن) بالا، مقاومت در برابر خوردگی و غیره اشاره کرد. مادهٔ تقویت‌کننده می‌تواند به اشکال گوناگون نظیر الیاف، پودر و غیره استفاده شود که مواد به دست آمده از آنها به ترتیب کامپوزیتهای لیفی و پودری(fibrous & particulate composites) نامیده می‌شوند.

با افزایش کاربرد کامپوزیتها در صنایع مختلف، کارشناسان با اصلاح و تغییراتی در ساختار، کامپوزیتهای پیشرفته را عرضه کردند که برای کاربردهای ویژه استفاده می‌شوند. یکی از متداولترین و مهمترین کامپوزیتهای پیشرفته، ساختارهای ساندویچی(Sandwich Structures) با خواصی منحصر بفرد است که تقریباً از جنگ جهانی دوم به بعد کاربرد گسترده‌ای در صنایع گوناگون نظامی، دریایی، ساختمانی وبسیاری از صنایع دیگر پیدا کرده‌اند. این ساختارها تشکیل شده‌اند از یک هسته(core material) و دو پوسته(facing materials) که هسته را از دو طرفش محصور کرده و با یا بدون لایه‌های چسب به آن متصل می‌شوند. هسته ماده‌ای سبک، ضخیم و نسبتاً ضعیف مانند مواد اسفنجی یا فوم(foam)، لانه زنبوری(Honeycomb) و غیره است و پوسته‌ها موادی نازک، قوی و سنگینتر نظیر ورقه‌های نازک فلزی، چند لایه‌ای کامپوزیتی و غیره می‌باشند. این سازه‌ها همانند تیر-I (I-Beams) عمل می‌کنند؛ بطوریکه هسته و پوسته‌ها به ترتیب نقش جان و بال تیر(web & flange of Beam) را ایفا می‌کنند؛ اما تفاوت مهم آنها در این است

که ساختارهای ساندویچی از ویژگی منحصربفرد استحکام و سفتی ویـژه بـالا برخـوردار هسـتند؛ همچنین خواص خوب عایق حرارتی و صوتی از دیگر ویژگیهای برجستهٔ آنها می‌باشد.

طبق نظریه‌های مهندسی، سفتی یک قطعه مکعب مستطیل از رابطهٔ Stiffness = E.I به دست می‌آید که E مدول کشسی و I گشتاور ماند قطعه حول محور مرکزی آن و برابر $I=bh^3/12$ است که b و h به ترتیب عرض و ضخامت قطعه هستند. همانطور که از روابط فوق پیداست؛ سفتی با مکعب ضخامت نسبت مستقیم دارد؛ لذا با افزایش اندکی در وزن سازه، ضخامت قطعه زیاد شده و در نتیجه سفتی ویژه بطور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. با استفاده از مواد با استحکام، دانسیته و ضخامت بالا، سفتی بالایی به دست می‌آید اما از طرف دیگر موجب افزایش قابل توجهی در ورن سازه شده که نتیجتاً سفتی ویژه پایینی به دست می‌آید. فلسفهٔ ساخت سازه‌های ساندویچی نیز از حل چنین مشکل افزایش وزن سازه نشأت گرفته است؛ بطوریکه برای افزایش ضخامت از مادهٔ سبک استفاده می‌شود که علاوه بر افزایش ضخامت قطعه، افزایش وزن ناچیزی را سب شده و در نهایت سازه‌ای با ضخامت بالا، وزن کم و استحکام و سفتی ویژهٔ بالا به دست می‌آید.

اجزای سازهٔ ساندویچی به تنهایی اجزایی ضعیف و منعطف هستند ولی هنگامیکه در کنار یکدیگر قرار گیرند و سازهٔ ساندویچی را تشکیل دهند؛ قطعه‌ای محکم و سفت با وزن نسبتاً اندک به دست می‌آید. بنابراین مبحث طراحی ساختارهای ساندویچی برای کاربردهای معین و شرایط اعمال نیروی مشخص از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. مبحث طراحی با توجه به نوع کاربرد سازه می‌تواند شامل تعیین نوع و نحوهٔ نیروهای اعمال‌شونده، تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سازه برحسب خواص هسته و پوسته، مقایسهٔ و بررسی نتایج نظری و عملی، تعیین روابط مناسب، بررسی عوامل مؤثر بر خواص و سایر ملاحظات باشد.

در این پروژه اهدافی که دنبال می‌شود عبارتنداز: ساخت سازه‌های ساندویچی به روش قالبگیری فشاری به دو طریقهٔ پخت همزمان و غیر همزمان اجزا و تعیین طریقهٔ مناسب به کمک مقایسهٔ خواص قطعات تهیه شده و بررسی اثر ضخامت هسته بر خواص سازه.

مباحث این پروژه در دو بخش مطالعات نظری و عملی ارائه شده است. بخش نظری تحت عنوان مروری بر مطالعات انجام شده که در فصل دوم آورده شده است؛ شامل تعریف و کاربرد، انواع مواد هسته و پوسته، روشهای ساخت و طراحی ساختارهای ساندویچی شامل معرفی خواص مکانیکی پایه، ارائه روابط موجود برای تعیین خواص و مقایسهٔ آنها و سایر مباحث آورده شده

است. در فصل سوم مواد و روشهای آزمون تعیین خواص و تجهیزات مورد استفاده در این پروژه شرح داده شده است. در فصل چهارم کارهای عملی انجام شده در پژوهشگاه، نتایج حاصل از آزمون خواص قطعات ساخته شده، مقایسهٔ نتایج نظری و عملی و بحث و بررسی پیرامون نتایج به دست آمده شرح داده شده است. خلاصهٔ نتایج به دست آمده از این پروژه و پیشنهاداتی برای ادامهٔ کار در فصل پنجم ارائه گردیده است.

فصل دوم

(مروری بر مطالعات انجام شده)

۲-۱- مقدمه

ویژگیهای منحصربفرد ساختارهای ساندویچی و کاربردهای ویژهٔ آنها در صنایع پیشرفته نظیر هوافضا، دلیل اصلی انجام مطالعات وسیع و فراگیر در این شاخه از صنعت کامپوزیت می‌باشد. کاربردهای بسیار متنوع این ساختارها از اجزای سفینه‌های فضایی تا درب منازل حوزهٔ مطالعاتی گسترده‌ای را در این زمینه فراهم کرده است و از سوی دیگر نشان‌دهندهٔ توجه روزافزون به استفاده از این سازه‌ها در صنایع مختلف می‌باشد. نوع مواد هسته، پوسته‌ها و لایهٔ چسب، شرایط کاربری و چگونگی اعمال نیرو بر این سازه‌ها، مطالعه و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی آنها، روشهای گوناگون ساخت، تعیین حداقل وزن سازه با بهترین بازدهی برای یک کاربرد خاص و قیمت سازه از رئوس تحقیقات انجام شده در این مبحث می‌باشند که طراحی بهینهٔ سازه‌های ساندویچی از مهمترین مباحث تحقیقاتی روز می‌باشد. از کاربردهای مهم دیگر آنها، استفاده از این سازه‌ها به عنوان عایق حرارتی و صوتی می باشد که سبب مطالعات گسترده در زمینهٔ نوع مواد به کار رونده در آنها شده است. در این فصل با توجه به اهداف این پروژه، چکیده اهم مطالعات انجام شده در این زمینه شامل انواع مواد هسته، پوسته و لایه‌های چسب، طراحی ساختارهای ساندویچی و ارائه روابط تعیین خواص و روشهای گوناگون ساخت آنها شرح داده شده است.

۲-۲- ساختارهای ساندویچی

۲-۲-۱- تعریف[۱]

ساختارهای ساندویچی یا به عبارت ساده‌تر ساندویچها، گونه‌ای از کامپوزیتهای پیشرفته هستند که از جنگ جهانی دوم به بعد مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. ساندویچها از سه قسمت اصلی تشکیل شده‌اند: پوسته‌ها یا رویه‌های(skins or facings) نازک، هستهٔ ضخیم(core) و لایهٔ چسب(adhesive layers) که نقش آن ایجاد پیوند و اتصال بین هسته و پوسته‌هاست. نحوهٔ قرار گرفتن این اجزا در ساندویچها در شکل(۲-۱) نشان داده شده است.

پوسته‌ها که در دو طرف هسته قرار گرفته و به آن متصل می‌شوند؛ موادی با دانسیته و