



پردیس علوم و فناوری‌های نوین

دانشکده هوافضا

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا-گرایش سازه‌های هوایی

مطالعه رفتار خرابی ناشی از رشد ترک عرضی در مواد مرکب لایه ای
مقارن تحت بار خمشی براساس مدل انتقال تنش در چار چوب دیدگاه

مایکرو مکانیک

استاد راهنما:

دکتر فرخ آبادی

نگارنده:

محمود عبادی دشت بیاض

اسفند ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به پدر و مادرم:

خدای رابی ساگرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیایم و از ریشه آنها شاخ و برگ بگیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را داد این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگاری که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند...

سپاس و ستایش خداوندی را سزااست که کسوت هستی را بر اندام موزون آفرینش پوشانید و تجلیات قدرت لایزال را در مظاهر و آثار طبیعت نمایان کردانید. بارها! من بایاد تو، به تو تقرب می جویم و تو را به پیشگاه توشیح می آورم و از تو خواستارم، به کرمیت، مرابه خودت نزدیک کردانی و یاد خود را به من الهام کنی و بر من رحمت آوری و به آنچه بهره و نصیب من ساخته ای، خشودم قرار دهی و در همه حال به فروتنی ام واداری.

((من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق)).

بر خود لازم می دانم از کلمه کسانی که بنده را در تدوین و نگارش این پایان نامه یاری نمودند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. به خصوص از استاد فرزانه جناب آقای دکتر فرخ آبادی که در کلیه مراحل انجام این پژوهش با خوشروئی، یاری و راهنمایی ام نمودند و همچنین از کلیه معلمان و اساتید دوران تحصیلم از ابتدا تاکنون که حق کلامی برگردن اینجانب دارند صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

خلاصه

در این رساله روشی برای محاسبه تنش یک چند لایه کامپوزیتی حاوی ترک ماتریسی تحت بار خمشی و کششی بر اساس مدل انتقال تنش ارائه می‌شود. بدین منظور اثرات ترک ماتریسی با دو تابع اغتشاشی $M(y)$ و $N(y)$ در نظر گرفته می‌شود و براساس آنها با استفاده از معادلات تعادل، سایر تنش‌ها در چند لایه برحسب توابع اغتشاشی محاسبه می‌شوند. با بکارگیری معادلات سازگاری، تعادل، معادلات تنش- کرنش و کرنش-تغییر مکان و همچنین از ناپیوستگی بین لایه‌ای، دو دسته معادلات دیفرانسیل مرتبه ۴ درگیر برحسب $M(y)$ و $N(y)$ حاصل می‌شود که با حل آنها توزیع توابع اغتشاشی را تعیین کرد. در ادامه با اعمال شرایط مرزی نوک ترک ماتریسی ثوابت مجهول توابع و در نهایت توزیع تنش در چند لایه تحت بارگذاری ذکر شده تعیین می‌شود. در ادامه با استفاده از مدل ارائه شده در این رساله افت سختی در چندلایه ترک دار بدست می‌آید. و در نهایت مدل موجود با المان محدود در نرم افزار تجاری براساس تست خمش سه نقطه مدل شده و میزان افت سختی را با دو روش مقایسه می‌کنیم.

کلمات کلیدی: خمش، کشش، چند لایه کامپوزیتی، ترک عرضی، افت سختی، المان محدود

فهرست

۱	فصل اول:مقدمه
۲	۱-۱-مقدمه
۲	۲-۱-مقدمهای بر انواع مکانیزمهای خرابی در مواد مرکب
۱۱	فصل دوم: بررسی تئوری‌های موجود
۱۲	۱-۲- ترک عرضی در مواد مرکب
۱۲	۲-۲-مدلهای ساختاری افت خواص مواد مرکب
۱۳	۳-۲- مدل تجربی
۱۸	۴-۲-دیدگاه ماکرومکانیک
۱۸	۵-۲-دیدگاه مایکرومکانیک
۲۰	۱-۵-۲- مدل انتقال تنش
۲۱	۲-۵-۲- مدل تاخیر برشی (shear-lag)
۲۶	۳-۵-۲- تحلیل تغییرات (variational)
۳۱	۶-۲-روش مکانیک خرابی پیوسته کلاسیک
۳۲	۷-۲-دیدگاه مکانیک خرابی در مقیاس مزو
۳۳	۸-۲-مدل المان محدود(FEM)
۳۴	۹-۲- مطالعات صورت گرفته بر چندلایه‌های کامپوزیتی حاوی ترک ماتریسی تحت بارهای خمشی
۳۹	فصل سوم:معادلات حاکم بر مسئله
۴۰	۱-۳-مقدمه
۴۰	۲-۳-هندسه و معادلات اساسی
۴۳	۳-۳-شرایط کرنش صفحه‌ای
۴۴	۴-۳-شرایط بین لایه‌ای و شرایط مرزی
۴۵	۵-۳-تعاریفی برای تنش و میدان جابجایی

۴۵	..... ۱-۵-۳- میدان تنش
۴۸	..... ۲-۵-۳- میدان جابجایی
۴۹	..... ۳-۵-۳- روابط بازگشتی
۴۹	..... ۶-۳- چندلایه سالم
۴۹	..... ۱-۶-۳- میدان تنش
۵۱	..... ۲-۶-۳- میدان جابجایی
۵۲	..... ۷-۳- استخراج معادلات دیفرانسیل
۵۳	..... ۱-۷-۳- میانگین گیری
۵۴	..... ۲-۷-۳- انتگرال ممان
۵۵	..... ۳-۷-۳- میدان جابجایی اینترفیس در چند لایه
۵۶	..... ۴-۷-۳- حل روابط بازگشتی
۵۹	..... ۵-۷-۳- معادلات دیفرانسیلی
۶۰	..... ۸-۳- اعمال شرایط مرزی
۶۳	..... ۹-۳- مدول سختی خمشی
۶۳	..... ۱۰-۳- ثابت های ترموالاستیک چندلایه ترک دار
۶۵	..... فصل چهارم: نتایج
۶۶	..... ۱-۴- مقدمه
۶۶	..... ۲-۴- نتایج میدانهای تنش ناشی از ترک ماتریسی در لایه چینی های مختلف
۶۶	..... ۱-۲-۴- چندلایه متعامد [0/90] تحت بار کششی
۷۰	..... ۲-۲-۴- مدل متعامد ۵ لایه تحت بار خمشی
۷۲	..... ۳-۲-۴- چندلایه متعامد [0/90] تحت بار کششی و خمشی همزمان
۷۸	..... ۳-۴- نتایج افت سختی ناشی از ترک ماتریسی
۸۱	..... ۴-۴- تحلیل المان محدود

۸۱	..... ۱-۴-۴- تست خمش سه نقطه
۸۲	..... ۲-۴-۴- شبکه بندی و حساسیت شبکه
۸۳	..... ۳-۴-۴- نتایج المان محدود
۸۷	..... فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات
۸۸	..... ۱-۵- نتایج
۸۸	..... ۲-۵- پیشنهادات
۹۱	..... مراجع
۹۸	..... پیوست الف

فهرست نمودارها

- شکل ۱-۱ یک چندلایه متعامد تحت بار کششی ۳
- شکل ۱-۲ رشد یک ترک ماتریسی در اثر جدایش اتصال فایبر و ماتریس ۴
- شکل ۱-۳ ترک ماتریسی در یک چندلایه متعامد ۴
- شکل ۱-۴ شکست الیاف و کشیدگی الیاف در اثر اتصال ضعیف بین اینترفیس و ماتریس ۵
- شکل ۱-۵ مودهای خرابی در یک ماده مرکب ۶
- شکل ۱-۶ مکانیزمهای خرابی در مقیاس میکرو ۷
- شکل ۱-۷ مهمترین مکانیزمهای خرابی مقیاس میکرو ۹
- شکل ۱-۸ مدهای شکست در لایه‌های عرضی تحت کشش (a) ترک عرضی (b) ترک عرضی و لایه لایه شدگی داخلی (c) شکاف ماتریس در لایه های ۰ درجه ۱۰
- شکل ۱-۲ روش تجربی در تعیین افت سختی در چگالی‌های ترک عرضی مختلف برای دو چندلایه ۱۳
- شکل ۲-۲ اثر ضخامت لایه ۹۰ درجه بر مقاومت عرضی In situ در چند لایه‌های متعامد ۹۰ درجه کربن-اپوکسی ۱۵
- شکل ۲-۳ تغییرات رشد ترک نسبت به تنش اعمالی برای یک چندلایه متعامد براساس مطالعات گرت و بیلی ۱۶
- شکل ۲-۴ سختی محوری برای چندلایه شیشه/اپوکسی در ترک عرضی براساس مطالعات وارنا و برگلاند ۱۷
- شکل ۲-۵ سختی محوری ناشی از ترک عرضی در چند لایه‌های متعامد کربن/اپوکسی ۱۷
- شکل ۲-۶ تغییرات افت سختی برای چندلایه کربن/اپوکسی با لایه چینی متفاوت ۱۸
- شکل ۲-۷ مدل مقید معادل یک چندلایه حاوی خرابی ۲۲
- شکل ۲-۸ الگوریتم روش تاخیر برش ۲۳
- شکل ۲-۹-۱ کاهش نسبت پواسون به دلیل ترک عرضی در صفحه گرافیت/اپوکسی ۲۵
- شکل ۲-۹-۲ کاهش مدول طولی به دلیل ترک عرضی در صفحه گرافیت/اپوکسی ۲۶
- شکل ۲-۱۰ الگوریتم روش تغییرات برپایه تغییر مکان ۲۸
- شکل ۲-۱۱ الگوریتم روش تغییرات برپایه تنش ۳۰
- شکل ۲-۱۲ افت سختی برای صفحه شیشه/اپوکسی [0/90] ۳۰
- شکل ۲-۱۳ نوع بارگذاری وزوایای بارگذاری به روش تروی ۳۵
- شکل ۲-۱۴ زاویه الیاف بارگذاری ونوع بارگذاری خمشی در صفحه موردنظر در تحلیل اسمیت ۳۶

- شکل ۱-۳ دستگاه مختصات به کار گرفته شده در مسئله ۴۱
- شکل ۲-۳ توابع اغتشاشی بر یک المان حاوی ترک ۴۷
- شکل ۱-۴ تنش نرمال در راستای y در اینترفیس لایه صفر و 90° درجه ۶۷
- شکل ۲-۴ تنش برشی در راستای y در اینترفیس لایه صفر و 90° درجه ۶۷
- شکل ۳-۴ تنش نرمال در راستای y در اینترفیس $x=0.25\text{mm}$ ۶۸
- شکل ۴-۴ نمودار تنش برشی در راستای y برای اینترفیس $x=0.25\text{ mm}$ ۶۹
- شکل ۵-۴ جابجایی در راستای x برای دو لایه اول ۶۹
- شکل ۶-۴ چند لایه با ترک عرضی در لایه 90° درجه ۱- ترک عرضی ۲- لایه‌های صفر درجه ۳- لایه 90° درجه ۷۰
- شکل ۷-۴ تنش محوری در راستای x ۷۱
- شکل ۸-۴ نمودار جابجایی در راستای x ۷۲
- شکل ۹-۴ الف- تنش نرمال برای خواص ماده اول در اینترفیس $x=0.75$ ۷۳
- شکل ۹-۴ ب- تنش نرمال برای ماده دوم در اینترفیس $x=0.75$ ۷۴
- شکل ۹-۴ پ- تنش نرمال برای ماده سوم در اینترفیس $x=0.75$ ۷۴
- شکل ۱۰-۴ الف- تنش برشی برای ماده اول در اینترفیس $x=0.75$ ۷۵
- شکل ۱۰-۴ ب- تنش برشی برای ماده دوم در اینترفیس $x=0.75$ ۷۵
- شکل ۱۰-۴ پ- تنش برشی برای ماده سوم در اینترفیس $x=0.75$ ۷۶
- شکل ۱۱-۴ الف- تنش محوری برای ماده اول در راستای ضخامت در $y=L$ ۷۶
- شکل ۱۱-۴ ب- تنش محوری برای ماده اول در راستای ضخامت در $y=L$ ۷۷
- شکل ۱۱-۴ پ- تنش محوری برای ماده اول در راستای ضخامت در $y=L$ ۷۷
- شکل ۱۲-۴ مقایسه تغییرات مدول خمشی چندلایه متعامد $[0/90_2/0/90_2/0]$ براساس مطالعه موجود و روش ژانگ ۷۹
- شکل ۱۳-۴ تغییرات افت سختی خمشی لایه چینی $[30/90/90/30/90/90/30]$ بر حسب دانسیته ترک ماتریسی براساس مطالعه موجود ۷۹
- شکل ۱۴-۴ تغییرات افت سختی خمشی لایه چینی $[15/90/90/15/90/90/15]$ بر حسب دانسیته ترک ماتریسی براساس مطالعه موجود ۸۰

شکل ۴-۱۵ تغییرات افت سختی خمشی لایه چینی [45/90/90/45/90/90/45] بر حسب دانسیته ترک ماتریسی براساس مطالعه موجود ۸۰

شکل ۴-۱۶ نمونه مش در راستای ضخامت و ترک باز شده در نرم افزار ABAQUS 6.11.1 ۸۳

شکل ۴-۱۷ جدول خمشی بر حسب دانسیته ترک برای لایه چینی [0/90/90/0/90/90/0] ۸۴

شکل ۴-۱۸ جدول خمشی بر حسب دانسیته ترک برای لایه چینی [30/90/90/30/90/90/30] ۸۵

فهرست جداول

جدول ۴-۱ خواص مکانیکی و حرارتی چند لایه کامپوزیتی ۷۱

جدول ۴-۲ هندسه و خواص مهندسی استفاده شده در مثال و مقدار ۷۳

جدول ۴-۳ جدول حساسیت شبکه بندی ۸۳

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

مواد کامپوزیتی برای هوافضا و موارد دیگر کاربرد فراوان دارد و نیز تحقیقات وسیعی بر روی این مواد انجام شده است به طوری که امروزه مطالعه رفتار خرابی در مواد مرکب از اهمیت زیادی برخوردار است، بررسی مودهای خرابی و همچنین ترک عرضی از جمله این کارها می‌باشد. معمولاً اولین فرم آسیب در چندلایه مرکب ترک‌های عرضی هستند، که در داخل لایه‌ها و در جهت الیاف و در راستای ضخامت هر لایه شکل می‌گیرند. این میکروتُرکها در جهت عرض بار گذاری می‌شوند که به ترک‌های عرضی معروف هستند. عوامل مختلفی نظیر بارهای کششی، بارهای خستگی، تغییرات دمایی و غیره می‌توانند در شکل‌گیری این نوع خرابی نقش داشته باشند. مطالعه ترک‌های ماتریسی از دهه ۸۰ شروع شد و تاکنون روش‌های مختلف تحلیلی، نیمه تحلیلی و عددی برای این مکانیزم خرابی ارائه شده است که شامل تحقیقات محققان زیادی در این زمینه می‌باشد. با این حال مطالعات کمی بر روی اثر بار گذاری‌های خارج صفحه‌ای در شکل‌گیری این مکانیزم خرابی در مواد مرکب لایه‌ای انجام شده است. پیش‌بینی شروع و شکل‌گیری تصاعدی لایه‌های ترک در مواد مرکب که در معرض بارهای مرکب قرار می‌گیرند در مواد مرکب یک هدف تکنیکی مهم به حساب می‌آید.

۱-۲- مقدمه‌ای بر انواع مکانیزم‌های خرابی در مواد مرکب

نقوص و خرابی در مواد مرکب لایه‌ای، استحکام، سختی و عمر کاری ایمن سازه‌های مواد مرکب را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این نقوص ممکن است در حین تولید، سرویس‌ها، الزامات طراحی و یا عوامل اجتناب‌ناپذیر که منجر به ناپیوستگی هندسی می‌گردند نظیر بریدگی‌ها، اتصالات و غیره اتفاق بیفتد [۱ و ۲]. بطور کلی خرابیهایی که ممکن است در حین تولید و ساخت مواد مرکب شکل بگیرند عبارتند از:

۱- ناخالصی‌ها: این فرایند بطور اتفاقی در ماده در حین تولید ایجاد می‌شود.

۲- جداسدگی اتصال الیاف و ماتریس: از بین رفتن اتصال فایبر و ماتریس می‌تواند باعث جداشدن و از بین رفتن درگیری آنها شود. این خرابی می‌تواند به علت استحکام کم اینترفیس و در اثر ناخالصی باشد.

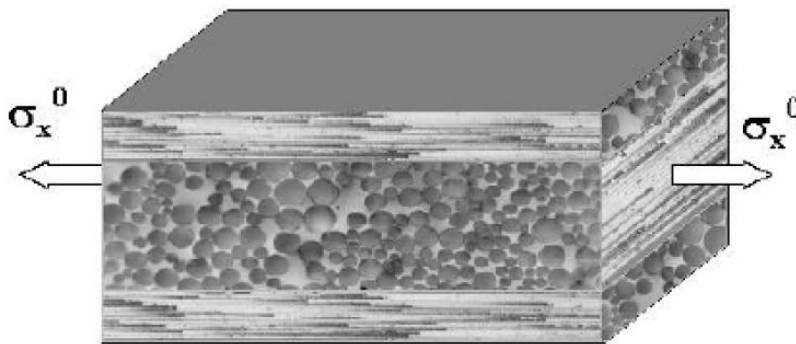
¹ Inclusion

۳- غیر همراستایی الیاف: این خرابی بویژه در مواد با حجم الیاف کم بسیار رایج است.

۴- حفره‌ها: ناشی از نفوذ هوا، حلالها و یا دیگر آلودگی‌ها در حین مخلوط کردن رزین می‌باشد.

۵- تنش‌های پسماند: این تنشها معمولاً در فرآیند پخت ایجاد شده و شکل می‌گیرند. این تنشها خواص مکانیکی را تحت تاثیر قرار داده و می‌تواند منجر به پیچیدگی الیاف^۱، کمانش الیاف^۲، میکروتکرک در ماتریس و جداسدگی بین لایه‌ای گردد. مهمترین عامل ایجاد این تنشها اساساً اختلاف بین ضرایب انبساط فایبر و ماتریس در جهات مختلف است.

نوعی دیگر از خرابی در مواد مرکب وجود دارد که معمولاً به هنگام بارگذاری در مواد مرکب شکل می‌گیرد که عبارتند از ترکهای عرضی، شکست الیاف، کشش الیاف، جداسدگی بین لایه‌ای و از بین رفتن اتصال بین فایبر و ماتریس. شکل ۱-۱ یک ماده مرکب لایه‌ای با لایه‌های صفر درجه در خارج و لایه‌های ۹۰ درجه در داخل را نشان می‌دهد که تحت بار کششی σ_x^0 قرار گرفته است.



شکل ۱-۱- یک چندلایه متعامد تحت بار کششی [۳]

خرابی‌هایی که در این چند لایه در اثر این شرایط بارگذاری شکل می‌گیرند عبارتند از:

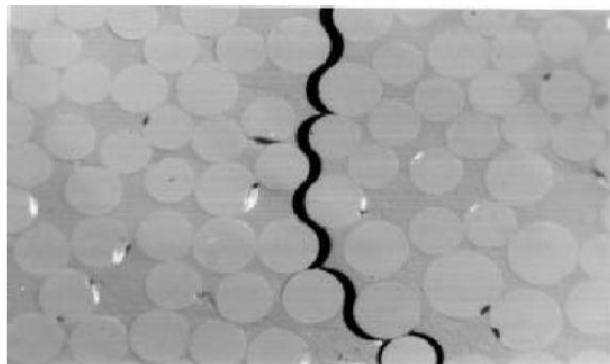
۱- از بین رفتن اتصال فایبر و ماتریس: این اولین شکل خرابی می‌باشد که به سبب اتصال ضعیف

بین فایبر و ماتریس اتفاق می‌افتد. این جداسدگی‌ها در لایه ۹۰ درجه به هم می‌پیوندند و یک

¹ Kniking

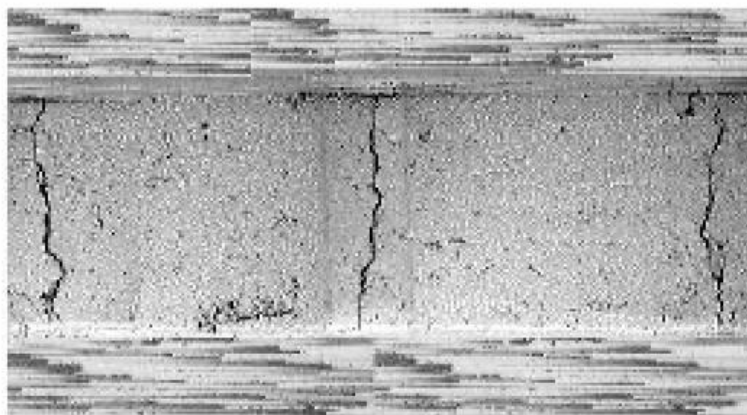
² Buckling

خرابی بزرگتر را که ترک عرضی می‌باشد را شکل می‌دهد. شکل ۱-۲ ترک عرضی ایجاد شده در اثر از بین رفتن اتصال فایبر و ماتریس را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- رشد یک ترک ماتریسی در اثر جدایش اتصال فایبر و ماتریس [3]

۲- ترک عرضی: همانگونه که توسط جوفه^۱ [۳] شرح داده شده است این ترک‌ها از خرابی‌های اینترفیس ناشی می‌شوند. از بهم پیوستن چندین خرابی اینترفیس الیاف و ماتریس با یکدیگر ترک عرضی یا ماتریسی ایجاد می‌شود. این مایکروتُرک‌ها می‌تواند منجر به شکست در مراحل بعدی شوند، چراکه آنها ظرفیت حمل بار سازه در جهت عمود بر ترک و سختی را در آن جهت کاهش می‌دهند. شکل ۱-۳ ترک ماتریسی در چندلایه‌های متعامد تحت کشش محوری را نشان می‌دهند.



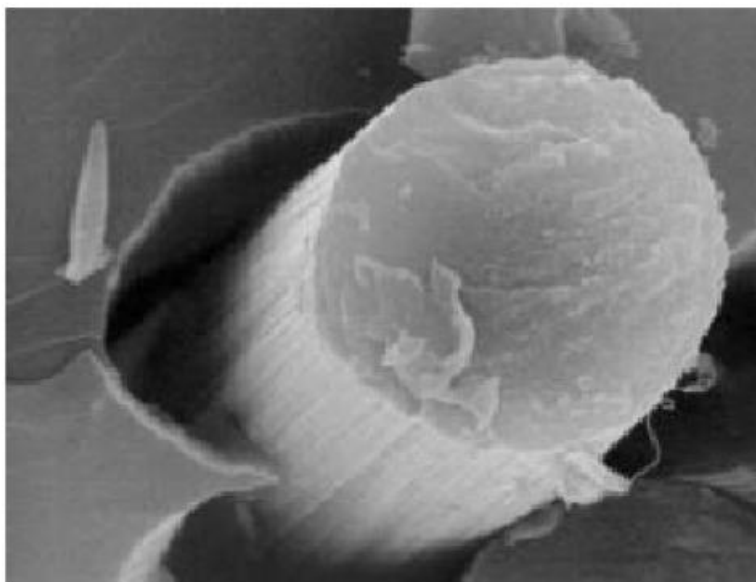
شکل ۱-۳- ترک ماتریسی در یک چندلایه متعامد [۳]

¹ Joffe

۳- جداسدگی بین لایه‌ای: یک شکل خرابی است که در چند لایه بین لایه‌های با جهت الیاف متفاوت مشاهده می‌شود. مایکروتترکها منجر به ایجاد نقاط تمرکز تنش در نوک ترک به هنگامیکه ترکها بین دو لایه با جهات الیاف مختلف محصور شده باشد می‌شود. جداسدگی بین لایه‌ای می‌تواند با گسترش در اینترفیس منجر به اتصال ترکهای ماتریسی به همدیگر شوند.

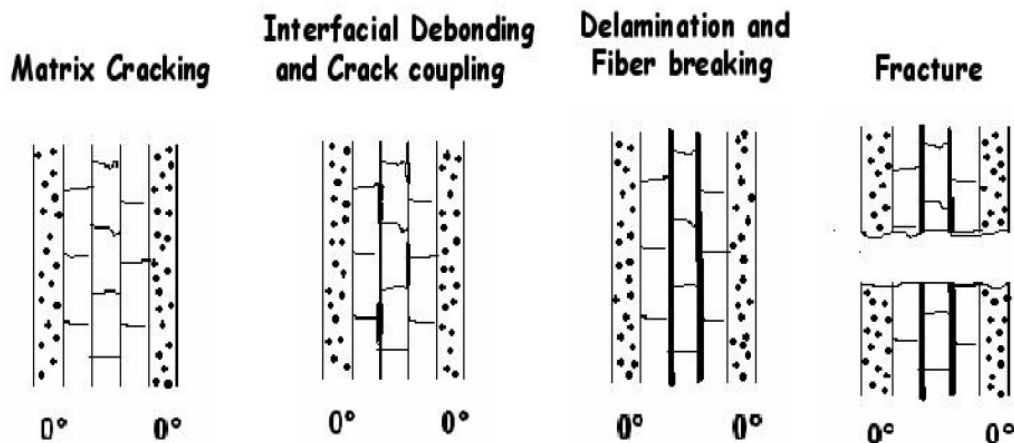
۴- شکست الیاف: هنگامیکه یک ماده مرکب تحت بار کششی قرار می‌گیرد در ابتدا ترک ماتریسی شکل می‌گیرد. این مایکروتترکها منجر به جداسدگی بین لایه‌ای و شکست الیاف می‌شود که شکست الیاف مود خرابی بعد از جداسدگی بین لایه‌ای می‌باشد. از آنجاییکه لایه‌هایی که ترک در آنها شکل نمی‌گیرد می‌بایست تمامی بار را تحمل کنند در نتیجه در ادامه در این لایه‌ها شکست الیاف شکل می‌گیرد.

۵- کشیدگی الیاف: این شکل خرابی قبل از شکست الیاف مشاهده می‌شود. در این حالت الیاف تحت بار کششی از درون ماتریس به بیرون کشیده می‌شوند. شکل ۱-۴ هر دو حالت شکست الیاف و کشیدگی الیاف را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴- شکست الیاف و کشیدگی الیاف در اثر اتصال ضعیف بین اینترفیس و ماتریس [۳]

۶- شکست نهایی: مرحله نهایی خرابی حالتی است که ماده کاملاً دچار شکست می‌شود. شکل ۵-۱ خرابیهای گوناگون مشاهده شده در مواد مرکب را تحت تنشهای محوری کششی نشان می‌دهد.



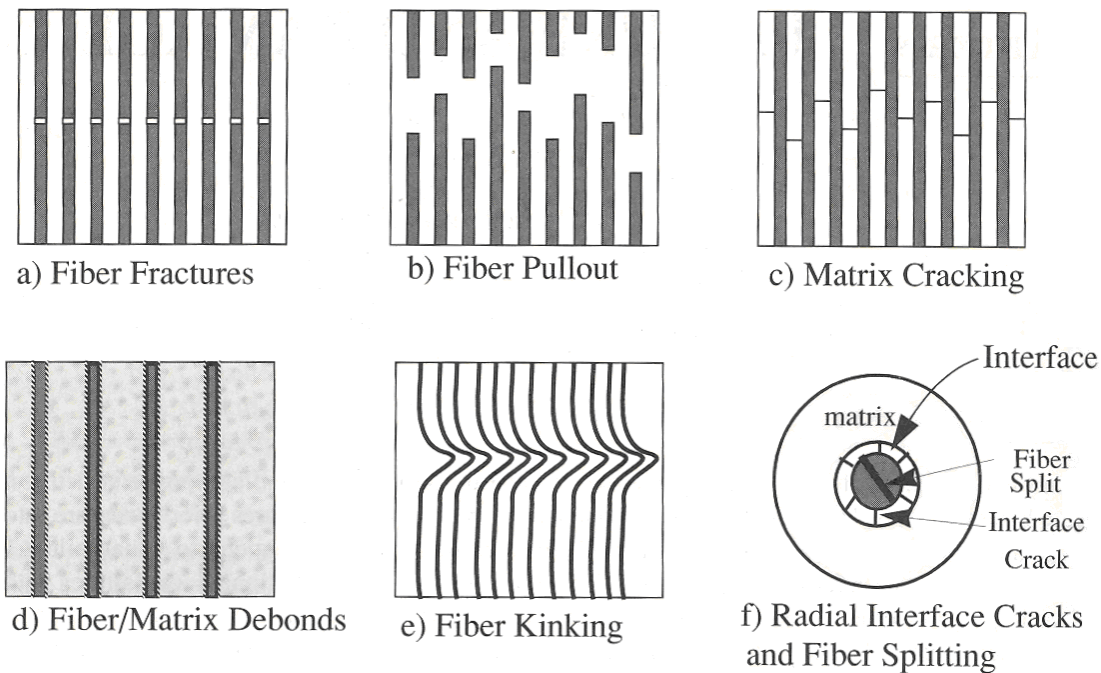
شکل ۵-۱- مودهای خرابی در یک ماده مرکب [۳]

همانگونه که گفته شد یکی از معایب استفاده از مواد مرکب، مکانیزمهای خرابی^۱ مختلف و محتمل در آنها می‌باشد. قبل از استفاده از هر تئوری خرابی، لازم است که حالت نهایی فرایند خرابی به دقت تعریف گردد. مواد نرم عموماً به سبب ایجاد و رشد خرابیهای مقیاس کوچک و در نهایت به هم پیوستن این خرابیها دچار شکست می‌شوند. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که مجموعه خرابیهای مقیاس کوچک تمایل به شکل‌گیری و تشکیل خرابیهای محلی را دارند که این خرابی ها پیش زمینه شکست نهایی می‌شوند. این پدیده فیزیکی پیشرونده که باعث کاهش خواص ماده می‌گردد معمولاً به دلیل وجود خرابیها می‌باشد.

¹ Damage

امروزه مطالعه و مدلسازی مکانیزمهای خرابی برای شکست سازه‌های مواد مرکب لایه‌ای تحت بارگذاری‌های پیچیده در حال انجام می‌باشد. یک اصل مهم در طراحی مواد مرکب محاسبه مکانیزمهای خرابی برای یک سازه مواد مرکب تحت بارگذاری پیچیده در هر نقطه و هر زمان تا شکست نهایی می‌باشد که این شکست پس از کرنش و خرابی محلی ایجاد می‌گردد.

خرابی‌ها در اثر توسعه تدریجی میکروتَرَکها می‌توانند عرضی و یا بگونه دیگر باشند که تبدیل به ماکروتَرَکها شده و در نهایت باعث شکست می‌گردند. واژه "خرابی" در حالت کلی به رشد پیش‌رونده میکروتَرَکها و حفره‌های ریز اطلاق می‌گردد که منجر به ترکهای ماکرو گردیده و در نهایت شکست سازه اتفاق می‌افتد. مهمترین موضوع در بررسی خرابی در مواد مرکب، انتخاب مقیاسی است که ماده مرکب در آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سه مقیاس مهمی که در آنها به مطالعه رفتار مواد مرکب پرداخته شده عبارتند از مقیاس میکرو، مقیاس مزو و مقیاس ماکرو. در مقیاس "میکرو" خرابی مواد مرکب شامل شکست فایبر، از بین رفتن اتصال فایبر و ماتریس، کمانش فایبر، دو نیم شدن فایبر، کشیدگی فایبر، ترکهای ماتریسی و ترکهای شعاعی می‌باشند. این خرابی‌ها بصورت شماتیک در شکل ۱-۶ آمده است.



شکل ۱-۶- مکانیزم‌های خرابی در مقیاس میکرو [۱]

در مقیاس لایه‌ای از بین موارد ذکر شده می‌توان مهمترین خرابیها را بصورت زیر و توسط چهار سناریو معرفی کرد:

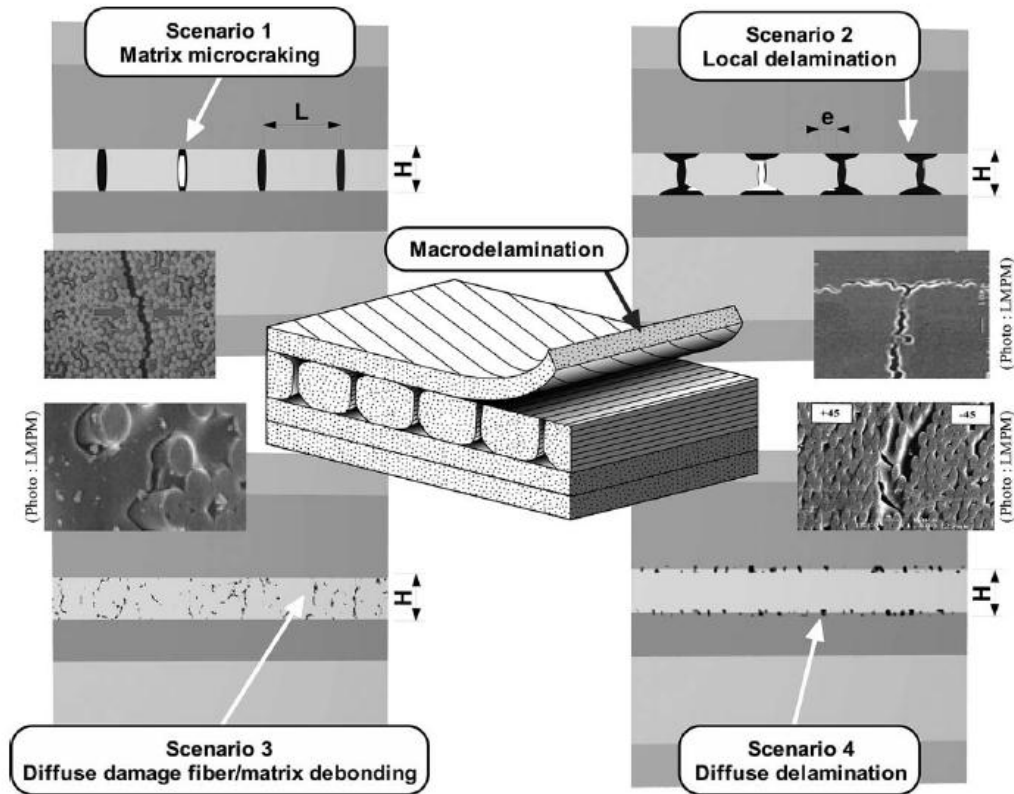
سناریوی ۱: ترکهای عرضی که در تمام طول ضخامت یک لایه و تقریباً موازی با یکدیگر قرار می‌گیرند [۵]. همچنین این ترکها بطور تکراری اتفاق افتاده‌اند.

سناریوی ۲: جداشدگی بین لایه‌ای محلی که این حالت مربوط به خراب‌شدگی بین لایه‌ای در نوک ترکهای عرضی می‌باشد. این شکل خرابی نیز بصورت تکرار شونده در نظر گرفته می‌شوند.

سناریوی ۳: جداشدن اتصال بین فایبر و ماتریس، این حالت یک مکانیزم اساسی به منظور شرح رفتار لایه مخصوصاً تحت بار برشی می‌باشد.

سناریوی ۴: ابعاد کوچکتری از سناریوی ۲ که در این حالت حفره‌های ریز ایجاد می‌شوند.

بنابراین در دیدگاه مایکرو مهمترین مکانیزمهای خرابی به این چهار حالت بر می‌گردد. لازم به ذکر است که خرابی اساساً با سناریوی ۳ و ۴ شروع گشته و پس از مدتی سناریوی ۱ شروع می‌شود. در نهایت مابین سناریوی ۱ و ۲ رقابت ایجاد شده و در نهایت سناریوی ۲ شکل می‌گیرد. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که مرتبه و زمان شروع هر مود خرابی تحت تاثیر پارامترهای مختلفی نظیر هندسه چندلایه و ضخامت لایه‌های مختلف [۶ و ۷]، طبیعت الیاف و نگهدارنده و نوع بارگذاری و تاریخچه آن [۸] می‌باشد.



شکل ۱-۷- مهمترین مکانیزمهای خرابی مقیاس میکرو [۴]

سختی الیاف‌های تقویت شده به طور قابل توجهی خیلی بیشتر از ماتریس مواد می‌باشد، هنگامی که یک لایه در جهت عرض بار گذاری میشود، در ماتریس کرنش قابل توجهی رخ می‌دهد. این کرنش در هنگام وقوع شکست در لایه‌های خارج از محور کمتر از لایه‌هایی است که هم تراز در جهت عرض بارگذاری می‌باشند. ترک عرضی می‌تواند با لایه‌های صفر و یا نود درجه شروع شود (شکل ۱-۸). به دلیل عدم تطبیق در نسبت پواسون صفحه‌ای در لایه‌های طولی و عرضی، ترک‌های عرضی در لایه‌های طولی نیز ظاهر می‌شوند. نوع‌های مشابه دیگر از خرابی در چند لایه‌ی رخ می‌دهد که در معرض خستگی، باریکی دمایی و انواع دیگر بارگذاری ها هستند. برای فهمیدن این نوع خرابی‌ها در مواد پیشرفته روش‌های طراحی کارآمدتری ضروری است. در کل سازه‌های کامپوزیتی با استفاده از معیار شکست لایه اول (FPF) طراحی می‌شود که صفحه مورد نظر را برای حالتی در نظر می‌گیریم که شکست در یک تک لایه اتفاق می‌افتد است.