



دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه جهت دریافت مدرک کارشناسی مهندسی مکانیک

تحلیل و بررسی حرکت دینامیکی

دیسک دوار با آلیاژهای مختلف

تقدیم به

پدران و مادرانمان که در طول این سال‌ها زحمتهای بسیاری
کشیده‌اند، دوستان داریم و دستان پر مه‌رتان را می‌بوسیم .

چکیده

تحلیل و بررسی حرکت دینامیکی دیسک دوار و به دست آوردن ضریب خطا با استفاده از نرم افزار و بدون استفاده از نرم افزار و مقایسه آن دو با هم. مقایسه، بین دو آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت فیبرکربن در بعدها و شرایط مساوی که با فرض شعاع ۵۰ میلی متر و سرعت زاویه ای 25 رادیان بر ثانیه صورت گرفته است.

نتیجه مهم به دست آمده، محاسبه ضریب خطای بین محاسبه های انسانی و نرم افزاری می باشد برای استفاده بهینه و ایمنی بالاتر در صنعت بوده.

نمادها

| | |
|------------|---------------------------------|
| ϵ | کرنش |
| S | جابه‌جایی (mm) |
| E | مدول یانگ (Gpa) |
| G | مدول الاستیک (Gpa) |
| ρ | دانسیتته (Mpa/m^3) |
| ω | سرعت زاویه ای ($radins/time$) |

فهرست مطالب

فصل اول

مقدمه و تاریخچه ۲۱

فصل دوم

معرفی مواد کامپوزیتی..... ۲۳

مقدمه ۲۴

تعریف کامپوزیت ۲۵

اجزای یک ماده کامپوزیتی ۲۶

زمینه ۲۶

زمینه‌های فلزی ۲۷

زمینه‌های پلیمری ۲۸

زمینه‌های سرامیکی ۳۰

| | |
|---------|--|
| ۳۰..... | تقویت کننده |
| ۳۱..... | فصل مشترک |
| ۳۲..... | طبقه بندی کامپوزیت ها براساس ساختار..... |
| ۳۲..... | کامپوزیت های ذره ای |
| ۳۴..... | کامپوزیت های الیافی |
| ۳۷..... | کامپوزیت های ساختاری |
| ۳۷..... | کامپوزیت های لایه ای |
| ۳۸..... | کامپوزیت های با صفحه های ساندویچی |
| ۳۹..... | خاصیت کامپوزیت ها |

فصل سوم

| | |
|---------|---------------------------------------|
| ۴۰..... | کامپوزیت های زمینه فلزی |
| ۴۱..... | مقدمه |
| ۴۲..... | مواد زمینه در کامپوزیت زمینه فلزی |
| ۴۴..... | زمینه آلومینیوم |
| ۴۴..... | خاصیت کامپوزیت زمینه آلومینیوم |
| ۴۴..... | روش های ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیوم |
| ۴۶..... | زمینه منیزیم |
| ۴۶..... | تقویت کننده های کامپوزیت زمینه منیزیم |
| ۴۶..... | ویژگی های کامپوزیت زمینه منیزیم |
| ۴۶..... | منیزیم تقویت شده با ذره های SiC |

| | |
|---------|---|
| ۴۷..... | کاربرد |
| ۴۷..... | زمینه تیتانیوم |
| ۴۷..... | تقویت کننده‌های کامپوزیت زمینه تیتانیوم |
| ۴۷..... | کاربرد |
| ۴۸..... | زمینه مس |
| ۴۸..... | تقویت کننده‌های کامپوزیت زمینه مس |
| ۴۸..... | خاصیت کامپوزیت‌های زمینه مس |
| ۴۹..... | کاربرد |
| ۵۰..... | کامپوزیت‌های زمینه سوپر آلیاژی |
| ۵۰..... | تقویت کننده‌های کامپوزیت‌های زمینه فلزی |
| ۵۰..... | تقویت کننده‌های کامپوزیت‌های زمینه فلزی MMC به ۵ دسته تقسیم می‌شوند |
| ۵۰..... | تقویت کننده الیاف پیوسته و ناپیوسته |
| ۵۲..... | ویسکرها |
| ۵۳..... | ذره‌ها |
| ۵۳..... | سیم‌ها |
| ۵۴..... | فرآیندهای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی MMC |
| ۵۵..... | مراحل فرآیند |
| ۵۵..... | پیش فرآیند |
| ۵۶..... | فرآیند اولیه |
| ۵۶..... | فرآیند ثانویه |

| | |
|----------|----------------------------|
| ۵۶..... | فرآیند حالت جامد |
| ۵۶..... | اتصال دیفوزیونی |
| ۵۸ | روش متالورژی پودر..... |
| ۵۸..... | روش پیچی |
| ۵۸..... | روش پوشش پودری |
| ۵۹..... | تحکیم پودر |
| ۵۹..... | زینترکردن |
| ۵۹..... | پرس گرم |
| ۵۹..... | پرس سرد |
| ۵۹..... | پرس ایزواستاتیک گرم |
| ۵۹..... | پرس ایزواستاتیک سرد |
| ۵۹..... | نورد پودر |
| ۶۰..... | اکستروژن پودر |
| ۶۰..... | فورجینگ پودر |
| ۶۱..... | فرآیند حالت مایع |
| ۶۱..... | درون تراوری فلز مایع |
| ۶۲..... | ریخته‌گری فشاری |
| ۶۳..... | روش هم نشست پاششی |
| ۶۴..... | ریخته‌گری تلاطمی |
| ۶۵..... | ریخته‌گری ترکیبی |

| | |
|---------|-------------------------------------|
| ۶۶..... | فرآیندهای رسوبی |
| ۶۷..... | فرآیندهای دوفازی |
| ۶۸..... | نمونه‌هایی از کامپوزیت‌های فلزی MMC |

فصل چهارم

| | |
|---------|--|
| ۷۰..... | فیبرکربن |
| ۷۱..... | مقدمه |
| ۷۱..... | تاریخچه |
| ۷۲..... | موارد مصرف فیبرکربن |
| ۷۳..... | چند نمونه از محصولاتی که در ساخت آن‌ها از الیاف فیبرکربن استفاده شده است |
| ۷۴..... | طبقه‌بندی فیبرهای کربنی |
| ۷۵..... | ماده خام |
| ۷۶..... | تقسیم‌بندی و فرآیند تولید الیاف فیبرکربن |
| ۷۷..... | ریسندگی |
| ۷۷..... | تقویت کردن |
| ۷۸..... | کربونیزه کردن |
| ۷۸..... | آماده سازی |
| ۷۸..... | سایز کردن |
| ۷۹..... | کنترل کیفیت |
| ۷۹..... | بهداشتی و ایمنی |
| ۸۰..... | آینده و تکنولوژی |

فصل پنجم

- ۸۱..... خاصیت آلومینیوم و آلیاژهای آن
- ۸۲..... فلز آلومینیوم
- ۸۴..... تاریخچه و روش استخراج آلومینیوم
- ۸۶..... خاصیت شگفت‌انگیز آلومینیوم
- ۸۷..... وزن مخصوص کم
- ۸۸..... هدایت حرارتی بالا
- ۸۹..... مقاومت زیاد در مقابل خوردگی
- ۹۰..... شکل‌پذیری با روش‌های مختلف
- ۹۰..... نقطه ذوب متفاوت آلیاژهای آلومینیوم
- ۹۱..... افزایش استحکام در دماهای پایین
- ۹۲..... نسبت استحکام به وزن بالا
- ۹۴..... استحکام نسبی
- ۹۵..... مدول الاستیک
- ۹۵..... پارامتر سفتی
- ۹۶..... درصد ازدیاد طول
- ۹۷..... استحکام فشاری، پیچشی و سختی در آلیاژهای آلومینیوم
- ۹۹..... شکل‌پذیری بالا
- ۱۰۰..... چقرمگی شکست در آلومینیوم
- ۱۰۱..... قابلیت بازیافت آلومینیوم

- تعریف آلیاژ ۱۰۲
- روش‌های افزایش استحکام آلومینیوم ۱۰۲
- تاثیر عناصر آلیاژی ۱۰۳
- مس ۱۰۳
- سیلیسیم ۱۰۳
- تیتانیوم ۱۰۳
- استرانسیم ۱۰۳
- آنتیموان ، سدیم ۱۰۳
- طبقه‌بندی آلیاژهای آلومینیوم ۱۰۴
- گروه 1xxx : آلومینیوم خاص ۱۰۴
- ویژگی‌ها ۱۰۴
- گروه 2xxx : آلیاژهای Al-Cu ۱۰۵
- ویژگی‌ها ۱۰۵
- گروه 7xxx : آلیاژهای Al-zn ۱۰۶
- ویژگی‌ها ۱۰۶
- آلیاژهای آلومینیوم – لیتیم (Al-Li) ۱۰۷
- مشخصه‌های کلی گروه‌های آلیاژهای ریخته‌گری آلومینیوم ۱۰۷
- گروه 2xx.x : آلیاژهای Al-Cu ۱۰۸
- ویژگی‌ها ۱۰۸
- گروه 3xx.x : آلیاژهای (Al-Si+Cu or Mg) ۱۰۹

| | |
|----------|---|
| ۱۰۹..... | ویژگی‌ها |
| ۱۰۹..... | صنایع هوا - فضا و هواپیماسازی |
| ۱۱۰..... | آلیاژهای آلومینیومی مصرفی در هواپیماسازی |
| ۱۱۴..... | صنایع خودروسازی |
| ۱۱۸..... | آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده در بدنه داخلی خودرو |
| ۱۲۱..... | صنایع حمل‌ونقل ریلی |
| ۱۲۲..... | ترن و قطارهای مسافربری |
| ۱۲۶..... | آلیاژهای آلومینیوم مصرفی در حمل‌ونقل ریلی |

فصل ششم

| | |
|----------|---------------------------------------|
| ۱۲۸..... | محاسبات |
| ۱۲۹..... | مقدمه |
| ۱۳۱..... | برنامه متلب برای محاسبه فلز آلومینیوم |
| ۱۳۲..... | برنامه متلب برای محاسبه فیبرکربن |

فصل هفتم

| | |
|----------|------------|
| ۱۳۳..... | آباکوس |
| ۱۳۴..... | مقدمه |
| ۱۳۸..... | نتیجه‌گیری |
| ۱۳۹..... | منابع |

فهرست شکل‌ها

فصل دوم

- شکل ۱-۲ اثر افزایش تقویت‌کننده بر انواع کامپوزیت‌ها ۳۰
- شکل ۲-۲ شماتیکی از مشخصه‌های تقویت‌کننده موثر بر خاصیت‌های کامپوزیت‌ها ۳۱
- شکل ۳-۲ اثر اندازه ذره‌ها در استحکام‌دهی کامپوزیت‌ها ۳۳
- شکل ۴-۲ نمونه تغییر شکل در زمینه اطراف الیاف تحت بار کششی ۳۴
- شکل ۵-۲ مقطع‌های تنش - کرنش طول الیاف ۳۵
- شکل ۶-۲ نحوه کارایی الیاف ۳۶
- شکل ۷-۲ الیاف پیوسته هم‌جهت ۳۶
- شکل ۸-۲ الیاف پیوسته غیر هم‌جهت ۳۶
- شکل ۹-۲ الیاف ناپیوسته هم‌جهت ۳۷
- شکل ۱۰-۲ الیاف ناپیوسته غیر هم‌جهت ۳۷
- شکل ۱۱-۲ اجزای کامپوزیت لایه‌ای ۳۷
- شکل ۱۲-۲ کامپوزیت ساندویچی با هسته لانه زنبوری ۳۸

شکل ۲-۱۳ نحوه ساخت هسته لانه زنبور عسل ۳۹

فصل سوم

شکل ۳-۱ زمینه آلومینیوم با الیاف بر ۴۵

شکل ۳-۲ زمینه آلومینیوم با الیاف کوتاه کربن ۴۵

شکل ۳-۳ فرآیندهای ساخت کامپوزیت زمینه فلزی ۵۵

شکل ۳-۴ فرآیند ریخته‌گری با یک ماشین عمومی ۶۳

شکل ۳-۵ تجهیزات هم نشست پاششی ۶۴

شکل ۳-۶ ساخت MMC به روش ریخته‌گری تلاطمی ۶۵

شکل ۳-۷ ریخته‌گری ترکیبی : الیاف یا ذره‌های مخلوط با فنر ۶۶

شکل ۳-۸ پروانه ساخته شده از Ti/SiC ۶۸

شکل ۳-۹ چند راهی اتصال ۶۸

شکل ۳-۱۰ قطعه‌های کامپوزیت فلزی مورد استفاده در صنایع الکترونیک ۶۹

فصل پنجم

شکل ۵-۱ ساختار کریستالی فلز آلومینیوم ۸۲

شکل ۵-۲ تولید پره‌های آلومینیومی مبدل‌های حرارتی از روش لحیم‌کاری خاص ۹۱

شکل ۵-۳ مقایسه سفتی در مقطع‌های آلومینیوم و فولاد ۹۶

شکل ۵-۴ درصد تغییر طول در آلیاژهای آلومینیوم ۹۷

شکل ۵-۵ استحکام برشی، فشاری و پیچشی و نیز سختی آلیاژهای مختلف آلومینیوم ۹۹

شکل ۵-۶ تست Erichsen برای اندازه‌گیری میزان شکل‌پذیری آلومینیوم ۹۹

- شکل ۵-۷ میزان جذب انرژی ضربه بالا در آلیاژهای آلومینیوم ۱۰۰
- شکل ۵-۸ میزان مصرف آلومینیوم در هواپیمای ایرباس A380
..... ۱۱۲
- شکل ۵-۹ موارد مصرف آلیاژهای آلومینیوم - لیتیم در هواپیمای مسافربری ۱۱۴
- شکل ۵-۱۰ موارد مصرف آلیاژهای آلومینیوم - لیتیم در هواپیمای جنگی ۱۱۴
- شکل ۵-۱۱ موتور آلومینیومی پورش ۱۱۷
- شکل ۵-۱۲ موتور آلومینیومی Audi2 ۱۱۷
- شکل ۵-۱۳ اجزای مختلف آلومینیوم مصرفی در یک خودروی سواری ۱۱۸
- شکل ۵-۱۴ بدنه آلومینیومی Audi2 ۱۲۰
- شکل ۵-۱۵ بدنه آلومینیومی Audi8 ۱۲۰
- شکل ۵-۱۶ ترن سریع السیر Acela مجهز به سیستم کج‌شونده در پیچ‌ها ۱۲۳
- شکل ۵-۱۷ ترن سریع السیر پیشرفته Maglev ۱۲۴

فصل هفتم

- شکل ۷-۱ تنش دیسک دوار بازه متلب (آلومینیوم) ۱۳۴
- شکل ۷-۲ تنش دیسک دوار تحلیل با آباکوس (آلومینیوم) ۱۳۴
- شکل ۷-۳ جابه‌جایی دیسک دوار بازه متلب (آلومینیوم) ۱۳۵
- شکل ۷-۴ جابه‌جایی دیسک دوار تحلیل با آباکوس (آلومینیوم) ۱۳۵
- شکل ۷-۵ تنش دیسک دوار در بازه متلب (فیبرکربن) ۱۳۶
- شکل ۷-۶ تنش دیسک دوار تحلیل با آباکوس (فیبرکربن) ۱۳۷
- شکل ۷-۷ جابه‌جایی دیسک دوار بازه متلب (فیبرکربن) ۱۳۷

فهرست نمودارها

فصل دوم

- نمودار ۱-۲ انواع کامپوزیت ۲۷
- نمودار ۲-۲ کامپوزیت زمینه مس با ذره‌های تنگستن ۳۳

فصل سوم

- نمودار ۱-۳ مواد کامپوزیت زمینه فلزی ۴۲
- نمودار ۲-۳ مراحل فرآیند اتصال دیفوزیونی ۵۷
- نمودار ۳-۳ مراحل ساخت کامپوزیت به روش متالورژی پودر ۶۰
- نمودار ۴-۳ درصد استفاده از فرآیندهای اولیه و ثانویه ۶۷
- نمودار ۵-۳ فرآیند ساخت مواد در کاربردهای مختلف ۶۷

فصل پنجم

- نمودار ۱-۵ میزان فراوانی عناصر شیمیایی اصلی در پوسته زمین ۸۳
- نمودار ۲-۵ مقایسه هدایت حرارتی در فلزهای مختلف ۸۸

- نمودار ۳-۵ مقاومت به خوردگی آلومینیوم در محیط‌های مختلف ۸۹
- نمودار ۴-۵ تغییرهای استحکام کششی آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم در دماهای پایین ۹۱
- نمودار ۵-۵ مقایسه استحکام کششی و نسبت استحکام به وزن مواد مختلف ۹۳
- نمودار ۶-۵ منحنی تنش - کرنش آلومینیوم و فولاد ۹۴
- نمودار ۷-۵ میزان مصرف آلومینیوم در یک خودروی سواری در اروپا در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ ۱۱۶

فصل هفتم

- نمودار ۱-۷ تنش - جابه‌جایی آلومینیوم ۱۳۶
- نمودار ۲-۷ تنش - جابه‌جایی فیبرکربن ۱۳۸

فهرست جدول‌ها

فصل دوم

- جدول ۱-۲ مزایا و محدودیت‌های مواد زمینه پلیمری ۲۸
- جدول ۲-۲ درجه حرارت‌های کاربردی بعضی مواد زمینه ۲۹
- جدول ۳-۲ مقایسه کاربرد درجه حرارت و چگالی ۲۹

فصل سوم

- جدول ۱-۳ استحکام کششی نهایی کامپوزیت‌های کاربید سیلیسیم - آلومینیوم ۴۹
- جدول ۲-۳ مدول کشسانی و استحکام کششی کامپوزیت آلومینیوم - بر ۵۱
- جدول ۳-۳ مدول کشسانی و چگالی کامپوزیت‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ گرافیت ۵۱
- جدول ۴-۳ مدول کشسانی و استحکام تسلیم آلومینیوم تقویت‌شده با ویسکر Sic ۵۲
- جدول ۵-۳ خاصیت‌های چند نمونه از کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۵۴

فصل پنجم

- جدول ۵-۱۱ اختلاف چگالی ها ۸۸
- جدول ۵-۲ ترکیب آلیاژهای آلومینیوم مصرفی در هواپیما ۱۱۲
- جدول ۵-۳ نمونه مقادیر تنش تسلیم و کاربردهای آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده
در بدنه و ساختمان اتومبیل ۱۱۹
- جدول ۵-۴ خلاصه‌ای از خاصیت آلومینیوم در صنعت حمل‌ونقل ریلی ۱۲۵

فصل اول

مقدمه و تاریخچه

در این پروژه به تحلیل و بررسی حرکت دینامیکی دیسک دوار از نظر تغییر شکل و میزان تنش و کرنش به وجود آمده در قطعه توسط حرکت چرخشی بر روی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد البته این بررسی‌ها در دو آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت و همچنین در شکل‌های مختلف صورت خواهد گرفت.

تنش، کرنش و از عوامل مهمی هستند که باعث ضعیف شدن استحکام یک قطعه و یا شکست آن می‌شوند. این عوامل به خاصیت‌های مکانیکی قطعه بستگی دارند، خاصیت‌هایی مانند چگالی، استحکام کششی، استحکام برشی و ... مواد مختلف دارای خاصیت‌های متفاوتی هستند.

در این تحلیل از آلومینیوم و کامپوزیت به عنوان مواد پایه استفاده شده است که از نظر تعوری تحلیل (مقاومت مصالحی) و به صورت عملی با نرم افزار کاربردی (آباکوس) با هم مقایسه می‌گردند.

فصل دوم

معرفی مواد کامپوزیتی

مقدمه

متجاوز از سی سال است که مواد کامپوزیتی، پلاستیک‌ها و سرامیک‌ها به عنوان مواد برتر شناخته شده‌اند. حجم کاربرد مواد کامپوزیت به‌طور پیوسته رشد پیدا کرده و در بازارهای جدید نفوذ و تسخیر زیادی داشته است. بسیاری از نیازهای صنعتی، مانند صنایع فضایی، راکتورسازی، الکترونیکی، ساختمان‌سازی، حمل‌ونقل و . . . نمی‌توانند با استفاده از مواد معمولی برآورده شود و نیاز به تغییر گسترده خاصیت‌ها دارد. از طرف دیگر در کاربردهای مهندسی اغلب تلفیق خاصیت‌ها، مورد نیاز است. به عنوان مثال در صنایع هوافضا، کاربردهای زیرآبی، حمل‌ونقل و . . . امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خاصیت‌ها مورد نظر را فراهم نماید، وجود ندارد. در این صنایع به موادی نیاز است که ضمن استحکام بالا، سبک باشند. مقاومت سایشی و مقاومت به ضربه خوبی داشته باشند. بنابراین استفاده از کامپوزیت‌ها تنها راه‌حل مشکل نیست. اخیراً در صنعت کامپوزیت، با نوآوری و تغییر در تکنیک‌های ساخت، در جهت ایجاد اجزای کامپوزیتی که از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است، تلاش‌های فراوانی صورت گرفته است، بدیهی است که فقط بهسازی در تکنولوژی ساخت، هزینه‌ها را کاهش نخواهد داد و ضروری است که تلاش در تمام فرآیندهای اولیه طراحی، مواد، فرآیند تولید، ابزار، تضمین کیفیت، ساخت و حتی برنامه مدیریت کامپوزیت‌ها انجام شود تا رقیبی بی‌نظیر برای فلزها باشند.

علاوه بر توانمند شدن کامپوزیت به‌وسیله مواد با زمینه پلیمری جدید، افزایش بازدهی الیاف تقویت‌کننده، مانند شیشه، کربن و آرامید، نیز باعث نفوذ این مواد پیشرفته و توسعه پایدار در حجم تولید و مصرف گردیده است.

تولید در حجم زیاد باعث کاهش در هزینه‌ها می‌شود. اکنون افزایش بازدهی FRPها می‌تواند در موارد گوناگونی، مانند زره کامپوزیتی طراحی شده برای مقابله با فشار انفجار، سیلندرهای سوخت برای حمل گازهای طبیعی، تیغه‌های آسیاب بادی، شفت‌های گردان صنعتی، تیرک‌های محافظ در بزرگ‌راه‌ها و حتی غلتک‌های ساخت کاغذ یافت شود.

استفاده از کامپوزیت‌ها بیش‌تر از فلزها باعث صرفه‌جویی در هزینه و وزن می‌گردد. موارد متعددی از این نوع صرفه‌جویی در موتورهای اعمال شده است، انحنای ظریف و پخ‌های مناسب، با استفاده از مواد کامپوزیتی به جای قسمت‌های فلزی جوشکاری شده، در سیلندرهای تیوپ‌ها، لوله‌های آب، تسمه‌های نگه‌دارنده، تیغه‌ها و . . . جانشین شده‌اند.

به‌علاوه، نیاز به کامپوزیت برای مواد ساختمانی سبک‌تر و ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله آن‌ها را در درجه اهمیت بالایی قرار داده است. مواد پیشرفته جدید نه فقط وزن خنثی (غیر فعال) را کم می‌کنند، بلکه تکان‌ها و لرزه‌ها را نیز از ساختار میکروسکوپی جذب می‌کنند.

برخلاف مواد معمولی (مثل فولاد) خاصیت‌های مواد کامپوزیتی این امکان را ایجاد می‌کند که بتوانند جهت بهسازی وضع ساختمان طراحی شوند. طراحی یک کامپوزیت مورد استفاده در ساختمان، طرح ساختمان و ماده را به هم مربوط می‌کند. خصوصیات کامپوزیت (مثل سفتی، انبساط گرمایی و . . .) می‌تواند به‌طور پیوسته در محدوده وسیعی از مقادیر تحت کنترل طراح تغییر کند. انتخاب درست نوع تقویت‌کننده قادر است ویژگی‌های محصول را تکمیل کند تا برای هر نوع نیاز مهندسی خاص مناسب گردد.

در حالی که در بسیاری از موارد، استفاده از کامپوزیت‌ها یک انتخاب درست می‌باشد، ولی این انتخاب به فاکتورهایی مانند پیچیدگی شکل محصول، امکان صرفه جویی در هزینه‌های مونتاژ، مهارت و تجربه طراح در بهره‌برداری از پتانسیل بهینه کامپوزیت‌ها، وابسته خواهد بود.

تعریف کامپوزیت

یک ماده کامپوزیت، مخلوط فیزیکی در مقیاس ماکروسکوپی است که از دو یا چند ماده مختلف بدست آمده است. این مواد خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده ولی در مجموع، مخلوط، خاصیت‌های بهتری از هر یک از اجزای تشکیل دهنده خود دارا می‌باشد.

به‌طور کلی، یک ماده کامپوزیت، ترکیبی است از تقویت‌کننده (الیاف، ذره‌ها، ورق پوسته‌ای و یا پرکننده‌ها) که در زمینه (پلیمر، فلز و یا سرامیک) فرو رفته باشد. زمینه، تقویت‌کننده را نگه می‌دارد تا فرم مورد نیاز تشکیل شود، در حالی که تقویت‌کننده‌ها، خاصیت‌های مکانیکی کلی زمینه را بهبود می‌بخشد. اگر طراحی مناسب باشد، ماده ترکیبی جدید خاصیت‌های بهتری را از ماده ترکیب نشده قبلی نشان می‌دهد.

طبق تعریف چارتیز، کامپوزیت‌ها مواد چند منظوره‌ای هستند که خصوصیتی را که مواد در حالت ترکیب نشده ندارند را فراهم می‌کنند. آن‌ها ساختارهایی به هم چسبیده‌اند و به‌وسیله ترکیب فیزیکی از دو یا چند ماده همسان، به دست آمده‌اند که در ترکیب و ویژگی‌ها و گه‌گاه در شکل متفاوت می‌باشند.

طبق نظر Kelly، اهمیت آن بسیار واضح است که کامپوزیت‌ها نباید به‌طور ساده ترکیبی از دو ماده انگاشته شوند. در مفهوم کلی‌تر، ترکیب، ویژگی‌های برتر آن‌ها را دربر دارد. به اصطلاح، دوام یا پایداری در گرما یا در بعضی شرایط مطلوب، ترکیب بهتر از هر جز تنهای اولیه آن‌هاست.

Berghezan، تعریف می‌کند که «کامپوزیت‌ها ترکیبی از مواد هستند، که با آلیاژها متفاوت‌اند. به‌خاطر این‌که اجزای تشکیل دهنده، خصوصیاتشان را حفظ می‌کنند اما به‌طور پیوسته در ترکیب کامپوزیت می‌باشند، تا فقط مزایای خاصیت‌های آن‌ها را بگیرند نه از کاستی و کمبودشان» به این منظور مواد بهتری را حاصل می‌کنند.

VanSuchetclan، توضیح می‌دهد که مواد کامپوزیتی همچون مواد ناهمگن که شامل دو یا چند فاز جامد می‌باشند، در تماس با همدیگر در مقیاس میکروسکوپی هستند. آن‌ها همچنین می‌توانند همچون ماده‌های هم‌جنس در یک مقیاس میکروسکوپی که هر بخش از آن خصوصیت فیزیکی مشابه‌ای را خواهد داشت، برسند.

اجزای یک ماده کامپوزیتی

اساسی‌ترین شکل یک ماده کامپوزیتی، یکی است که در آن دو جز ترکیب شده‌اند و ماده‌ای را با خاصیت‌هایی که متفاوت از خصوصیت اجزای آن است تولید کرده‌اند. اغلب کامپوزیت‌ها شامل یک ماده حجمی (Bulk) است به نام زمینه و یک تقویت‌کننده با انواع مختلف که برای افزایش سفتی و استحکام زمینه اضافه شده است. این تقویت‌کننده معمولاً به شکل الیاف است. (شکل ۱)

زمینه

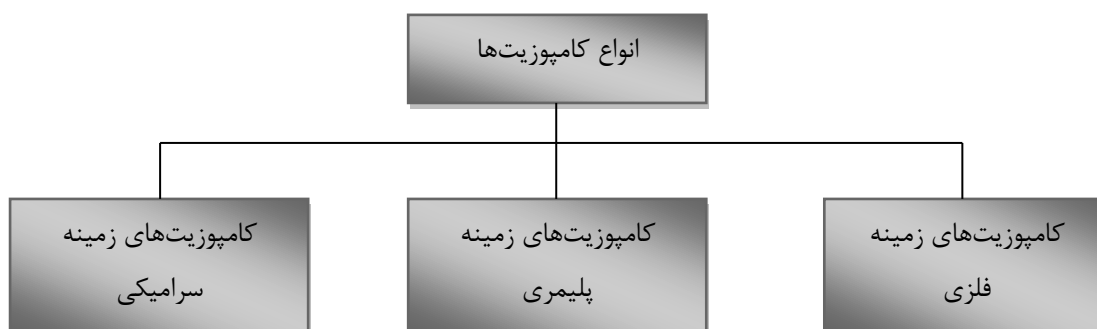
خیلی از مواد هنگامی که به صورت الیاف هستند استحکام خیلی خوبی را نشان می‌دهند، اما برای رسیدن به این خاصیت‌ها، الیاف باید به یک زمینه خوب پیوند زده شوند.

زمینه الیاف را از هم جدا می‌کند تا از ساییدگی و تشکیل عیوب سطحی جدید جلوگیری نماید و مانند پلی، الیاف را در محلی نگه‌دارد. یک زمینه خوب باید توانایی تغییر شکل تحت بار به کار رفته را دارا باشد و نیرو را به الیاف انتقال دهد و تمرکز تنش را توزیع نماید. الیاف را از صدمه‌ها محافظت نماید و از گسترش ترک در کامپوزیت جلوگیری کند.

مطالعه طبیعت نیروهای پیوندی، نشان می‌دهد که به محض اولین بارگذاری، تمایلی به چسبندگی بین تقویت‌کننده و زمینه که می‌خواهد شکسته شود، وجود دارد. این نیروهای چسبندگی برای جلوگیری از جدایش دو فاز ضروری است. جدایش الیاف از زمینه (pullout) نامیده می‌شود.

نیروهای پیوندی بین دو فاز باید به حد کافی بزرگ باشد تا از این رویداد جلوگیری کند، نیروهای پیوندی نقش مهمی را در انتقال بار دارد. زمینه معمولاً حدود درجه حرارت کار را مشخص می‌کند.

عمومی‌ترین کامپوزیت‌های ساخته شده را بر اساس نوع زمینه می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم نمود.



نمودار ۱-۲ انواع کامپوزیت

زمینه‌های فلزی

کامپوزیت‌های زمینه فلزی MMC در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه پلیمری دارای خصوصیت‌های جالبی هستند. این خصوصیت‌ها شامل مقاومت در درجه حرارت بالاتر، استحکام خمشی بالا، هدایت الکتریکی بهتر، هدایت گرمایی عالی، مقاومت سایشی زیاد و غیره می‌باشند. ولی یکی از معایب کامپوزیت‌های زمینه فلزی، چگالی بالاتر آن‌ها و با تبع خصوصیت‌های مکانیکی پایین‌تر نسبت به کامپوزیت‌های زمینه پلیمر است. مشکل قابل توجه دیگر این که تجهیزات با انرژی بالا برای ساخت چنین کامپوزیت‌هایی مورد نیاز است.

در صنعت هوافضا، روی الیاف تقویت شده با آلومینیوم و تیتانیوم تکیه شده است. بُر و در حد کمتر کاربرد سیلیسیم (SiC)، به عنوان الیاف تقویت کننده مورد تحقیق قرار گرفته است. آلیاژهای آلومینیوم تقویت شده با بُر به‌طور گسترده و به روش‌های مختلف تولید شده‌اند. تیتانیوم تقویت شده با کاربرد سیلیسیم، بُر پوشش داده شده با کاربرد سیلیسیم و حتی بریلیم، برای تیغه‌های کمپرسور استفاده می‌شوند.

خاصیت مدول کشسانی خوب به‌وسیله اتصال یک جهتی الیاف یا ویسکرها در زمینه فلزی حتی اگر اتصال بین آن‌ها ضعیف هم باشد، می‌تواند به دست آید. اما زمینه‌های فلزی قوی نسبت به هر دو زمینه فلز و زمینه پلیمری ضعیف برای ایجاد مدول خمشی خوب و مقاومت برشی ترجیح دارند.

زمینه‌های پلیمری

تعداد زیادی از مواد پلیمری، دو دسته ترموست (گرما سخت) و ترموپلاست (گرما نرم) به عنوان ماده زمینه برای کامپوزیت‌ها استفاده می‌شوند. بعضی از مزیت‌ها و محدودیت‌های اصلی زمینه (رزین‌ها) در جدول زیر نشان داده شده است.

| مزایا | محدودیت‌ها |
|-----------------------------------|-------------------------|
| چگالی پایین | استحکام خمشی پایین |
| مقاومت خوردگی خوب | محدوده حرارت کاری پایین |
| قابلیت هدایت گرمایی و الکتریکی کم | |

جدول ۱-۲ مزایا و محدودیت‌های مواد زمینه پلیمری

به طور کلی زمینه‌های پلیمری (رزین) بر اساس استحکام چسبندگی، مقاومت خستگی، مقاومت گرمایی، مقاومت به رطوبت و مقاومت شیمیایی و غیره انتخاب شده‌اند. رزین باید استحکام مکانیکی متناسب با تقویت‌کننده داشته باشد. می‌بایست استفاده از نوع فرآیند ساخت انتخاب شده و همچنین پایداری در شرایط کاری آسان باشد. جدا از این خصوصیت‌ها، زمینه رزین باید قابلیت مرطوب کردن و نفوذ کردن داخل دسته‌های الیافی که تقویت‌کننده را تشکیل می‌دهند، داشته باشد.

خاصیت‌های الکتریکی و شیمیایی و برشی یک کامپوزیت به رزین آن مربوط می‌باشد. به علاوه این طبیعت رزین است که آسیب لایه‌ها (Laminates) را در یک محیط خورنده مشخص می‌کند.

به‌طور کلی، به نظر می‌رسد که در کامپوزیت‌ها، حتی اگر کسر حجمی الیاف بالا باشد (حدود ۷۰٪)، تقویت‌کننده به‌طور کامل به‌وسیله مواد زمینه پوشش داده می‌شود و هنگامی که کامپوزیت در درجه حرارت بالا بدون حفاظ قرار می‌گیرد، این زمینه است که باید در شرایط نامطلوب مقاومت کند. البته، خاصیت‌های استحکامی کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد، که ممکن است ناشی از نفوذ درجه حرارت در پیوندهای مشترک و تداخلی باشد. بدین گونه، خاصیت مقاومت به درجه حرارت بالا، در کامپوزیت‌ها به‌طور مستقیم به زمینه ارتباط دارد تا تقویت‌کننده. جست‌وجو برای پلیمرهایی که می‌تواند در درجه حرارت بالا مقاومت نماید، افزایش درجه حرارت کاری را تا حدود $300\text{--}350^{\circ}\text{C}$ بالا می‌برد. این رنج از درجه حرارت کاری می‌تواند به وسیله پلی‌آمیدها که تنها پلیمرهای مقاوم به درجه حرارت بالا در حال حاضر است، تامین شود.

جدول ۲-۱ و ۳-۱ محدوده درجه حرارت تقریبی برای رزین‌ها و کامپوزیت‌ها را مشخص می‌کند. باید به خاطر داشت که هیچ سازشی برای طبیعت مواد زمینه، در پلیمرها وجود ندارد. مخصوصاً هنگامی که تا درجه حرارت کاربردی کامپوزیت، درجه حرارت افزایش یابد. اگر درجه حرارت کاربردی بیشتر $300\text{--}350^{\circ}\text{C}$ باشد فقط استفاده از زمینه فلز در حال حاضر تنها راه چاره است.

| محدوده | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| در مدت کوتاه ، $^{\circ}\text{C}$ | در مدت طولانی ، $^{\circ}\text{C}$ | ماده زمینه |
| ۱۰۰ | ۷۰ | پلی استر سیر نشده |
| ۲۰۰ | ۱۲۵ | اپکسی |
| ۱۶۰۰ | ۲۵۰ | فنلیک |
| ۴۰۰ | ۳۱۵ | پلی آمید |
| ۳۵۰ | ۳۰۰ | آلومینیوم |

جدول ۲-۲ درجه حرارت‌های کاربردی بعضی مواد زمینه

| چگالی mg/cm^2 | بالاترین درجه حرارت کاری $^{\circ}\text{C}$ | کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف |
|-------------------------------|---|---------------------------------|
| ۱/۴ | ۱۸۰ | کربن / اپوکسی |
| ۲/۱ | ۱۸۰ | بر / اپوکسی |
| ۲/۸ | ۳۱۰ | برسیک / آلومینیوم |
| ۱/۴ | ۳۱۰ | کربن / پلی آمید |
| ۲/۱ | ۳۱۰ | بر / پلی آمید |
| ۱/۴ | ۳۵۰ | کربن / پلی آمینو کسیلان |
| ۱۴ | ۴۰۰ | کربن / پلی بنزیاسول |
| ۳/۶ | ۵۴۰ | برسیک / تیتانیوم |
| ۵/۳ | ۹۳۰ | کربن / نیکل |
| ۲/۸_۵/۶ | ۱۸۰۰ | ویسکر / فلزها |

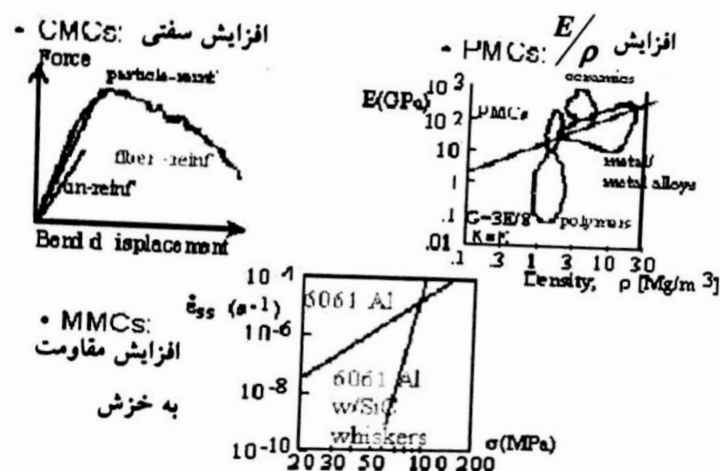
جدول ۳-۲ مقایسه کاربرد درجه حرارت و چگالی کامپوزیت‌ها

زمینه‌های سرامیکی

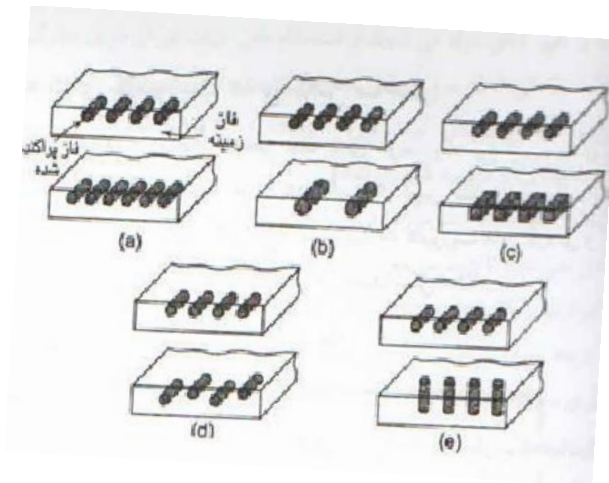
الیاف سرامیکی، مانند آلومینا و کاربید سیلیسیم در کاربرد درجه حرارت بالا و همچنین در محیط‌های خورنده، مفید هستند. از آنجایی که سرامیک‌ها خصوصیت‌های ضعیفی در کشش و برش دارند، اغلب کاربردشان به عنوان یک تقویت‌کننده در شکل‌های خاص می‌باشد. کامپوزیت‌های زمینه سرامیک (CMC) در محیط‌هایی با درجه حرارت خیلی بالا استفاده می‌شوند. در این کامپوزیت‌ها سرامیک به عنوان ماده زمینه و تقویت‌کننده با الیاف پیوسته و ناپیوسته، ویسکرها و ذره‌های کاربید سیلیسیم و نیتريد بر استفاده می‌شود.

تقویت‌کننده

نقش تقویت‌کننده در یک ماده کامپوزیتی به‌طور اساسی افزایش دادن خاصیت‌های مکانیکی زمینه است. تقویت‌کننده‌های مختلفی مانند ذره‌ها و الیاف . . . در کامپوزیت استفاده می‌شود، آن‌ها خصوصیت‌های متفاوتی دارند و بنابراین خصوصیت‌های ماده کامپوزیتی به روش‌های مختلفی اثر می‌گذارند. در حالت کلی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، افزایش تقویت‌کننده باعث افزایش تنش تسلیم σ_y ، استحکام کششی T_s و مقاومت به خزش خواهد شد. در کامپوزیت زمینه پلیمری، فاز دوم باعث افزایش مدول کشسانی E ، تنش تسلیم σ_y ، استحکام کششی T_s و مقاومت به خزش و در کامپوزیت زمینه سرامیکی باعث افزایش چقرمگی K_C خواهد شد.



شکل ۱-۲ اثر افزایش تقویت‌کننده بر انواع کامپوزیت‌ها



شکل ۲-۲ شماتیکی از مشخه‌های تقویت‌کننده موثر بر خاصیت‌های کامپوزیت‌ها را بیان می‌کند.

(a) غلظت (b) اندازه (c) شکل (d) توزیع (e) جهت

فصل مشترک

فصل مشترک، یک سطح محدود یا منطقه‌ای است که در آن یک ناپیوستگی اتفاق می‌افتد خواه این ناپیوستگی فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و غیره باشد. جهت به دست آوردن خصوصیت‌های مطلوب در یک کامپوزیت، بار اعمال شده از زمینه به الیاف از طریق فصل مشترک باید انتقال پیدا کند. این بدین معنی است که فصل مشترک باید بزرگ باشد و پیوستگی قوی بین الیاف و زمینه وجود داشته باشد و شکست در فصل مشترک (که ناپیوستگی نامیده می‌شود) نامطلوب است.

سه نوع فصل مشترک میان دو فاز وجود دارد:

۱_ پیوند مستقیم با لایه میانی

در این حالت پیوستگی مرطوب کردن (Wetting) توسط باند کووالانس یا نیروی واندوالس فراهم شده است.

۲_ لایه میانی به شکل محلول جامد از اجزای زمینه و تقویت‌کننده است.

۳_ لایه میانی به شکل فاز سوم باعث چسبندگی میان دو فاز است (اتصال چسبی)

مواد زمینه باید الیاف را مرطوب کنند. عوامل مهمی برای بهبود بخشیدن قابلیت مرطوب کنندگی به طور متناوب استفاده می‌شوند. الیاف مرطوب شده سطح‌های فصل مشترک را افزایش می‌دهند.

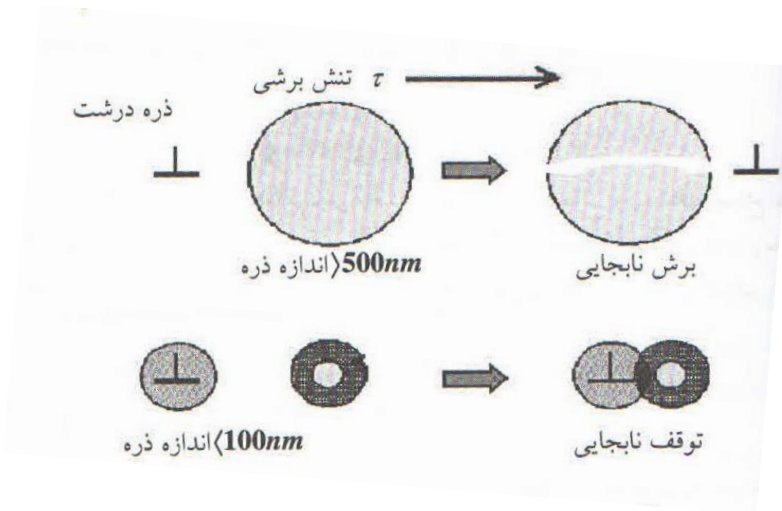
طبقه بندی کامپوزیت‌ها بر اساس ساختار

مواد کامپوزیتی می‌توانند به روش‌های مختلفی طبقه بندی شوند. یک نوع تقسیم بندی بر اساس هندسه تقویت کننده است، زیرا هندسه تقویت کننده است که تعیین کننده خصوصیت‌های مکانیکی و بازده بالای کامپوزیت می‌باشد. بر این اساس انواع کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های ذره ای و کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف و کامپوزیت‌های ساختاری می‌باشند.

کامپوزیت ذره‌ای

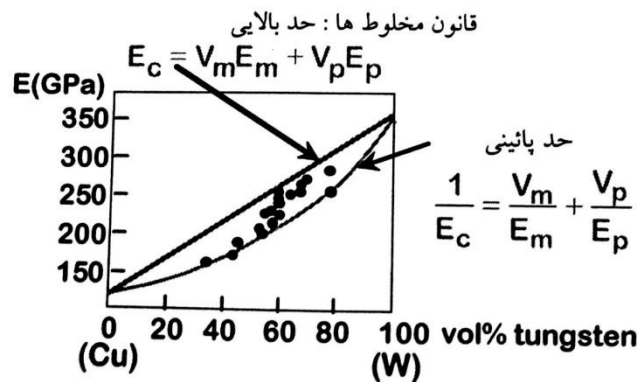
در کامپوزیت‌ها با تقویت کننده ذره‌ها، اثر ذره‌های توزیع شده روی خاصیت کامپوزیت‌ها بستگی به ابعاد ذره‌ها نیز دارد. ذره‌های خیلی کوچک (بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر) در زمینه توزیع شده‌اند و مانع حرکت نابه‌جایی‌ها و تغییر شکل مواد می‌شوند و استحکام دهی ذره‌ها نیز از طریق جلوگیری از حرکت نابه‌جایی‌هاست (شکل ۱-۶). در این حالت استحکام کششی و تسلیم بهبود می‌یابند و تغییر فرم پلاستیکی محدود می‌شود به‌عنوان مثال ذره‌های توریای (ThO_2) با ۳ درصد حجمی در زمینه نیکل و یا ذره‌های آلومینا (Al_2O_3) در زمینه آلومینیوم.

هر اثر استحکام دهی مشابه رسوب سختی است. بر عکس رسوب سختی که وقتی ذره‌های رسوب شده در زمینه حل نمی‌شود ناپدید می‌شوند، فاز تقویت کننده در کامپوزیت‌ها (ذره‌های سرامیکی) معمولاً در درجه حرارت‌های بالا پایدار هستند بنابراین اثر استحکام دهی حفظ می‌شود. استحکام دهی توسط ذره‌ها در درجه حرارت پایین به خوبی سختی رسوبی نیست ولی در درجه حرارت بالا معمولاً خاصیت‌های بهتری را ایجاد می‌کنند. ذره‌های تقویت کننده درشت بزرگ‌تر از ۵۰ نانومتر معمولاً اثر استحکام دهی کم‌تری دارند ولی زمینه بار اعمالی را به ذره‌های سخت‌تر و سفت‌تر انتقال می‌دهد بنابراین در این مواد پیوند بین زمینه و ذره‌های درشت باید خیلی قوی باشد این ذره‌ها باید هم محور باشند و به‌طور یکنواخت توزیع شوند در نتیجه سختی را افزایش و انعطاف‌پذیری را کاهش می‌دهند.



شکل ۲-۳ اثر اندازه ذره‌ها در استحکام دهی کامپوزیت‌ها

ذره‌های سخت توزیع شده در زمینه نرم‌تر مقاومت سایشی را افزایش می‌دهد مانند کاربید تنگستن در زمینه فلز نیکل یا کبالت. ذره‌های نرم توزیع شده در زمینه سخت‌تر قابلیت ماشین‌کاری را بهبود می‌بخشند (ذره‌های سرب در زمینه فولاد یا مس) و ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد (قلع در زمینه آلومینیوم یا سرب در زمینه مس). کامپوزیت، با زمینه‌ی دارای هدایت الکتریکی بالا (مس و نقره) و با تقویت‌کننده واسطه (تنگستن _ مولیبدن) در کاربردهای درجه حرارت بالا کار می‌کند. ذره‌های تنگستن در زمینه مس باعث افزایش مدول و بهبود هدایت الکتریکی و گرمایی طبق قانون مخلوط‌ها می‌گردد.



نمودار ۲-۳ کامپوزیت زمینه مس با ذره‌های تنگستن

پرکننده‌های ذره‌ای نیز به طور وسیعی جهت بهبود خصوصیت‌های مواد زمینه، مانند اصلاح هدایت گرمایی و الکتریکی، بهبود بازده در درجه حرارت‌های بالاتر، کاهش اصطکاک، افزایش مقاومت سایش و فرسایشی، بالا بردن قابلیت ماشین‌کاری، افزایش سختی سطحی و کاهش انقباض استفاده می‌شوند.

کامپوزیت‌های الیافی

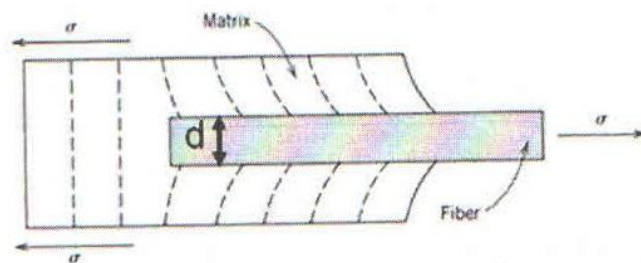
این نوع کامپوزیت‌ها عمومی‌ترین نوع کامپوزیت‌ها هستند، الیاف در آن‌ها به وسیله نسبت طول به مقطع مشخص می‌شوند. ابعاد تقویت‌کننده میزان تاثیر در خاصیت‌های کامپوزیت را مشخص می‌کند. الیاف در بهبود بخشیدن به استحکام شکست در زمینه موثر هستند، تا جایی که یک تقویت‌کننده با اندازه طولانی رشد ترک‌های اولیه عمود را که ممکن است به شکست منتهی شود، کند می‌کند. به ویژه در زمینه‌های شکننده و ترد.

الیاف غیر پلیمری ساخته بشر، استحکام خیلی بیشتری را در طولشان نشان می‌دهند. تا جایی که ترک‌های بزرگ، که ممکن است در ماده ایجاد شود، به خاطر اندازه مقطعی الیاف، خیلی ریز شده‌اند. در نوع پلیمری، جهت الیاف باعث افزایش مقاومت و سفتی می‌شوند.

الیاف، به خاطر اندازه مقطعی کوچک‌شان، به طور مستقیم قابل استفاده در مصارف مهندسی نیستند، بنابراین از آن‌ها در کامپوزیت‌های الیافی استفاده می‌کنند. در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ناپیوسته، انتقال بار از زمینه، بحرانی‌تر از کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف پیوسته می‌باشد.

خاصیت‌های مکانیکی این کامپوزیت‌ها به خصوصیت الیاف و میزان نیروی منتقل شده به آن‌ها از طرف زمینه بستگی دارد.

پیوند بین زمینه و الیاف، خاصیت مکانیکی کامپوزیت را به دلیل انتقال بار اعمالی به الیاف از طرف زمینه بهبود خواهد داد. شکل (۸-۱) نمونه تغییر شکل زمینه اطراف الیاف را که در معرض بار کششی است، نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴ نمونه تغییر شکل در زمینه اطراف الیاف تحت بار کششی

برای استحکام دهی و ایجاد سفتی مواد کامپوزیتی، طول بحرانی الیاف ضروری است. طول بحرانی الیاف با رابطه ذیل تعریف می‌شود:

$$L_c = \frac{\sigma_f * d}{2 \tau_c}$$

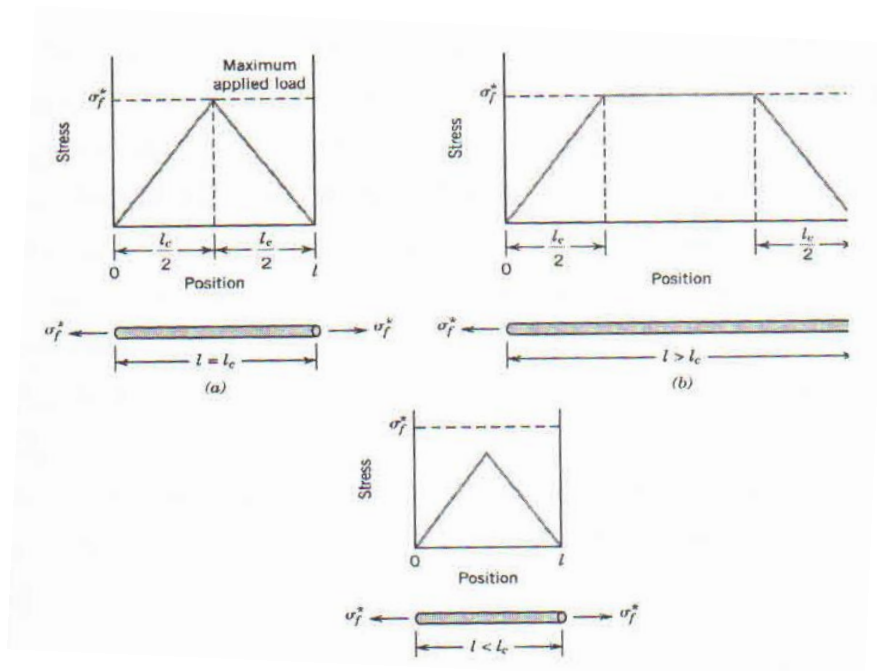
σ_f استحکام کششی نهایی

L_c بحرانی طول

d قطر الیاف

τ_c استحکام پیوند الیاف

زمینه الیاف شیشه‌ای یا الیاف کربنی به کار رفته در کامپوزیت‌ها طول بحرانی حدود ۱ میلیمتر دارند که ۲۰ تا ۱۵۰ برابر قطر الیاف است.

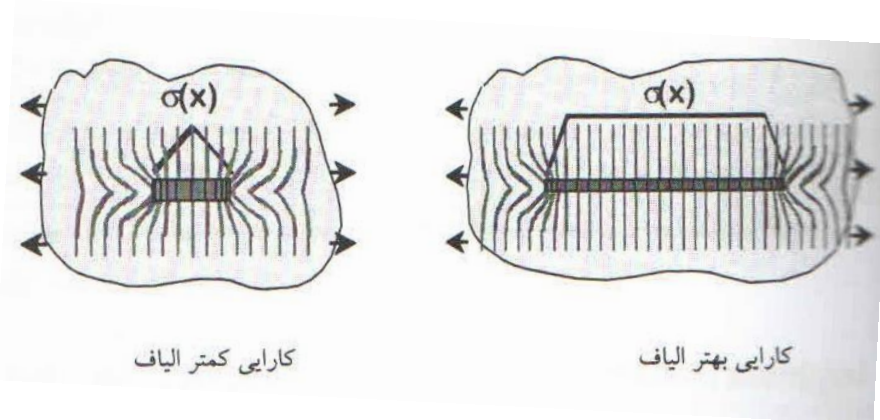


شکل ۲-۵ مقطع‌های تنش _ مکان طول الیاف

* برای $L_c = L$ ماکزیمم بار الیاف به مرکز طول الیاف می‌رسد.

* برای $L_c > L$ ماکزیمم بار الیاف توسط الیاف حمل می‌شود.

* برای $L_c < L$ ماکزیمم بار الیاف قابل دستیابی نیست و بنابراین با الیاف بلندتر و یا حتی با ذره‌ها جایگزین می‌شود.

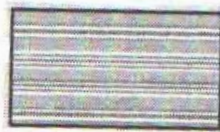


شکل ۲-۶ نحوه کارایی الیاف

بنابراین الیاف بلندتر و نازک‌تر، خاصیت کلی کامپوزیت را بهبود می‌بخشند معمولاً مناسب‌ترین طول الیاف حدود $30L_c$ است. به عنوان مثال طول بحرانی برای الیاف شیشه ۱ میلی‌متر است بنابراین مناسب‌ترین طول الیاف شیشه $30 \geq$ است.

$$\text{fiber length} > 30 \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$

اگر طول الیاف بزرگ‌تر از ۳۰ برابر طول بحرانی باشد به آن الیاف، الیاف پیوسته (continuous) گویند و اگر کم‌تر باشد الیاف ناپیوسته و کوتاه (discontinuous) می‌نامند.



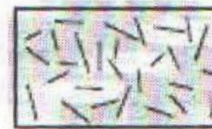
شکل ۲-۷ الیاف پیوسته هم جهت



شکل ۲-۸ الیاف پیوسته غیر هم جهت



شکل ۲-۹ الیاف ناپیوسته هم جهت



شکل ۲-۱۰ الیاف ناپیوسته غیر هم جهت یا تصادفی

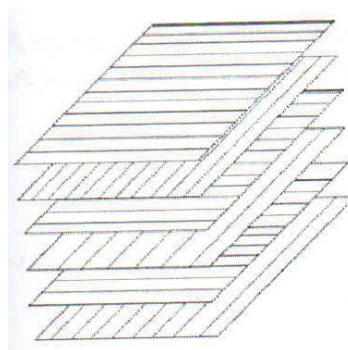
کامپوزیت‌های ساختاری

کامپوزیت‌های ساختاری مانند دیگر کامپوزیت‌ها هستند ولی شامل چند ماده مختلف برای به دست آوردن افزایش خاصیت مطلوب می‌باشند. آن‌ها به سطح میکروسکوپی بالاتری نسبت به دیگر کامپوزیت‌ها می‌رسند و خاصیت آن‌ها فقط به خاصیت اجزا بستگی ندارد و نظم مهندسی اجزا نیز موثر است.

دو نوع کامپوزیت ساختاری وجود دارد:

۱_ کامپوزیت لایه‌ای (Laminate Composite)

در کامپوزیت لایه‌ای موادی را که خاصیت متفاوتی در موقع اعمال تنش در جهت‌های مختلف دارند، مورد استفاده قرار می‌دهند این مواد برای تشکیل یک ماده ایزوتروپ، روی یک‌دیگر با جهت‌های مختلف چیده و اتصال داده شده‌اند. تخته چندلایه (plywood) یک مثال ساده از کامپوزیت‌های لایه‌ای است.

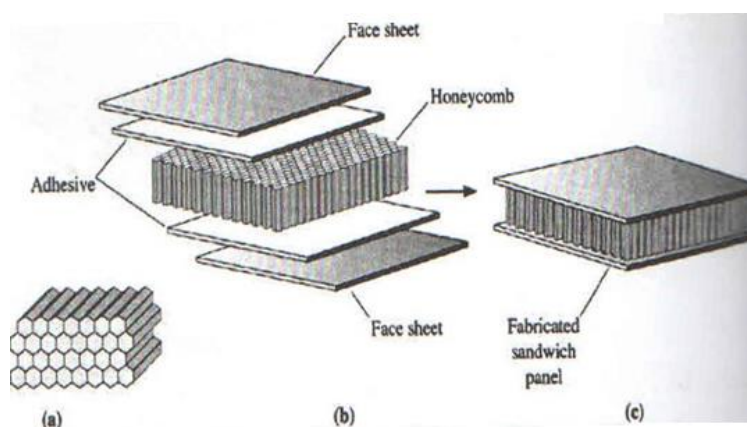


شکل ۲-۱۱ اجزای کامپوزیت لایه‌ای

این کامپوزیت‌ها وقتی تنش‌های چند محوری به صفحه‌های آن‌ها اعمال شود، مورد استفاده قرار می‌گیرند. فایده‌های متعددی در این نوع کامپوزیت‌ها وجود دارد مانند، سرعت سریع تولید، قیمت ساخت ارزان، انعطاف‌پذیری در ساخت شکل‌های پیچیده.

۲_ کامپوزیت با صفحه‌های ساندویچی (Sandwich Panels)

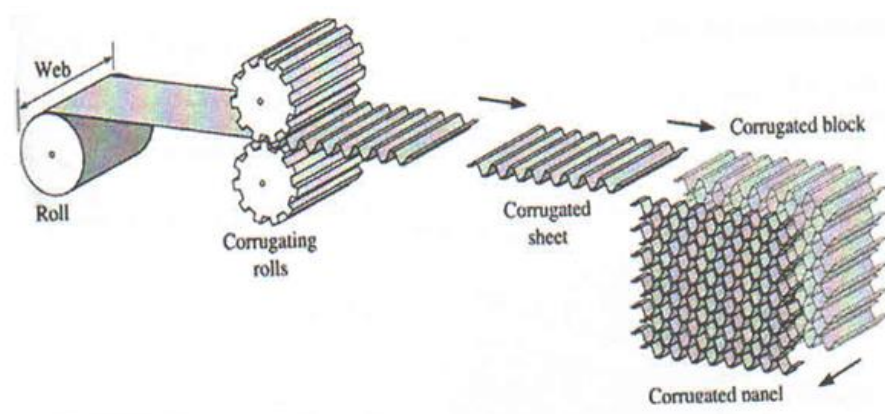
کامپوزیت با صفحه‌های ساندویچی، شبیه کامپوزیت لایه‌ای است. این کامپوزیت شامل دو لایه خارجی مستحکم و شبیه به هم است که هسته ضعیف‌تر با چگالی کم‌تر را احاطه کرده‌اند.



شکل ۲-۱۲ کامپوزیت ساندویچی با هسته لانه زنبوری

این مواد محدوده وسیعی از پلیمرها از اسفنج تا چوب بالسا می‌توانند باشند. مواد هسته، صفحه‌ها را جدا می‌کند و اجازه می‌دهد که گشتاور اینرسی بزرگ‌تر محور خنثی، از آن‌ها بگذرد. این کار تنش‌ها را در مواد برای بارهای اعمالی، پایین می‌آورد و بنابراین به کامپوزیت اجازه تحمل بارهای بیش‌تر را می‌دهد هسته همچنین باعث صلابت برشی (rigidity) در مواد می‌شود.

ساخت هسته این نوع کامپوزیت‌ها که به شکل سلول هگزاگونال و لانه زنبور عسل است به این صورت است که ابتدا موادی مانند آلومینیوم بین دو غلطک، چین‌دار می‌شوند، ورقه‌های چین‌دار شده، به هم اتصال داده شده و سپس به اندازه مطلوب برش داده می‌شوند.



شکل ۲-۱۳ نحوه ساخت هسته لانه زنبور عسل

خاصیت کامپوزیت‌ها

خاصیت کامپوزیت‌ها به‌طور حتم مربوط به خصوصیت مواد سازنده و همچنین توزیع و فعل و انفعال بین آن‌ها است. خاصیت کامپوزیت ممکن است بخشی از مجموع خصوصیت سازنده‌شان باشد یا سازنده در یک روش متقابل واکنش دهند که نتیجه آن بهبود خاصیت کامپوزیت باشد. جدا از خصوصیت مواد سازنده کامپوزیت، هندسه تقویت شده (شکل، اندازه و مقدار توزیع) در خاصیت کامپوزیت‌ها تا حدی تاثیر می‌گذارد. توزیع غلظت و نحوه جهت‌یابی تقویت‌کننده نیز خاصیت کامپوزیت را تغییر می‌دهند. شکل فازهای ناپیوسته که ممکن است کروی، استوانه‌ای، چهارگوش، منشوری یا مسطح باشد و اندازه و مقدار توزیع آن‌ها نوع بافت کامپوزیت را کنترل می‌کند. همچنین مقدار جزیی فصل مشترک، که نقش مهمی در تعیین حد فعل و انفعال بین تقویت‌کننده و زمینه دارد، در خاصیت کامپوزیت‌ها موثر است.

پارامترهای مهم دیگری بر ویژگی کامپوزیت‌ها تاثیر گذار هستند، مانند رفتار منحنی تنش-کرنش تقویت‌کننده و زمینه و درصد حجمی آن‌ها و جهت تنش یا بار اعمالی. جهت تقویت‌کننده نیز بر ایزوتروپی سیستم موثر است.

مواد کامپوزیتی یا ایزوتروپ هستند یا آنزوتروپ که توسط ساختار کامپوزیت‌ها تعیین می‌شود. مواد ایزوتروپ، موادی هستند که ویژگی آن‌ها بستگی به جهت مورد اندازه‌گیری ندارد و مواد آنزوتروپ موادی هستند که ویژگی آن‌ها در طول یک محور به‌خصوص و یا موازی یک محور به‌خصوص، از ویژگی اندازه‌گیری شده در دیگر جهت‌ها متفاوت است.

فصل سوم

کامپوزیت‌های زمینه فلزی

مقدمه

مطابق تعریف، کامپوزیت زمینه فلزی از دو جز تشکیل شد است. جز اول زمینه فلزی و جز دوم تقویت کننده است. به ندرت یک فلز خالص به عنوان زمینه انتخاب می شود و معمولاً زمینه یک آلیاژ فلزی است. در یک نگاه کلی، کاربرد ساختارهای کامپوزیت فلزی، صرفه جویی نزدیک به بیست درصد (۲۰٪) نسبت به فلزها دارند. بنابراین تولید آن‌ها هزینه پایین تری دارد. مطالعه در مورد کامپوزیت زمینه فلزی نشان می دهد که در مقایسه با فلزهای یک پارچه دارای مزایای مقاوم به خستگی بهتر، نسبت استحکام به چگالی بالاتر، نسبت سفتی به چگالی بالاتر، دارای مقاومت خزشی و سایشی بالا، ویژگی بهتر در درجه حرارت بالا و ضریب انبساط حرارتی پایین هستند. بنابراین ساخت آن‌ها برای کاربردهای جدید ادامه دارد، اما رشد زیاد آن‌ها در بازار، نیازمند روش های تولید کم هزینه خواهد بود. همچنین بازیافت مواد کامپوزیتی مصرفی جهت مصرف دوباره آن‌ها اهمیت فراوان دارد، زیرا سبب صرفه جویی در هزینه ها می گردد. پارامترهای زیادی در طراحی کامپوزیت های MMC با ویژگی مورد نیاز وجود دارد. انتخاب زمینه و تقویت کننده مناسب و انتخاب درست این اجزا و اصلاح فرآیند ساخت در تولید کامپوزیت MMC با ویژگی مکانیکی عالی ضروری است.

علاوه بر بررسی دقیق و صحیح انتخاب مواد زمینه، باید به سازگاری شیمیایی زمینه با تقویت کننده، توانایی مرطوب کردن آن‌ها و ایجاد ویژگی مورد نظر و نحوه تولید آن‌ها توجه و دقت لازم صورت پذیرد. انتقال خوب بار از زمینه به تقویت کننده به وجود فصل مشترک به هم چسبیده قوی وابسته است، بنابراین، فصل مشترک به رطوبت کافی تقویت کننده که توسط زمینه ایجاد می شود نیازمند است و دستیابی به رطوبت و واکنش پذیری فعال، به وسیله ارتباط نزدیک بین زمینه و تقویت کننده ایجاد می شود. تنظیم ایجاد شرایط شیمیایی برای انجام این مساله دشوار است به طوری که پارامترهای زیادی در آن دخیل می باشند. در این رابطه تحقیق های زیادی به طور مثال در ارتباط با فلز زمینه آلومینیوم با ویسکرها های کاربرد سیلیسیم و یا بر به عنوان تقویت کننده و همچنین کامپوزیت های آلومینیوم تقویت شده با الیاف شیشه انجام گرفته است.

همان طور که در آلیاژسازی، افزایش عنصر نباید منجر به ایجاد ترکیب های بین فلزی با عنصرهای زمینه گردد، در کامپوزیت ها نیز نباید تقویت کننده با زمینه ترکیب های قوی و پایداری تشکیل دهد. بهترین ویژگی در یک کامپوزیت هنگامی بدست می آید که ویسکرها های تقویت کننده و یا ذره های تقویت کننده و زمینه به طور فیزیکی و شیمیایی در حالت هم سان باشند.

در ایجاد ویژگی مکانیکی مطلوب، زمینه انعطاف پذیر به ترک های ضخیم و نقاط تمرکز تنش، اجازه تغییر فرم پلاستیک را می دهد و ماده ای با چقرمگی شکست مناسب را فراهم می کنند. چقرمگی بالا و مقاومت به

ضربه بالا فلزها و آلیاژهایی مانند آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و آلیاژ نیکل_کروم که در مقابل ضربه، تغییر شکل پلاستیک را متحمل می‌شوند از فایده‌های دینامیکی کاربرد ساختارهای کامپوزیت زمینه فلزی است. بنابراین ایجاد ماده‌ای با ترکیب درستی از چقرمگی و سفتی باعث می‌شود تا میزان حساسیت به ترک‌ها و عیوب کاهش پیدا کرده و هم زمان خصوصیت‌های دینامیکی و استاتیکی افزایش یابد.

استفاده از تقویت‌کننده موثر از فلزها و آلیاژهای فلزی مانند کاشت ویسکرها یا الیاف تقویت‌کننده پیوسته یک جهت و یا چند جهت در کامپوزیت‌های MMC ضروری است. تقویت‌کننده‌هایی از نوع ویسکرها و الیاف با قطر کم‌تر از چند میکرون، در ایجاد ویژگی‌های مکانیکی از طریق ایجاد استحکام فوق العاده زیاد قابل رقابت با الیاف پیوسته در کامپوزیت‌های MMC بوده‌اند، ولی به دلیل روش ساخت پیچیده و تفاوت کم در افزایش ویژگی میان تقویت‌کننده‌های ویسکری SiC، نوع تقویت‌کننده به سمت الیاف بریده یا ذره‌ای نسبت به تقویت‌کننده ویسکری فلزها مخصوصاً در زمینه آلومینیوم انتقال یافته است. زیرا آلومینیوم دارای وزن سبک و قابلیت مرطوب‌کنندگی خوب با کاربرد سیلیسیم است.

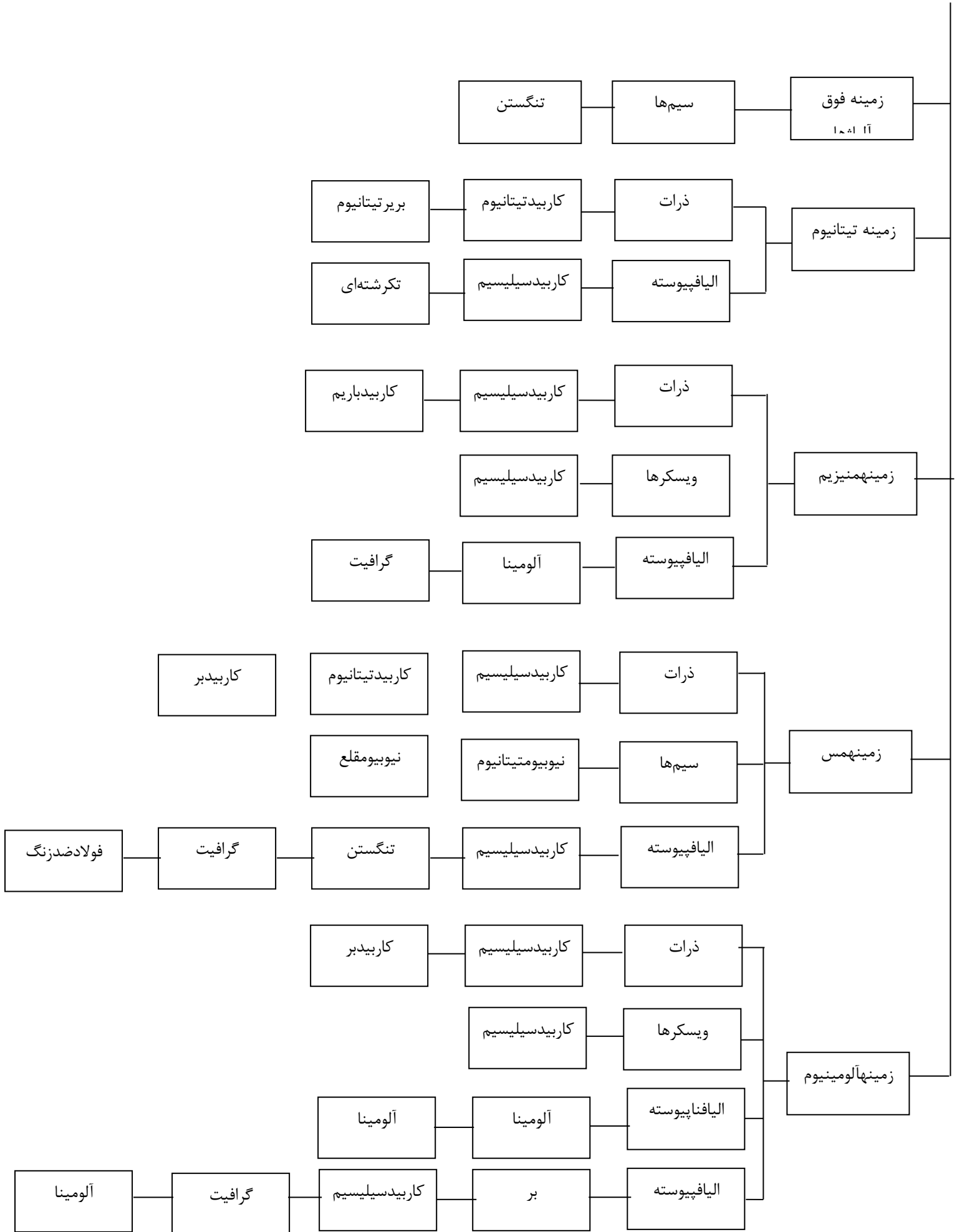
انتقال تکنولوژی از سال ۱۹۸۰، با جانشین کردن تقویت‌کننده‌های ناپیوسته به جای تقویت‌کننده‌های پیوسته مانند کاربیدها، نیتریدها، اکسیدها و موادی مانند کربن و سیلیسیم آغاز شد. به دلیل آن که کامپوزیت‌های زمینه فلزی که به‌طور ناپیوسته تقویت شده‌اند با هزینه پایین‌تری قابل دسترسی بودند گرایش به سمت این نوع از کامپوزیت‌ها ادامه یافته است. بخشی از MMCها، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم هستند مانند (DRA) و یا آلیاژهای آن که با ذره‌های کاربرد سیلیسیم و یا ویسکرها به‌طور ناپیوسته تقویت شده‌اند.

مواد زمینه در کامپوزیت زمینه فلزی

در کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC) فلزهای مختلفی به عنوان زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند، مهم‌ترین فلزها، آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و آلیاژهای مس و سوپر آلیاژها هستند. در نمودار زیر مواد کامپوزیت زمینه فلزی با معرفی کلیه زمینه‌ها و تقویت‌کننده‌های مورد استفاده دیده می‌شود.

نمودار ۳-۱ مواد کامپوزیت زمینه فلزی

کامپوزیت‌های زمینه فلزی



۲-۱-۱ زمینه آلومینیوم

امروزه زمینه آلومینیوم به دلیل ویژگی‌های بی‌نظیر آن، به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد مانند همه کامپوزیت‌ها، کامپوزیت زمینه آلومینیوم یک جز تنها نیست بلکه از دو جز تشکیل یافته است که سفتی، استحکام، چگالی و ویژگی‌های حرارتی و الکتریکی آن‌ها به هم پیوند داده شده است. نوع زمینه، مواد تقویت‌کننده، شکل و حجم تقویت‌کننده، مکان تقویت‌کننده و روش ساخت می‌تواند ویژگی‌های مورد نیاز را حاصل نماید. از مهم‌ترین ویژگی‌های کامپوزیت زمینه آلومینیوم نسبت به دیگر کامپوزیت‌های زمینه فلزی، هزینه پایین‌تر آن است. زمینه آلومینیوم خالص بر زمینه‌های آلیاژی مختلف آن برتری دارد و این به خاطر ثبات آلومینیوم در درجه حرارت‌های بالا نسبت به آلیاژهای آلومینیوم می‌باشد. درجه حرارت کاری پایین در حالتی که زمینه آلیاژی است، به ثبات کم زمینه آلیاژی و زبری دانه‌ها مربوط می‌شود. به‌علاوه، انتقال بار موثر در حالت زمینه آلومینیوم خالص، وجود دارد که به علت فصل مشترک خالص بین زمینه آلومینیوم و تقویت‌کننده است.

خاصیت‌های کامپوزیت زمینه آلومینیوم

- هدایت حرارتی عالی و الکتریکی خوب
- ضریب انبساط حرارتی پایین
- استحکام برشی بالا
- چگالی پایین
- مقاومت سایشی بالا
- عمل در درجه حرارت بالا

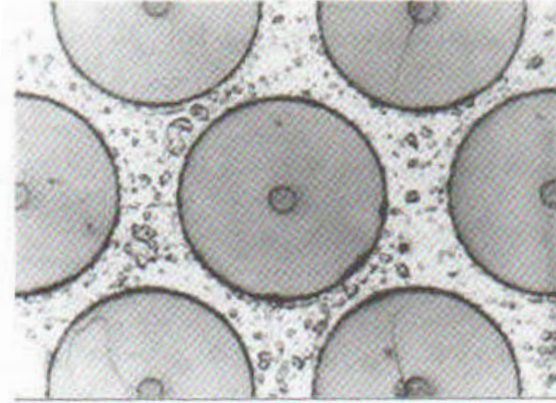
روش‌های ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیوم

ریخته‌گری، متالوژی پودر (PM) و روش پرس FoilandFiber و روش ساخت درجا (Situin)

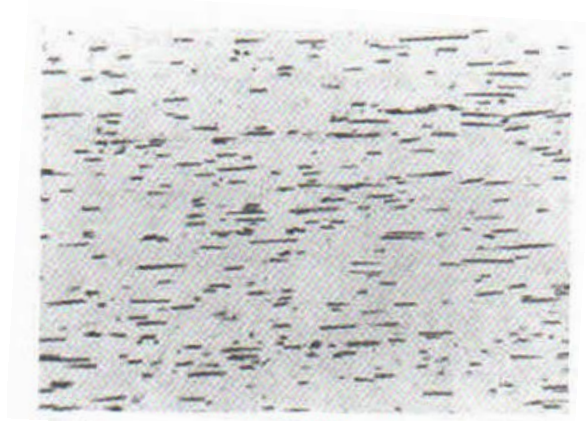
تقویت‌کننده‌های کامپوزیت زمینه آلومینیوم

- الیاف پیوسته: بُر، کاربید سیلیسیم، آلومینا، گرافیت
- الیاف ناپیوسته: آلومینا، آلومینا _ سیلیکا
- ویسکرها: کاربید سیلیسیم

• ذرات : کاربید سیلیسیم، کاربید بُر



شکل ۳-۱ زمینه آلومینیوم با الیاف بر



شکل ۳-۲ زمینه آلومینیوم با الیاف کوتاه کربن

این کامپوزیت‌ها در روتورهای ترمز و پیستون‌ها و دیگر اجزای خودرو و همچنین چوب‌های گلف، دوچرخه‌ها، اجزای ماشین، زمینه‌های الکترونیکی و دیگر کاربردهای الکترونیکی و ساختمانی استفاده می‌شود.

ویژگی گرمایی بی‌نظیر کامپوزیت‌های آلومینیوم مانند هدایت فلزی با ضریب انبساط پایین که می‌تواند مناسب با درجه حرارت زیر صفر باشد می‌تواند افزون بر انتظارها در صنعت هوا-فضا و دستگاه‌های خودکار هواپیما باشد شرکت CERAMTECAG آلمانی اخیراً از آلومینیوم و مخصوصاً آلیاژ $AlSi_9Cu_3$ به دلیل قیمت نسبتاً ارزان آن و ویژگی‌های غیر پیچیده‌اش استفاده کرده است و نتایج برجسته‌ای را از کاربردهای فضایی و خودروسازی ارایه داده است. اتومبیل هوندا یک کامپوزیت با زمینه آلومینیوم است علاوه بر آن از

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم در کاربردهایی که وزن ماده مهم است استفاده می‌شود. مقاومت سایشی این نوع کامپوزیت‌ها، به نوع تقویت‌کننده و مقدار و شکل ذره‌های تقویت‌کننده بستگی دارد. مشخص گردیده است که یک مقدار بهینه‌ای از تقویت‌کننده، ماکزیمم مقاومت سایشی را ایجاد می‌کند. این فاکتور، فاکتور مواد است که بستگی به مقدار تاثیر تقویت‌کننده دارد. فاکتور دوم، فاکتورهای فیزیکی و مکانیکی مانند سرعت لغزشی و بار اعمالی است که موثر بر مقاومت سایشی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی است. با توجه به تحقیق‌های انجام شده، مقاومت سایشی عالی با ارایه این ترکیب بین فلزی قوی در این کامپوزیت‌ها حاصل شده است.

زمینه منیزیم

منیزیم و آلیاژهای منیزیم، از جمله مواد سبکی هستند که به عنوان زمینه در کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده می‌شوند. منیزیم جاذبه‌های زیادی دارد که به دلیل ترکیب خاص آن حاصل شده است از جمله می‌توان به چگالی کم و قابلیت‌های مکانیکی عالی آن اشاره نمود. (چگالی کم منیزیم ۳۵٪ کم‌تر از آلومینیوم) آن را در دوره‌های چگالی / مقاومت که دارای اهمیت زیادی است، قابل رقابت ساخته است اما آلیاژهای منیزیم در مقاومت و استحکام مطلق، قابل مقایسه با آلیاژهای آلومینیوم نیستند.

تقویت‌کننده‌های کامپوزیت زمینه منیزیم

- الیاف پوسته : گرافیت و آلومینا
- ویسکرها : کاربید سیلیسیم
- ذرها : کاربید سیلیسیم ، کاربید بر

ویژگی‌های کامپوزیت زمینه منیزیم تقویت شده با ذرات SiC

- چگالی پایین
- سفتی بالا
- مقاومت پوششی بالا
- استحکام خوب حتی در درجه حرارت‌های مورد ارزیابی و ...
- مقاومت به خزش خوب

کاربرد

در ساخت اجزای رفت و آمدی در موتورها و پیستون‌ها، گژن پین و کاسه فنر، اجزای اتومبیل‌های مسابقه‌ها، سیستم ترمز خودکار، قسمت‌های هواپیما، گیربکس، کمپرسور، موتور انتقال به‌خاطر ضریب انبساط حرارتی پایین، ویژگی‌های سفتی بالا که با چگالی کم ترکیب شده است در صنایع هوایی کاربرد فراوان دارد.

زمینه تیتانیوم

تیتانیوم و آلیاژهای آن، از جمله موادی هستند که به عنوان زمینه در کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده می‌شوند. این فلز بسیار محکم و سبک است و در حالت خاص انعطاف پذیر است، درجه حرارت ذوب آن 1660°C است. در حالت خاص و آلیاژی در ساخت هواپیما و ساخت ابزار کاربرد دارد.

تقویت‌کننده‌های کامپوزیت زمینه تیتانیوم

- الیاف کاربید سیلیسیم تک رشته‌ای پیوسته (کامپوزیت تقویت شده الیاف بلند)
- ذره‌های TiC و TiB_2 (کامپوزیت ذره ای)

ویژگی‌های کامپوزیت زمینه تیتانیوم

- استحکام بالا
- سفتی بالا (مدول الاستیک بالا)
- مقاومت به خزش بالا
- پایداری حرارتی بالا
- مقاومت پوششی بالا

روش ساخت کامپوزیت زمینه تیتانیوم، روش متالوژی پودر (PM) می‌باشد.

کاربرد

آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-Au که با رشته‌های کاربید سیلیسیم پیوسته تقویت شده اند و توسط اکستروژن پرس شده است در میل گردان‌های موتور توربین استفاده می‌شود، در موتورهای هواپیما، پره‌های کمپرسور و دیسک‌ها به دلیل مقاومت حرارتی بالا استفاده می‌شود.

در اجزای موتور توربین (تیغه های فن، پیستون های محرک، حلقه های زنجیر به هم پیوسته، میل گردان ها و دیسک ها) اجزای موتور خودکار، قسمت هایی از قطار اجزای ماشین معمولی استفاده می شود. در اجزای ساختمانی جت های F-16، کامپوزیت زمینه تیتانیوم با الیاف کاربید سیلیسیم به کار رفته است.

زمینه مس

کامپوزیت زمینه مس _ گرافیت، خاصیت های مختلف را با هم جمع می کنند این کامپوزیت ها در هوا و در درجه حرارت بالا مفید هستند و مشخصات مکانیکی عالی را به خوبی هدایت الکتریکی و حرارتی بالا فراهم می کنند. آن ها پروسه تولید ساده تری در مقایسه با تیتانیوم و چگالی کمتری نسبت به فولاد دارند. سوپر هادی های انعطاف پذیر با یک زمینه مس و رشته های فوق هادی از نیوبیوم _ تیتانیوم ساخته شده اند و مس تقویت شده با ذرات تنگستن یا ذرات اکسید آلومینیوم در فروکش های حرارتی، گرماگیرها و بسته های الکترونیکی استفاده می شوند.

تقویت کننده های کامپوزیت زمینه مس

- الیاف پوسته : کربن، کاربید سیلیسیم، تنگستن، فولاد ضد زنگ ۳۰۴
- ذرات : کاربید سیلیسیم، کاربید بر، کاربید تیتانیوم
- سیم ها : نیوبیوم _ تیتانیوم، نیوبیوم _ قلع

خاصیت های کامپوزیت زمینه مس

- ضریب انبساط حرارتی پایین
- سفتی بالا
- هدایت الکتریکی خوب
- هدایت حرارتی بالا
- مقاومت پوششی خوب

روش مورد استفاده در ساخت کامپوزیت زمینه مس، روش متالوژی پودر (PM) و روش درون تراوری (Infiltration) است.

کاربرد

برای ساخت مدول های پیوندی (hybrid modules) و رله های الکترونیکی (electronics relays) یا فنرهای هادی الکتریکی و دیگر اجزای الکتریکی و الکترونیکی استفاده می شود.

کامپوزیت های زمینه سوپر آلیاژی

تقویت کننده این نوع زمینه ها سیم ها هستند که از جنس تنگستن استفاده می شود.

تقویت کننده های کامپوزیت های زمینه فلزی

برای به دست آوردن کامپوزیت های زمینه فلزی مناسب و بهینه، انتخاب نوع، شکل و اندازه ماده تقویت کننده بسیار مهم است و باید مناسب با کاربرد ماده کامپوزیتی باشد. واضح است که ماده و شکل تقویت کننده با توجه به نوع زمینه متفاوت خواهد بود. علاوه بر سازگاری بین تقویت کننده و زمینه، موارد دیگری مانند اندازه، قطر و تناسب بین آن ها، شکل الیاف (الیاف ریز ریز شده، ویسکرها، ذرات کروی یا بی نظم و قاعده، ورق های نازک . . .) مورفولوژی سطوح (نرمی، زبری و موج دار بودن) عیوب ساختاری (تخلخل، مواد دو فازی و یا مواد خورده شده . . .) شیمی سطوح (رسوب SiO_2 و SiC و لایه های رسوبی دیگر) آلودگی ها و خاصیت های ذاتی زمینه و تقویت کننده باید مدنظر قرار گیرد. به طور کلی تقویت کننده، استحکام، سفتی و قابلیت مقاومت حرارتی را در زمینه افزایش می دهد و چگالی را کم می کند. همان طور که در جدول ۲-۲ دیده می شود استحکام کششی نهایی با افزایش تقویت کننده به فلز پایه افزایش یافته و همچنین با افزایش درصد حجمی الیاف استحکام کششی نهایی افزایش می یابد.

| مواد | درصد حجمی الیاف | استحکام کششی نهایی (Mpa) | |
|----------------|-----------------|--------------------------|-----------|
| | | پایه | تقویت شده |
| آلومینیوم خالص | ۱۱ | ۵۹ | ۲۳۵ |
| آلومینیوم ۶۰۶۱ | ۱۶ | ۳۰۰ | ۴۴۱ |
| آلومینیوم ۲۰۲۴ | ۲۰ | ۴۷۰ | ۵۶۵ |

جدول ۳-۱ استحکام کششی نهایی کامپوزیت های کاربرد سیلیسیم _ آلومینیوم

تقویت کننده های کامپوزیت های زمینه فلزی MMC به ۵ دسته مهم تقسیم می شوند :

- الیاف پیوسته
- الیاف ناپیوسته
- ویسکرها
- ذره ها
- سیم ها

به جز سیم ها که فلز هستند بقیه تقویت کننده ها، سرامیک اند. این سرامیک ها اکسیدها، کابیده ها و نیتریدها هستند و به دلیل خاصیت های سفتی و استحکام بالا در درجه حرارت اتاق و در درجه حرارت بالا مورد استفاده قرار می گیرند.

تقویت کننده الیاف پیوسته و ناپیوسته

بر طبق استاندارد ASTM به هر ماده ای که در حالت کشیده شده دارای نسبت طول به قطر (aspectratio) بیش از ۱۰۰ است، الیاف گفته می شود. معمولاً در کامپوزیت، الیاف پیوسته را رشته می نامند. الیاف به علت مقطع عرضی کوچک و نسبت طول به قطر بزرگ، دارای خاصیت های انعطاف پذیری خیلی زیاد و استحکام بالا در کامپوزیت است. الیاف پیوسته شامل بر، گرافیت، آلومینا، کاربید سیلیسیم است. الیاف بر توسط روش CVD از این مواد روی یک هسته تنگستن ساخته شده اند. البته هسته های کربن نیز مورد استفاده قرار می گیرند. ضخامت نسبی تک رشته ها به قطر ۴ و ۵/۶ و ۸ میل است. به دلیل واکنش های کندی که ممکن است میان بر و فلزها در درجه حرارت بالا اتفاق بیافتد اغلب از پوشش هایی مانند کاربید سیلیسیم و کاربید بر استفاده می شود.

کاربید سیلیسیم تک رشته ای، نیز توسط فرآیند CVD با استفاده از هسته تنگستن یا کربن ساخته شده است. الیاف پیوسته آلومینا از چندین منبع قابل دستیابی است، خاصیت ها و ترکیب های شیمیایی الیاف مختلف، خیلی متفاوت هستند. الیاف گرافیت از دو ماده خام پلی اکریل نیترات (PAN) و قیر نفت خام ساخته شده اند.

کوشش برای ساخت الیاف گرافیت از پایه ذغال سنگ تحت بررسی است. الیاف گرافیتی با محدوده پهنای از استحکام و مدول قابل دسترس هستند. این الیاف در ایجاد کامپوزیت با قابلیت هدایت حرارتی بالا و خاصیت های مکانیکی عالی موثر می باشند، در حال حاضر تقویت کننده های الیاف ناپیوسته، آلومینا و

آلومینا _ سیلیکا می باشند. هر دو این مواد طبیعتاً به عنوان مواد عایق توسعه یافته اند. الیاف پیوسته حدود ۲۰۰ ساعت پایدارتر از الیاف ناپیوسته هستند ولی مزیت الیاف ناپیوسته این است که آن ها می توانند توسط فرآیندهای استاندارد شبیه فورجینگ، رولینگ، جداسازی و غیره شکل داده شوند الیاف کوتاه با طول بحرانی L_c که در فصل اول توضیح داده شد تعریف می شوند. این الیاف نسبت به الیاف پیوسته بلند، استحکام کمتری دارند از این رو کمتر در زمینه کامپوزیت زمینه آلومینیوم استفاده می شوند و بیشتر برای اهداف عایق کاری مقاوم مورد استفاده قرار می گیرند ولی نسبت به ویسکرها و الیاف پیوسته ارزان تر هستند. الیاف پیوسته برای بارگذاری یک جهته بی نظیر هستند اما در جهت عمود بر الیاف استحکام کمی دارند و یا به عبارت دیگر کامپوزیت تقویت شده با الیاف پیوسته خاصیت غیر ایزوتروپیک دارند و بنابراین در جهت الیاف قوی تر و سفت تر از جهت عمود بر الیاف هستند. همان طور که در جدول ۲-۳ دیده می شود در کامپوزیت های زمینه آلومینیوم تقویت شده با بر مدول کشسانی و استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف کاهش قابل ملاحظه ای دارد. در جدول ۲-۴ تاثیر جهت الیاف روی مدول کشسانی در کامپوزیت های آلومینیوم ۶۰۶۱ با تقویت کننده گرافیت، دیده می شود. در این کامپوزیت با یک چگالی معین و درصد حجمی ثابت مدول کشسانی در جهت عمود بر الیاف کاهش می یابد.

| زمینه | جهت الیاف | مدول کشسانی (Gpa) | استحکام کششی (Mpa) |
|----------------|-----------|-------------------|--------------------|
| آلومینیوم ۶۰۶۱ | ۰ | ۲۰۷ | ۱۵۱۵ |
| | ۹۰ | ۱۳۸ | ۱۳۸ |
| آلومینیوم ۲۰۲۴ | ۰ | ۲۰۷ | ۱۵۵۰ |
| | ۹۰ | ۱۴۵ | ۲۱۴ |

جدول ۲-۳ مدول کشسانی و استحکام کششی کامپوزیت آلومینیوم_بر

| زمینه | درصد حجمی تقویت کننده | جهت الیاف | چگالی (g/cm^3) | مدول کشسانی (Gpa) |
|--------------------------------|-----------------------|-----------|--------------------|-------------------|
| کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ گرافیت | ۳۴ | ۰ | ۲/۳۵ | $.6/6 \pm 2/182$ |
| کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ گرافیت | ۳۴ | ۹۰ | ۲/۳۵ | ۳۳ |

جدول ۳-۳ مدول کشسانی و چگالی کامپوزیت های آلومینیوم ۶۰۶۱ گرافیت

استحکام و سفتی عرضی کامپوزیت های MMC هم جهت (همه الیاف در جهت موازی یک محور مرتب شده اند) برای استفاده در اجزایی مانند قطعات تقویت کننده برای جلوگیری از خمش (Stiffeners) و ستون های نگه دارنده (Struts) به اندازه کافی، بزرگ است و این یکی از مهم ترین مزایای MMC هاست نسبت به کامپوزیت های زمینه پلیمری PMC است. فاکتور مهمی که اثر مهمی بر رفتار فلزات تقویت شده با الیاف دارد، اختلاف بزرگ در ضریب انبساط میان دو تشکیل دهنده است. مخصوصاً وقتی این کامپوزیت ها در معرض تغییرات مهم درجه حرارت قرار می گیرند این اختلاف می تواند باعث ایجاد تنش های باقی مانده بزرگ شود. تنش های باقی مانده بزرگ توسط بارگذاری مکانیکی نیز تولید می شوند. اگر چه منحنی تنش_ کرنش این کامپوزیت ها، غیر خطی است ولی این مواد مانند کامپوزیت های PMC، ضرورتاً شکننده هستند.

ویسکرها

ویسکرها به وسیله ساختار الیاف گونه شان شناخته می شوند. آن ها ساختارهای تک کریستالی هستند که عیب کریستالی ندارند. مواد زیادی مانند فلزات، اکسیدها، کاربیدها، هالیدها و ترکیب های آلی به صورت ویسکر تحت شرایط کنترل شده آماده می شوند. در حالت کلی، یک ویسکر، یک نابه جایی ساده دارد که در طول محور مرکزی جابه جا می شود. آزادی نسبی نابه جایی ها به این معنی است که استحکام تسلیم ویسکرها نزدیک به استحکام تعوری مواد می باشد.

ویسکرهای کاربید سیلیسیم، نیتريد سیلیسیم، کربن، پتاسیوم، تیتانیوم به راحتی در دسترس هستند ولی مهم ترین و اصلی ترین ویسکرها، کاربید سیلیسیم است که فرصت های بهتری را در این کامپوزیت ها ایجاد می کنند. همان طور که در جدول ۲-۵ دیده می شود مدول کشسانی و استحکام تسلیم آلومینیوم تقویت شده با ویسکر SiC با افزایش درصد حجمی ویسکر افزایش می یابد.

| درصد حجمی ویسکر | مدول کشسانی (Gpa) | استحکام تسلیم ۰/۲ درصد (Mpa) |
|-----------------|-------------------|------------------------------|
|-----------------|-------------------|------------------------------|

| | | |
|----|-------|-------|
| ۰ | ۹/۷۱ | ۲۱۰ |
| ۱۲ | ۳/۹۵ | ۵/۲۶۶ |
| ۱۶ | ۰/۹۰ | ۵/۲۶۴ |
| ۲۰ | ۰/۱۱۱ | ۲۹۸ |

جدول ۳-۴ مدول کشسانی و استحکام تسلیم آلومینیوم تقویت شده با ویسکر Sic

خصوصیت های فیزیکی ویسکرها ضامن واکنش های شیمیایی متفاوت با آلیاژهای زمینه است. از طرف دیگر خصوصیت های کامپوزیت های تقویت شده با ویسکرها بستگی شدیدی به جهت های آن ها دارد. ویسکرها با جهت های تصادفی یک ماده همسان گرد تولید می کنند. فرآیندهایی مانند اکستروژن می تواند ویسکرها را جهت دهد و در نتیجه خاصیت های غیر همسان گردی ایجاد نماید. همچنین ویسکرها انعطاف پذیری و چقرمگی شکست را کاهش می دهند.

ذره ها

معمولا ذره ها مواد معمولی و ارزان قیمت هستند و از انواع مختلف ذره های سرامیکی (اکسدها، نیتrideها و کاربیدها) تشکیل شده اند. تقویت کننده کلیدی ذره ها، کاربید سیلیسیم و کاربید بر هستند که از صنعت ماده های ساینده تجاری به دست آمده اند. کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با ذره ها مانند فلزهای یک پارچه، تمایل به داشتن خاصیت های همسان گرد دارند. ذره ها قابلیت انعطاف پذیری خوبی در ایجاد خاصیت های مناسب و سودمند در زمینه دارند. تقویت کننده SiC ، Al_2O_3 ، TiB_2 ، بر و گرافیت خاصیت های فیزیکی و مکانیکی متفاوتی را در زمینه آلومینیوم ایجاد می نمایند به عنوان نمونه کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذره های کاربید سیلیسیم، ماده ای با مقاومت سایشی خوب ایجاد می کند.

ذره ها شامل TiC ، TiB_2 ، B_4C ، Al_2O_3 ، SiC ، Si_3N_4 ، به عنوان تقویت کننده باعث افزایش سفتی و خاصیت مکانیکی در کامپوزیت زمینه فلزی می شوند. به طور کلی ذره های تقویت کننده، خاصیت هایی مانند افزایش سفتی، مقاومت سایشی و استحکام فشاری را در کامپوزیت ایجاد می کند. در حالی که ذره های اکسیدی، انعطاف پذیری و چقرمگی شکست را کاهش می دهند.

سیم ها

تعدادی از سیم های فلزی شامل تنگستن، بریلیوم، تیتانیوم، مولیبونیم به عنوان تقویت کننده در زمینه های

فلزی استفاده شده اند. از مهم ترین سیم های تقویت کننده، سیم تنگستن در سوپر آلیاژها و ماده های فوق هادی و ترکیب نیوبیوم - تیتانیوم و نیوبیوم - مس در زمینه مس است این پنج دسته تقویت کننده اکنون از مهم ترین تقویت کننده ها هستند که در دهه های اخیر مورد استفاده قرار گرفته اند و مسلماً تقویت کننده های دیگری در آینده توسعه خواهند یافت، بسته به نوع کاربرد کامپوزیت زمینه فلزی، نوع تقویت کننده و خاصیت های آن متفاوت خواهد بود به عنوان نمونه اگر از کامپوزیت در کاربردهای ساختاری استفاده شود، خاصیت های مدول کشسانی، استحکام و چگالی کامپوزیت مهم است. بنابراین تقویت کننده ای با مدول بالا و چگالی پایین استفاده می شود. اگر کامپوزیت در کاربردهای کنترل گرما استفاده شود، ضریب انبساط گرمایی و قابلیت هدایت حرارتی مهم است و در کاربردهایی که مقاومت سایشی اهمیت دارد سختی تقویت کننده باید مدنظر قرار گیرد. در جدول ۲-۶ خاصیت های چند نوع از کامپوزیت های زمینه فلزی با تقویت کننده های مختلف با یک دیگر مقایسه شده است.

| کامپوزیت زمینه فلزی | چگالی g/cm ³ | مدول کشسانی Gpa | | استحکام کششی Mpa | استحکام فشاری Mpa | استحکام تسلیم Mpa |
|---|----------------------------|--------------------|------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | طولی | عرضی | | | |
| آلیاژ آلومینیوم +۲۱۲۴ SiC ۲۵٪ ذره های | ۲/۸۸ | ۱۱۵ | — | ۶۵۰ | — | ۴۸۰ |
| آلیاژ آلومینیوم +۳۵۹ SiC ۲۰٪ ذره های | ۲/۸۵ | ۱۰۲/۳ | — | ۲۹۹ | — | ۲۷۸ |
| آلومینیوم خالص + ۶۰٪ الیاف پیوسته آلومینا | ۳/۴ | ۲۴۰ | ۱۳۰ | ۱۶۰۰ | ۱۷۰۰ | — |
| آلیاژ آلومینیوم ۲٪ مس + ۶۰٪ الیاف پیوسته آلومینا | ۳/۴ | ۲۴۰ | ۱۶۰ | ۱۵۰۰ | ۳۴۰۰ | — |

جدول ۳-۵ خاصیت های چند نمونه از کامپوزیت های زمینه فلزی

فرآیندهای ساخت کامپوزیت های زمینه فلزی (MMC)

در سال های اخیر با توجه به نقش مهم کامپوزیت های زمینه فلزی (MMC) در به سازی آلیاژها، فرآیندهای ساخت آن ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با انتخاب مواد تقویت کننده مختلف و انواع آن ها به لحاظ ساختاری (ذره ای، الیافی، ...) می تواند روش های ساخت متفاوت باشد.

فرآیند ساخت کامپوزیت های زمینه MMC را می توان مطابق شکل ۲-۶ تقسیم بندی نمود. در این نوع تقسیم بندی هم مراحل فرآیند و هم نوع فرآیندهای متفاوت لحاظ شده است.

مراحل فرآیند

مراحل فرآیند شامل چهار مرحله است :

۱_ پیش فرآیند Pro-Processing

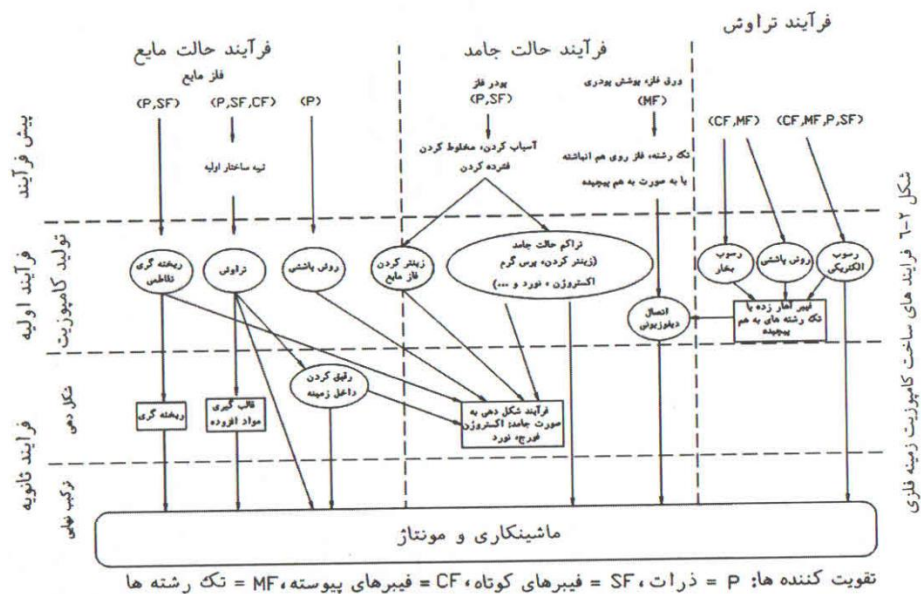
۲_ فرآیند اولیه Primary- Processing

۳_ فرآیند ثانویه Secondary- Processing

۴_ ماشین کاری و اتصال Machining and / or Joining

پیش فرآیند Pro-Processing

تمام مراحل که قبل از فرآیند اولیه انجام می شود پیش فرآیند گویند. مانند عملیات سطحی روی اجزای ترکیبی کامپوزیت، تهیه ساختار اولیه Preform برای انجام فرآیندهای ثانویه، تهیه پودر فلز شامل شامل عملیات آسیاب کردن، فشرده کردن، مخلوط کردن و تولید تک رشته ها و یا الیاف چند رشته ای به صورت انباشته یا به هم پیچیده است. تهیه ذره ها و الیاف کوتاه تقویت کننده و هرگونه انجام عملیات سطحی جهت آماده سازی زمینه نیز از مراحل پیش فرآیند است.



شکل ۳-۳ فرآیندهای ساخت کامپوزیت زمینه فلزی

فرآیند اولیه تولید کامپوزیت زمینه فلزی Primary- Processing of composite

در این مرحله، مواد کامپوزیتی توسط اتصال اجزای ترکیبی مواد توسط فرآیندهای فاز مایع، فرآیندهای فاز جامد و فرآیندهای رسوبی تولید می شوند. اما ضرورتاً شکل نهایی یا میکرواستراکچر نهایی تشکیل نمی شود. فرآیند اولیه تولید کامپوزیت زمینه فلزی الیاف پیوسته مانند اتصال دیفیوژیونی فویل - الیاف - فویل استفاده از فرآیند نورد یا درون تراوری است.

فرآیند ثانویه Secondary- Processing

فرآیند ثانویه، فرآیندی است که بعد از فرآیند اولیه انجام می شود و هدف آن تغییر دادن شکل یا میکرواستراکچر مواد است. فرآیندهای ریخته گری، فورجینگ، نورد، اکستروژن و عملیات حرارتی و . . . از فرآیندهای ثانویه به شمار می آیند. بعد از انجام این فرآیند، فازهای موجود در ترکیب ها و شکل نهایی کامپوزیت تغییر می کند.

فرآیندهای ثانویه شامل تحکیم کامپوزیت زمینه فلزی consolidation if MMC، ریخته گری مواد افزوده کامپوزیت زمینه فلزی MMC insertion casting و کامپوزیت زمینه فلزی در جای خود MMC in situ که در آن فاز تقویت کننده در مرحله اول طی انجام واکنش تولید می شود مانند TiB_2 برای تشکیل TiC در تعدادی از فلزها توسط افزایش کربن واکنش ایجاد می کند)

فرآیندهای حالت جامد Solid state methods

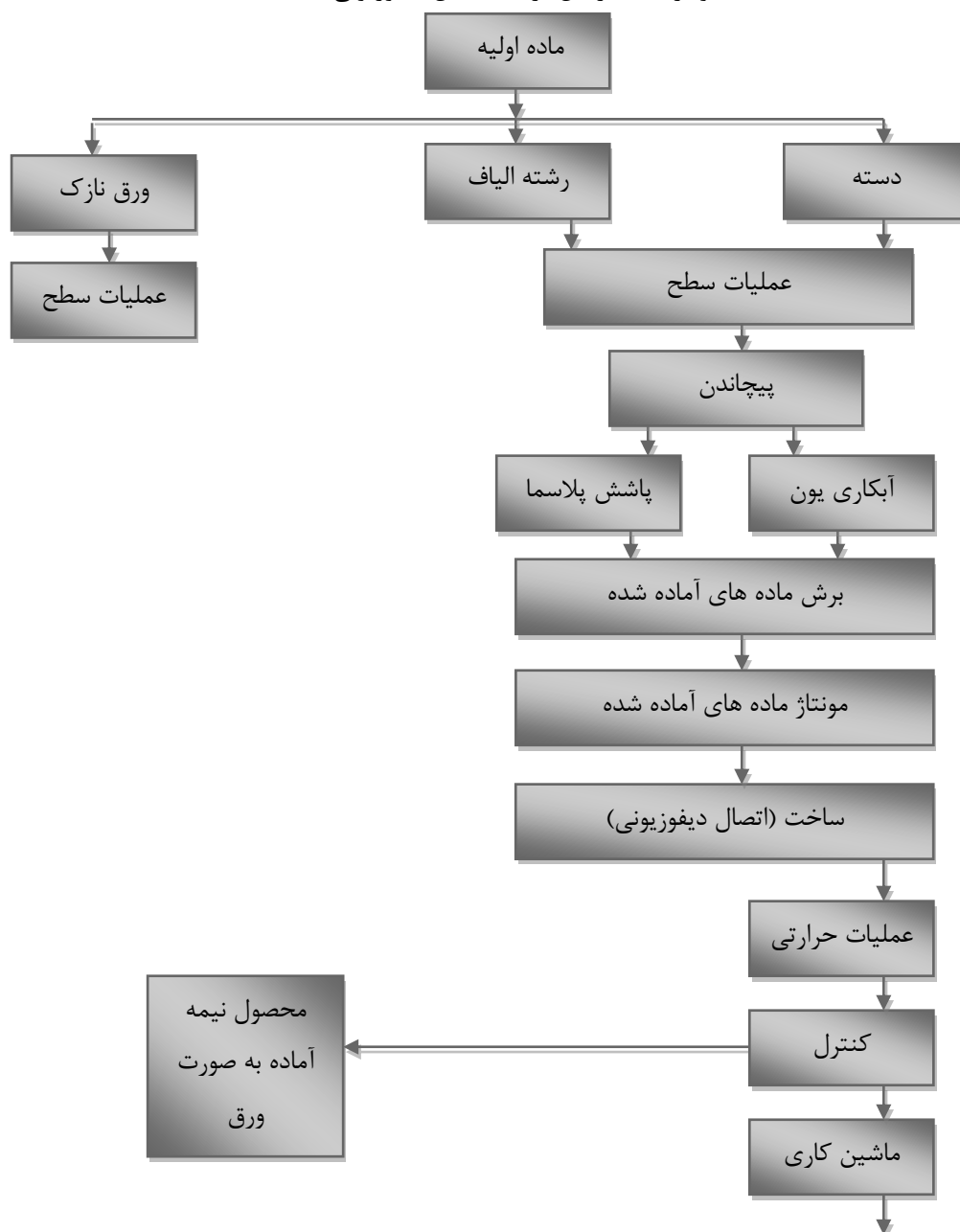
این فرآیندها شامل فرآیند اتصال دیفیوژیونی، نورد گرم، اکستروژن، مفتول کشی، جوشکاری انفجاری، روش متالورژی پودر PM و . . . می باشد. اما در میان آن ها، فرآیندهای اتصال دیفیوژیونی و متالورژی پودر به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد.

اتصال دیفیوژیونی Diffusion bonding

معمولاً این روش در ساخت کامپوزیت زمینه فلزی که مواد تقویت کننده الیاف و مواد زمینه ورق و یا فویل هستند، استفاده می شود. نمودار ۲-۷ مراحل فرآیند ساخت MMC را به روش اتصال دیفیوژیونی نشان می دهد.

ابتدا در این روش، مواد زمینه و تقویت کننده به طور شیمیایی تحت عملیات سطح قرار می گیرند. الیاف روی ورق های نازک فلز در جهت از قبل تعیین شده قرار داده می شوند و اتصال به وسیله پرسکاری ایجاد می شود. بنابراین گهگاه الیاف قبل از اتصال دیفوزیونی، توسط پاشش پلاسما یا آبکاری یون، پوشش داده می شوند تا استحکام پیوند را بالا ببرند. بعد از اتصال، ماشین کاری ثانویه انجام می شود. با اتصال قطعات و کنترل نهایی، کامپوزیت زمینه فلزی تهیه شده است. فشار و درجه حرارت اعمالی، در فرآیند اتصال دیفوزیونی در سیستم های کامپوزیت به راحتی تغییر می یابد. به هر حال این روش، روش پرهزینه برای ساخت کامپوزیت زمینه فلزی است.

نمودار ۲-۳ مراحل فرآیند اتصال دیفوزیونی





روش متالورژی پودر (PM) Powder Metallurgy

روش متالورژی پودر، بیشتر برای تهیه کامپوزیت زمینه فلزی که با الیاف ناپیوسته، ذره ها ویسکرها تقویت شده اند، استفاده می شود. نمودار ۲-۸ مراحل فرآیند ساخت کامپوزیت را به روش متالورژی پودر PM نشان می دهد. در فرآیند اصلی، ابتدا پودرهایی از ماده های زمینه و تقویت کننده در هم آمیخته می شوند. سپس داخل یک قالب به شکل مطلوب، تغذیه می شوند. پس از آن فشار به سیستم وارد می شود تا تماس بیش تر بین پودر ایجاد شود (پرس کاری سرد) به منظور اتصال بهتر، ذره های پودر (ذره های به هم پیوسته) تا درجه حرارتی که زیر نقطه ذوب است، حرارت داده می شوند. افزایش درجه حرارت باید به قدر کافی باشد تا نفوذ حالت جامد (زینتر کردن) انجام شود. سپس بعد از انجام عملیات ثانویه (اکستروژن، نورد، فورج) به عنوان کامپوزیت مورد استفاده قرار می گیرد. این روش در مقابل سایر روش ها قابلیت اطمینان بیشتری دارد بنابراین عمومی تر است، اما مرحله ترکیب و مخلوط کردن آن وقت گیر است و گران نیز می باشد. به علاوه، توزیع درست ذره های محصول مشکل است و استفاده از پودر نیازمند تمیزی زیاد در آن ها است. و اگر این گونه نباشد، وجود آخال های به هم پیوسته در محصول باعث اثر زیان آور بر روی چقرمگی شکست، طول عمر خستگی و غیره می شود.

روش پیچی Wire Winding

در این روش، مواد اولیه MFRM با سیم های فلزی و الیاف سرامیکی تولید می شوند و برای عملیات بعدی مانند اتصال دیفیوژیونی، از نوع پرس گرم آماده می شوند.

روش پوشش پودری Powder Cloth Method

نوعی از روش Foil-Fiber-Foil برای تولید MFRM است. در این روش پودرهای فلز زمینه با چسب مخلوط می شوند و داخل یک پوشش یا فویل قبل از دسته بندی قرار می گیرند.

تحکیم پودر Powder Consolidation

در یک اتصال دیفیوژیونی (اولیه) زمینه به شکل پودر، مخلوط شده و با فشار یا بدون فشار در درجه حرارت مورد ارزیابی با جز تقویت کننده تحکیم می شود.

زینتر کردن (MMC) MMSintering

ترکیب ماده های مجتمع در درجه حرارت های مورد نظر بدون کاربرد فشار.

پرس گرم (MMC) MMCHotPressing

ترکیب ماده های مجتمع توسط اتصال دیفیوژیونی با کاربرد فشار توسط پیستون (پرس گرم) در درجه حرارت های بالا به قدر کافی موثر در زینتر کردن هم زمان زمینه که زمینه های فلز معمولاً بالاتر از درجه حرارت مجدد زمینه است.

پرس سرد (MMC) MMCColdPressing

ترکیب جز ماده ها با کاربرد فشار توسط پیستون، در درجه حرارت های پایین و موثر در زینتر هم زمان زمینه که در زمینه های فلزی معمولاً زیر درجه حرارت تبلور مجدد زمینه است.

پرس ایزو استاتیک گرم (HIP) MMCHotIsostaticPressing

اتصال دیفیوژیونی جز ماده ها با کاربرد فشار هیدرواستاتیک توسط گاز، در درجه حرارت های به قدر کافی بالا برای زینتر کردن هم زمان زمینه که در زمینه های فلزی بالاتر از درجه حرارت تبلور مجدد است.

پرس ایزو استاتیک سرد (HIP) MMCColdIsostaticPressing

پرس سرد جز ماده ها با کاربرد فشار هیدرواستاتیکی به وسیله مایع یا گاز، در درجه حرارت های به قدر کافی موثر در زینتر کردن هم زمان زمینه، که در مورد زمینه های فلزی معمولاً زیر درجه حرارت های تبلور مجدد است.

نورد پودر (MMC) MMCPowderRolling

ترکیب اجزای مواد با کاربرد فشار به وسیله غلتک های نورد. نورد سرد زیر درجه حرارت تبلور مجدد فلز و

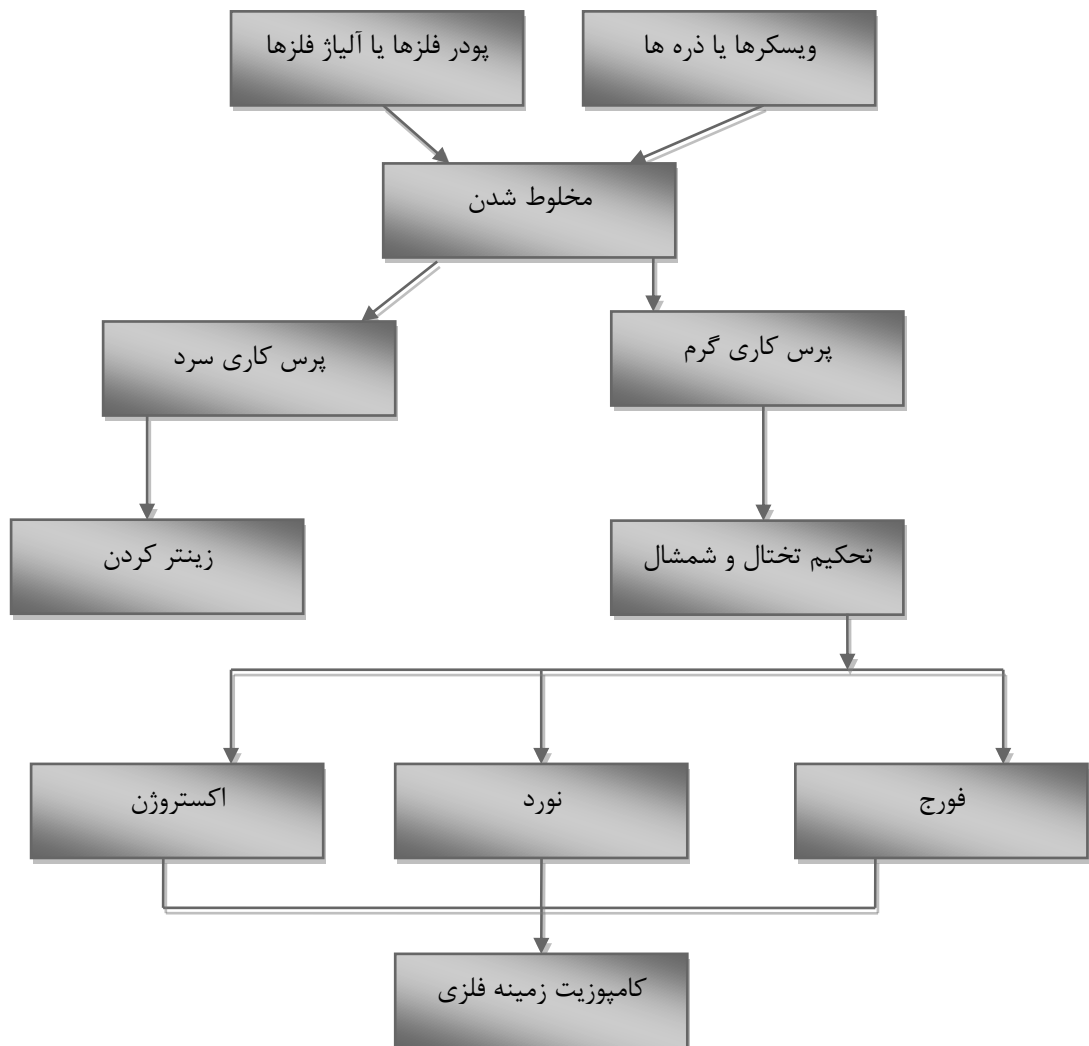
نورد گرم در درجه حرارت های بالاتر از تبلور مجدد انجام می شود.

اکستروژن پودر (MMC) Powder Extrusion

ترکیب اجزای مواد با کاربرد فشار به وسیله پرس اکستروژن. اکستروژن سرد زیر درجه حرارت تبلور مجدد فلز و اکستروژن گرم در درجه حرارت های بالاتر انجام می شود.

فورجینگ پودر (MMC) Powder Forging

ترکیب اجزای مواد با کاربرد فشار به وسیله پرس فورجینگ. فورجینگ سرد زیر درجه حرارت تبلور مجدد و فورجینگ گرم در درجه حرارت های بالاتر انجام می شود.



نمودار ۳-۳ مراحل ساخت کامپوزیت به روش متالورژی پودر

فرآیندهای حالت مایع Liquid State Methods

اغلب کامپوزیت های زمینه فلزی توسط فرآیندهای حالت مایع ساخته می شوند. در این روش ذره های سرامیکی داخل فلز مذاب با استفاده از فرآیندهای مختلف به هم پیوسته اند. کامپوزیت مایع حالت آبکی دارد و به شکل های گوناگون قالب ریزی می شود، این کار توسط روش های ریخته گری معمولی یا داخل قالب ریخته گری، برای فرآیندهای ثانویه انجام می شود. مزیت اصلی این فرآیند، تولید MMC با هزینه پایین است و مشکل اصلی این روش، عدم مرطوب کردن ذره ها توسط آلومینیوم مایع و در نتیجه طرد ذرات از مذاب می باشد و مشکل دیگر توزیع غیر یکنواخت ذره ها ناشی از جداسازی و واکنش وسیع فصل مشترک است. تولید کامپوزیت زمینه فلزی از طریق روش مایع / فلز انجام می شود. با درون تراوری فلز مذاب به درون دسته های الیاف و مخلوط کردن فلز مذاب با ذره های تقویت کننده، فرآیند در درجه حرارت بالا همراه با خطر انجام واکنش های شیمیایی انجام می شود.

این فرآیند به صورت های مختلف می تواند انجام شود. در درون تراوری خودبه خودی، بدون اعمال نیرو، زمینه به طور خودبه خودی نفوذ می کند. مانند مس داخل تنگستن توسط رطوبت مستقیم و یا پوشش نیکل روی تقویت کننده برای درون تراوری با آلومینیوم با کنترل کردن اتمسفر. نوع دیگر فرآیند، درون تراوری با نیرو است (Forced infiltration) که این فرآیند خودبه خودی نیست و نیاز به بکارگیری نیرو در زمینه یا تقویت کننده دارد و یا درون تراوری تحت فشار است (Pressure infiltration) این فرآیند همراه با فشار هیدرواستاتیکی در سطح زمینه مذاب، برای راندن مایع به داخل ساختار اولیه است. ممکن است فشار هیدرواستاتیکی به کار گرفته شده توسط هوا داخل زمینه ذوب، آن را به ساختار اولیه خلا براند. بعضی فرآیندهای خلا خود تولیدی است. (واکنش منیزیم با هوا یا اکسیژن در ساختار اولیه). این فرآیند را درون تراوری تحت خلا نیز می گویند (Vacuum infiltration).

درون تراوری فلز مایع (Liquid metal infiltration)

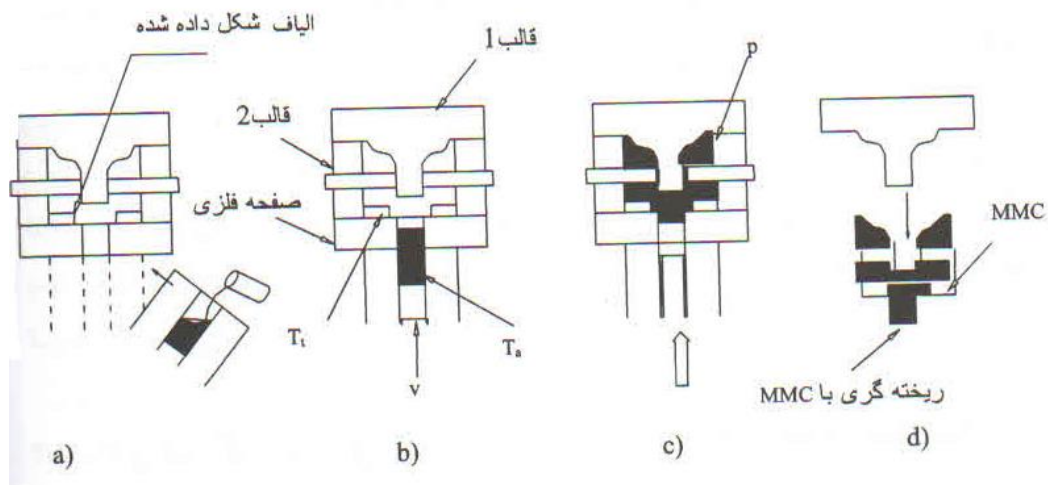
این فرآیند می تواند تراوش الیاف نیز نامیده شود. الیاف فیبری می تواند با گذراندن از یک حمام فلز مذاب درون تراوری شود. معمولاً الیاف باید در جریان این فرآیند با رطوبت بالا، پوشش داده شوند. فقط یک مرتبه سیم های تراوش شده تولید می شود بنابراین باید به شکل ساختار اولیه مونتاژ شود و طی فرآیند ثانویه یک ترکیب را تولید کنند.

فرآیند ساخت کامپوزیت زمینه فلزی به وسیله دزون تراوری فلز تحت خلا توسط Chapman انجام شده است. این محقق الیاف اکسید آلومینیوم FP (الیاف چند کریستاله) را استفاده کرده است. در این روش، مانند مرحله اول، الیاف FP در یک نوار ملموس با یک چسب آلی، طی یک فرآیند شبیه تولید یک کامپوزیت زمینه پلیمر prepreg ساخته می شود. نوارهای FP الیاف را برداشته و سپس در جهت مطلوب می خوابانند، بار حجمی الیاف و شکل، مشخص است، پس از آن در یک قالب ریخته گری که از جنس فولاد یا ماده مناسب دیگری می باشد، قرار می دهند. چسب آلی، سست و نسوز است، و الیاف با فلز مذاب درون تراوری شده و اجازه داده می شود تا به حالت جامد دربیاید. فلزهایی مانند آلومینیوم، منیزیم، نقره و مس به عنوان مواد زمینه در فرآیند درون تراوری مایع به دلیل نقطه ذوب نسبتاً پایین آن ها، استفاده می شوند. این روش در تولید نمونه های کامپوزیتی با اندازه کوچک که خاصیت های غیر جهت دار دارند، مطلوب می باشد.

ریخته گری فشاری Squeeze casting

ریخته گری فشاری یک مرحله اولیه از فرآیند شکل دهی فلز است. در این فرآیند مقدار تعیین شده ای از فلز مایع در یک قالب که قابلیت استفاده مجدد را دارد، تحت فشار بالا (۵۰ تا ۱۰۰ Mpa) در معرض انجماد سریع قرار می گیرد و محصولی با تیرانس دقیق و شکل نهایی با دقت بالا، تولید می کند. فرآیند ساخت MMC به وسیله ریخته گری فشاری در شکل ۲-۷ نشان داده شده است. ساختار اولیه الیاف سرامیکی تا چند درجه سانتی گراد زیر درجه حرارت ذوب زمینه پیش گرم شده و سپس داخل قالب فلزی قرار داده می شوند. آلیاژ آلومینیوم یا منیزیم تا بالاتر از درجه حرارت ذوب گرم می شوند و سپس داخل ساختار اولیه الیاف به وسیله پرس هیدرولیک فشرده می شود تا مخلوطی از الیاف و فلز مذاب را تشکیل دهند.

این فرآیند می تواند برای ساخت در مقیاس بزرگ استفاده شود. اما این عملیات نیازمند کنترل دقیق متغیرهای فرآیند، شامل الیاف و درجه حرارت پیش گرم فلز مایع، عنصرهای آلیاژی فلز، سرد کردن خارجی، کیفیت ذوب، درجه حرارت ابزار، تاخیر زمانی بین بستن در قالب و تنظیم فشار درونی آن، سطح فشار و مدت آن و سرعت بارریز ریخته گری است. کنترل ناقص متغیرهای فرآیند منجر به عیب های مختلف می گردد. شامل تغییر شکل ساختار اولیه، سستی الیاف، آخال های اکسیدی و دیگر عیب های معمولی ریخته گری، بنابراین در استفاده کاربردی، ریخته گری فشاری، روش بسیار موثری در ساخت قطعه های ماشین با شکل های پیچیده و در زمان کوتاه است.

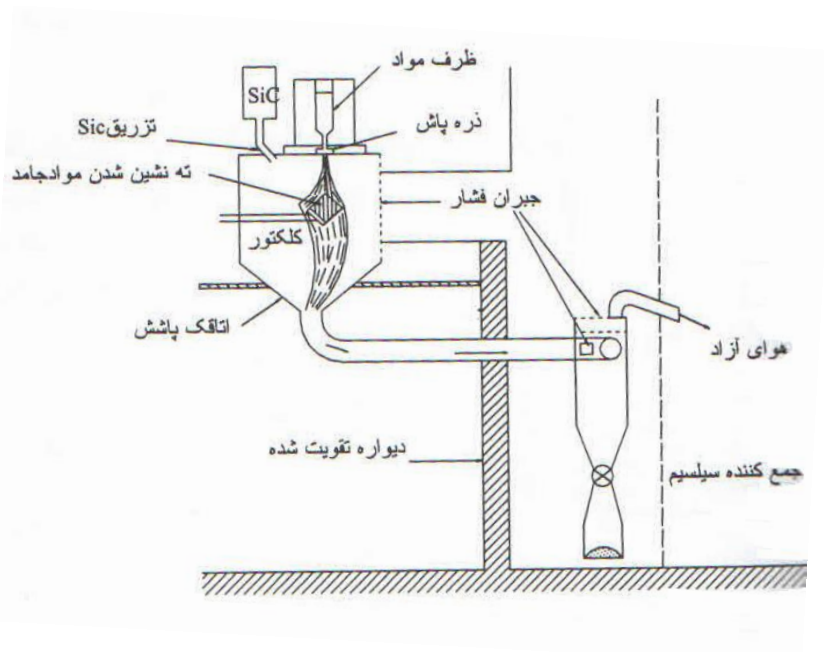


شکل ۳-۴ فرآیند ریخته گری با یک ماشین عمومی

(a) ماشین (b) ریختن ماده (c) ریخته گری (d) پرس کردن

روش هم نشست پاششی Spray co-deposition method

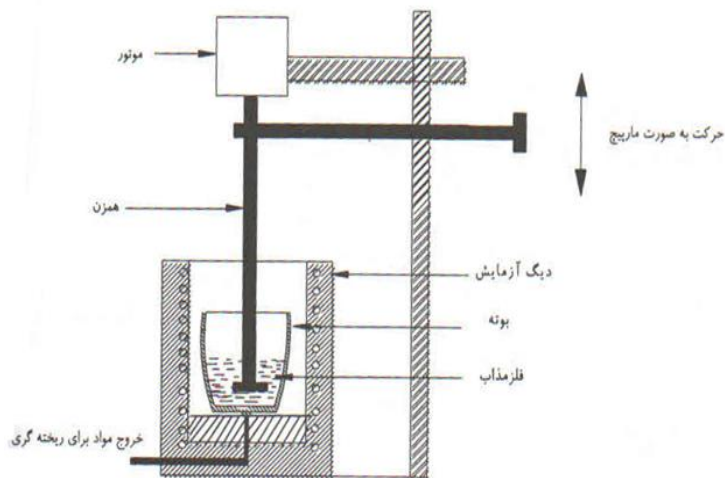
این روش یک روش اقتصادی برای تولید کامپوزیت ذره ای است. شماتیکی از این فرآیند در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. آلیاژی که اسپری می شود، در یک بوته توسط گرمای القایی ذوب می شود. فشار بوته تنظیم شده و فلز از یک نازل که داخل آن یک ذره پاش وجود دارد، پاشیده می شود. در زمان مشخص، ذره ها (تقویت کننده) داخل فلز اتمایز شده از نازل تزریق می شوند و روی زمینه از پیش گرم شده در مسیر جریان اسپری کردن به حالت رسوب قرار می گیرند. رسوب جامد روی جمع کننده (کلکتور) ایجاد می شود. نوار رسوب شده، هنگامی که سرد شد، برای نوار بعدی منتقل می شود. شکل محصول نهایی به شرایط پاشش فلز، شکل و حرکت جمع کننده بستگی دارد.



شکل ۳-۵ تجهیزات هم نشست پاششی

ریخته گری تلاطمی Stir casting

اخیرا ساده ترین و اقتصادی ترین روش تولید کامپوزیت زمینه فلزی، روش ریخته گری تلاطمی است. (شکل ۲-۹) در این روش، مخلوط مکانیکی از ذره های تقویت کننده داخل حمام فلز مذاب تشکیل می شود، این مخلوط توسط هم زن یکنواخت می شود و انجماد تکمیل می گردد. در این فرآیند، ایجاد رطوبت خوب میان ذره های تقویت کننده و فلز مذاب یک مشکل بحرانی است. ساختار میکروسکوپی ناهمگن می تواند باعث آگلومره شدن قابل توجه ذره ها و رسوب در مذاب در مدت انجماد گردد. ناهمگنی در توزیع تقویت کننده در این کامپوزیت های ریخته گری می تواند در نتیجه فعل و انفعال شیمیایی میان ذره های سرامیکی معلق شده و حرکت فصل مشترک جامد - مایع در مدت زمان انجماد، ایجاد شود. مزیت اصلی این فرآیند، تولید کامپوزیت زمینه فلزی با هزینه پایین است.



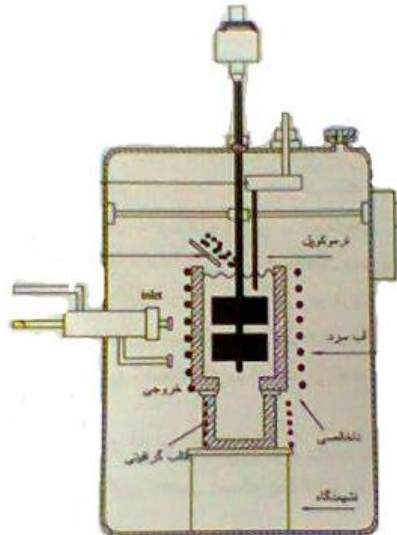
شکل ۳-۶ ساخت MMC به روش ریخته گری تلاطمی

ریخته گری ترکیبی Compcasting

بعد از روش متالورژی پودر (PM) اسپری حرارتی، اتصال دیفوزیونی و ریخته گری فشاری با فشار بالا، روش ریخته گری ترکیبی برای ساخت کامپوزیت با الیاف ناپیوسته (الیاف ریز ریز شده، ویسکرها و ذره ها) روشی اقتصادی است. این فرآیند، اصلاح شده ی فرآیند ریخته گری پوسته ای یا تلاطمی است. شماتیکی از تجهیزات ریخته گری ترکیبی در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. این تجهیزات شامل یک منبع تغذیه القایی (۳۰۰۰ Hz و ۵۰ KW) یک اتاق خلا با آب سرد و پمپ و متعلقات مکانیکی آن و یک بوته آهنگری (ظرف مخصوص ذوب) و مخلوط کن برای به هم زدن کامپوزیت ها، می باشد. ابتدا یک آلیاژ فلز در سیستم قرار داده می شود، سپس اتاق خلا ایجاد شده و آلیاژ تا بالاتر از درجه حرارت ذوبش گرم می شود و توسط موتور D.C شروع به تلاطم می کند تا درجه حرارت در همه جای آن همگن شود. نیروی القایی به طور تدریجی کاسته می شود تا آلیاژ ۴۰-۵۰٪ جامد شود، در این نقطه، ذره های غیر فلزی به ماده مذاب اضافه می شوند، بنابراین درجه حرارت در طول اضافه کردن ذره های غیر فلزی بالا می رود. در این حالت مقدار کلی جامد، شامل الیاف و گلبول های جامد است که بیش تر از ۵۰٪ ماده مذاب نمی باشد، هم زدن ادامه می یابد تا فعل و انفعالات فصل مشترک بین ذره ها و زمینه، تا افزایش مرطوب کنندگی انجام شود.

حرارت مذاب موجود را، تا بالاتر از درجه حرارت مایع زیاد کرده و سپس نیمه پایینی قالب گرافیتی را با بالا آوردن تیغه مونتازی پر می کنند. مذاب که شامل ذره های غیر فلزی است، به نیمه پایینی قالب انتقال می یابد و نیمه بالایی قالب را بالا می آورند تا کامپوزیت را شکل دهد و به وسیله فشار پرس، کامپوزیت به حالت

جامد در می آید. این روش برای ساخت کامپوزیت هایی استفاده می شود که مقدار سهم تقویت کننده زیاد باشد.



شکل ۳-۷ ریخته گری ترکیبی: الیاف یا ذره های مخلوط با فلز

فرآیند های رسوبی Deposition Process

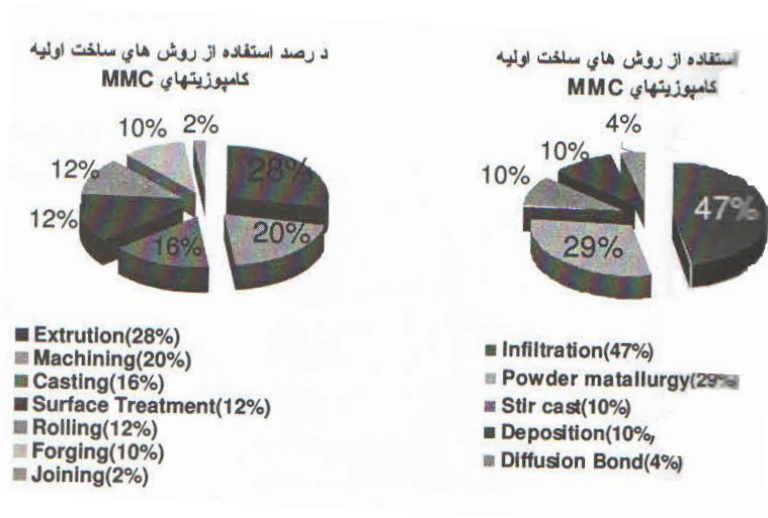
به طور معمولی روش ساخت فاز مایع نسبت به روش ساخت فاز جامد، موثرتر می باشد، زیرا فرآیند فاز جامد زمان طولانی تری را نیاز دارد. با توجه به شکل فاز زمینه مورد استفاده، روش های ساخت متفاوت خواهد بود.

به عنوان نمونه زمینه پودر، در فشار پنوماتیکی و روش متالورژی پودر و زمینه مایع در روش درون تراوری فلز مایع استفاده می شود، در روش های پاشش پلاسما، ریخته گری پاششی، ریخته گری فشاری، ریخته گری فشاری (درون قالب فلزی)، ریخته گری ثقیلی، ریخته گری تلاطمی، ریخته گری دقیق، یک شکل مولکولی از زمینه استفاده می شود. ورق های فلزی در اتصال دیفوزیونی (نفوذی) رولینگ، اکستروژن و غیره استفاده می شود. از این فرآیند ها، فرآیندهای اصلی ساخت، اتصال دیفوزیونی، روش متالورژی پودر، درون تراوری فلز مایع، ریخته گری فشاری، هم نشست پاششی، ریخته گری تلاطمی و ریخته گری ترکیبی هستند که امروزه در صنایع استفاده می شوند. درصد استفاده از فرآیندهای ساخت اولیه و ثانویه دو نمودارهای ۲-۹ نشان داده شده است. فرآیند درون تراوری فلز مایع با ۴۷ درصد بیش ترین استفاده و اتصال دیفوزیونی با ۴ درصد کم ترین استفاده را در فرآیندهای تولید اولیه کامپوزیت زمینه فلزی دارد در

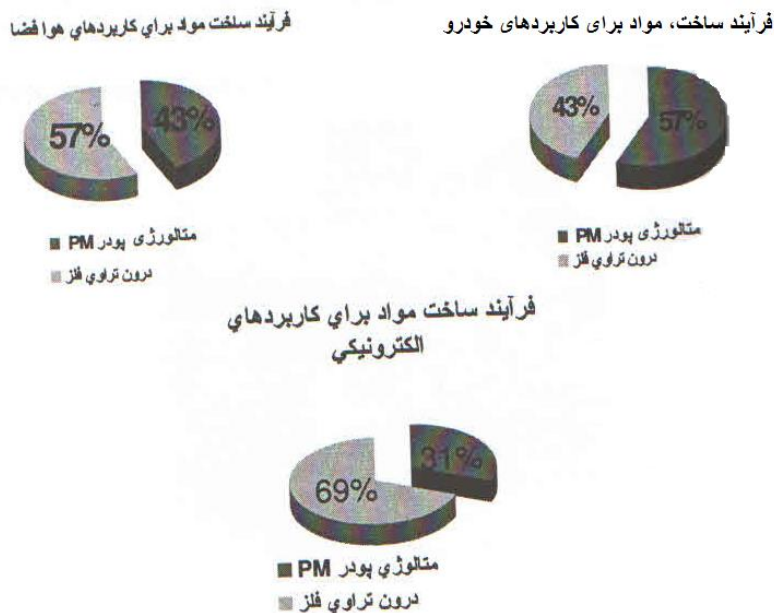
فرآیندهای ثانویه اکستروژن با ۲۸ درصد و فورجینگ با ۱۰ درصد کمترین استفاده را دارد و نمودارهای ۲-۱۰ فرآیندهای ساخت مواد را در کاربردهای هوا-فضا، خودرو و صنعت الکترونیک نشان می‌دهد.

فرآیندهای دو فازی (جامد / مایع)

این فرآیند شامل ریخته‌گری تلاطمی (به هم زدن شدید مذاب در حال انجماد) و بمباران اتمی پاششی می‌باشد.



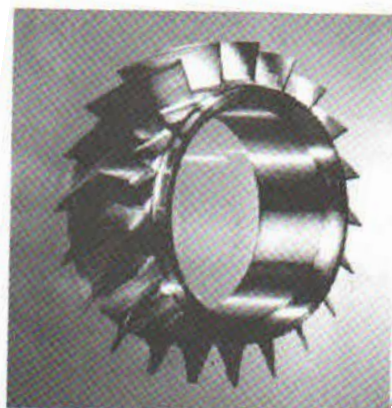
نمودار ۳-۴ درصد استفاده از فرآیندهای اولیه و ثانویه



نمودار ۳-۵ فرآیندهای ساخت مواد در کاربردهای مختلف

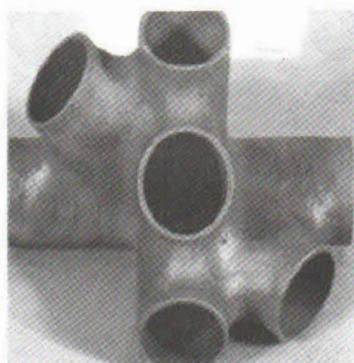
نمونه هایی از کاربرد کامپوزیت های فلزی MMC

نمونه پروانه ساخته شده از کامپوزیت فلزی که در آن آلیاژ تیتانیوم توسط الیاف SiC تقویت شده است و باعث کاهش وزن و افزایش عمر کاری قطعه شده است.



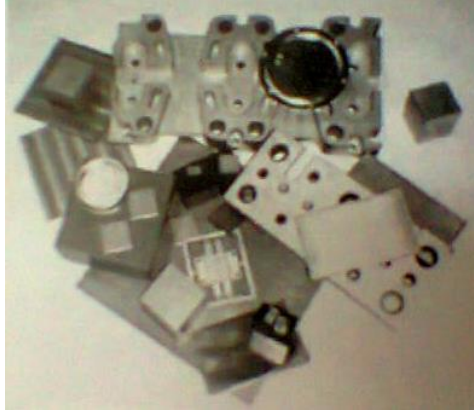
شکل ۳-۸ پروانه ساخته شده از Ti/SiC

چند راهی اتصال برای نقاط گره ای در خراباها که از کامپوزیت Gr/Al ساخته شده.



شکل ۳-۹ چند راهی اتصال

نمونه قطعه کامپوزیت فلزی که در صنایع الکترونیک کاربرد دارد. این قطعات از آلومینیوم تقویت شده با الیاف گرافیت ساخته شده است.



شکل ۳-۱۰ قطعه های کامپوزیت فلزی مورد استفاده در صنایع الکترونیک

فصل چهارم

فیبر کربن

مقدمه

فیبر کربن کامپوزیتی است با طول زیاد و ضخامت خیلی کم که به طور عمده از اتم‌های کربن تشکیل یافته است و با فاصله‌های قطری ۰,۰۰۵ تا ۰,۰۱۰ میلی‌متر به هم تابیده شده‌اند که دارای وزن سبک و مقاومت بالایی هستند. اتم‌های کربن به صورت کریستال‌های میکروسکوپی که در جهت اصلی محور فیبرهای کربن قرار گرفته‌اند به هم متصل شده‌اند. جهت‌گیری کریستال، فیبرها را به طور شگفت‌انگیزی قدرتمند می‌کند. هزاران هزار فیبر کربن به هم تابیده می‌شوند تا یک رشته نخ کربنی به وجود بیاید که می‌توان از آن به طور مستقل یا بافتن در یک ماده‌ی دیگر استفاده کرد. یک تک رشته‌ی فیبر کربن یا ماده‌ای که فیبر کربن در آن بافته شده را با رزین اپوکسی مخلوط می‌کنند و توسط روش قالب‌گیری یا تنیدن در هم شکل داده می‌شوند تا مواد کامپوزیتی مختلفی از آن‌ها به دست بیایند.

الیاف کربنیکی از مهم‌ترین خانواده‌های الیاف پیشرفته است که استحکام بسیار بالا (بین ۷ تا ۱۰ برابر فولاد ساختمانی بسته به گرید الیاف)، چگالی پایین (حدود دو سوم آلومینیوم)، رسانایی الکتریکی بسیار خوب، قابلیت بافت و تولید پارچه، ساخت کامپوزیت‌های سبک و مستحکم و پایداری در برابر حرارت آن را از سایر مواد مهندسی متمایز می‌سازد. مواد اولیه‌ای که در تولید الیاف کربن به کار می‌رود، الیاف اکریلیک ویژه (تولید شده با هدف تبدیل به الیاف کربن) است که بر اساس فناوری‌های پیشرفته و تجهیزهای خاص تولید می‌شود.

امروزه فیبرهای کربن بخش مهم بسیاری از محصولات را تشکیل می‌دهند و کاربردهای آن هر ساله گسترش پیدا می‌کند. ایالات متحده آمریکا، ژاپن و اروپای غربی تولید کننده‌های انحصاری این مواد می‌باشند.

تاریخچه

فیبر کربن برای اولین بار در دهه‌ی ۵۰ به عنوان تقویت‌کننده برای قطعه‌های پلاستیکی تزریقی با دمای بالا در تولید جنگ افزارها به کار برده شد. آن زمان برای تولید فیبرهای اولیه، رشته‌های ابریشم مصنوعی را آن قدر حرارت می‌دادند تا کربونیزه شده و به صورت فیبر در بیایند اما این فرآیند اصلاً کارآمد نبود، زیرا فیبرهای حاصله تنها شامل ۲۰ درصد کربن بودند و استحکام و سختی پایینی داشتند. در انتهای دهه‌ی ۶۰ فرآیندی که در آن از پلی‌آکرونیتریل به عنوان ماده‌ی خام اولیه استفاده می‌کردند، به کار برده شد. فیبر کربن تولید شده با استفاده از این روش تقریباً ۵۵ درصد کربن داشت و در نتیجه خاصیت‌ها و ویژگی‌های برتری

نسبت به فرآیند قبلی داشت. این ویژگی‌ها باعث شده که این فرآیند به سرعت تبدیل به روش پایه برای تولید فیبرهای کربنی شوند.

در میانه‌ی دهه‌ی ۷۰، آزمایش‌های بسیاری برای پیدا کردن ماده‌ی خام جای‌گزین انجام گرفت که در نتیجه به معرفی قیر به دست آمده از تقطیر نفت خام به عنوان ماده خام اولیه انجامید. این فیبرها با داشتن میزان ۸۵ درصد کربن بهترین استحکام پیچشی را دارا بودند که متأسفانه به دلیل داشتن استحکام فشاری محدود مورد تایید صنعت‌گران قرار نگرفتند.

موارد مصرف فیبر کربن

به دلیل چگالی کم‌تر از فولاد دارای وزن کم ولی مقاومت بالاست اما چون مراحل تولید آن خیلی سخت و پیچیده می‌باشد باعث شده تا فقط فیبر کربن را در حال حاضر بهترین گزینه برای استفاده در صنایع هوایی و فضایی، بدنه‌ی خودروهای مسابقه‌ای، دسته‌ی چوب گلف، بدنه دوچرخه، چوب ماهیگیری، کمک فنر خودرو، بدنه قایق‌ها و بسیاری از وسایل که نیاز به سبک وزن بودن و استحکام بالا دارند، به کار ببرند. در خودروهای گران قیمت هم‌چون لامبورگینی سستو، پآگانی زوندا سینه کوئه و بوگاتی ویرون استفاده شود البته یکی دیگر از دلایل گران بودن فیبر کربن می‌توان به غیر بازیابی کردن این کامپوزیت اشاره کرد که به خودی خود باعث ارزشمند شدن این کامپوزیت سبک وزن می‌شود، از ویژگی‌های بزرگ این کامپوزیت می‌توان به عدم زنگ زدن، قابلیت انعطاف بالا و ترمیم مجدد با هزینه کم اشاره کرد.

الیاف کربن با توجه به خاصیت‌های شگفت‌انگیز مکانیکی، حرارتی و الکتریکی از کاربردهای متنوعی برخوردار است. کامپوزیت‌های ساخته شده از این الیاف در صنایع هوایی در بدنه هواپیماهای بوئینگ ۷۸۷، ایرباس و هواپیماهای هم‌رده آن‌ها به کار می‌رود. هم‌چنین در صنایع عمرانی برای تقویت بتن و بناهای ساخته شده مانند ستون‌ها، پل‌ها، تونل‌ها و اجزای ساختمان، صنایع خودروسازی و حمل‌ونقل و تولید مخزن‌های CNG، سیستم انتقال قدرت، ترمز و قطعه‌های بدنه، صنایع پزشکی و مهندسی پزشکی برای ساخت اعضای مصنوعی، پروتزهای داخل بدن، آتل‌های فوق‌سبک، پانسمان‌های سوختگی و داروهای گوارشی، صنایع انرژی چون ساخت پره‌های توربین بادی، مخزن‌ها و تجهیزهای استخراج نفت در دریا، لوازم‌های پیل سوختی کاربرد دارد.

امروزه با توجه به حرکت صنایع خودروسازی به سمت کاهش هر چه بیش‌تر مصرف انرژی، ساخت خودروهایی با مصرف سوخت پایین بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در راستای این هدف، کاهش

وزن خودرو و همچنین کاهش انرژی تلف شده که غالباً صرف غلبه بر مقاومت هوا می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این بین، بدنه‌های کامپوزیتی علاوه بر مقاومت بالا، دارای وزن بسیار کم‌تر نسبت به انواع دیگر بدنه از جمله بدنه‌های آلومینیومی هستند. پس بدنه‌هایی از این نوع، مورد توجه ویژه قرار گرفته است. همچنین برای کاهش اثر مقاومت هوا بر بدنه خودرو با استفاده از روابط آیرودینامیک سعی در کاهش ضریب دراگ و بهسازی فرم بدنه شده است.

چند نمونه از محصولاتی که در ساخت آن‌ها از الیاف فیبرکربن استفاده شده است

کمپانی معروف Lamborghini در یکی از محصولات‌های بسیار زیبای خود که دارای طراحی بدنه کاملاً جدیدی می‌باشد از کامپوزیت فیبرکربن CFC استفاده کرده است. اجزای بیرونی خودرو با این نوع کامپوزیت و همین‌طور فولاد کار شده که کاملاً با یک‌دیگر مقاوم شده است.

کمپانی BMW در برخی از محصولات‌های خود در قسمت ورودی هوا از الیاف فیبرکربن استفاده کرده است که علاوه بر زیبایی از استحکام بسیار خوبی برخوردار می‌باشد.

صندلی‌های بسیار سبک وزن با ساختار فیبرکربن مجهز به کمربندهایی با شش نقطه اتصال ساخت کمپانی معروف sparco همراه با بارها (لوله‌های واژگونی و تصادف) علاوه بر خودنمایی ایمنی راننده را تضمین می‌کند.

استفاده از فیبرکربن در ساخت رینگ‌های خودرو باعث شده است وزن خودرو به‌صورت محصولی کاهش پیدا کند و نیز علاوه بر سبک‌بودن بسیار مقاوم نسبت به ضربه می‌باشد. در مسابقه‌های اتومبیل‌رانی به دلیل این‌که هر چه خودرو از وزن کم‌تری برخوردار باشد می‌تواند سریع‌تر حرکت کند و امتیاز بیشتری را کسب کند، از این نوع رینگ‌ها استفاده می‌کنند.

در بدنه خودرو به‌خصوص در صنایع تیونینگ خودرو تیونرها در قسمت‌های مختلف اتومبیل از الیاف فیبرکربن استفاده می‌کنند به دلیل شکل‌پذیری بیش‌تر نسبت به ماده‌های فلزی و مقاومت بالا.

از این الیاف در داخل خودرو نیز استفاده می‌شود قسمت‌هایی که بیش‌تر در دسترس قرار می‌گیرد مانند فرمان، کنسول میانی، در قسمت رکاب از داخل خودرو و ... که نمای بسیار زیبایی به داخل خودرو می‌دهد.

امروزه استفاده از مواد جدید در صنعت خودروسازی امری کاملاً عادی و معمول شده است. در گذشته شاسی تمامی خودروها از فلزهای سنگین و سخت ساخته می‌شد. شاید دلیل این مساله مقاومت بالای این

فلزها در مقابل ضربه و خوردگی بود. اما با گذشت زمان فلزهای سنگین و سخت جای خود را به ماده‌های پلاستیکی و کامپوزیتی داده‌اند که نه تنها مقاومت آن‌ها از این‌گونه فلزها بیش‌تر است، بلکه وزن بسیار

کم‌تری داشته و می‌توانند در مصرف سوخت و عمر خودرو تاثیر بسیاری بگذارند.

کاهش وزن امروزه در تمامی خودروها بسیار مهم و تاثیرگذار است، به گونه‌ای که تمامی پارامترهای یک خودرو را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. به طور نمونه شما توان بدنی خود را در نظر بگیرید، هرچه بار کم‌تری به همراه داشته باشید می‌توانید سریع‌تر و چابک‌تر بدوید. در این شرایط حتی وزن کفش‌های شما نیز مورد توجه قرار می‌گیرد به گونه‌ای که کفش‌های بسیاری از دوندگان حرفه‌ای سرعت، بسیار سبک و مقاوم است. همین موضوع برای خودروها نیز کاملاً وجود داشته و تمامی خودروها از این قانون پیروی می‌کنند. نسبت قدرت به وزن برای خودرو نسبتی بسیار حیاتی و مهم است.

اما شاید این سوال پیش بیاید که این نسبت چیست و چه نقشی در خودرو دارد؟ در جواب این سوال باید گفت حاصل تقسیم قدرت خودرو به وزن آن نسبت قدرت به وزن گفته می‌شود. این نسبت تعیین‌کننده پارامترهای زیادی بوده و در مقابل تحت تاثیر عوامل زیادی است.

قدرت در این نسبت همان قدرت مفید موتور بوده که تحت تاثیر عوامل زیادی است. اما وزن در خودرو در بسیاری از نقاط، قابل کنترل و کاهش است. کاهش وزن نیاز به علم مهندسی مواد داشته که مواد مقاوم‌تر با وزن کم‌تر را جایگزین مواد قبلی کنند. برای این منظور راه‌کارهای متعددی وجود دارد. به طور نمونه شاسی‌های خودروهای جدید که از آلیاژهای آلومینیوم ساخته می‌شوند، دیسک‌های ترمز سرامیکی که قیمت بالایی دارند جایگزین دیسک‌های چدنی شده‌اند و در نهایت فیبرکربن جای‌گزین فولاد و آلومینیوم شده است.

اگر سری به سایت لامبورگینی بزنید در تبلیغ و مانور بر روی مدل گالاردو LP-570 SV به آینه‌ها و دیفیوزر و بخش‌های فیبرکربن خودرو اشاره کرده و مانور زیادی روی آن‌ها می‌دهد. شاید این چند قطعه سبب شده که این مدل جدید گالاردو چابک‌تر و زیباتر به چشم بیاید. کمی جلوتر برویم، لامبورگینی آونتادور مدلی از این شرکت است که شاسی آن در بخش اتاق کاملاً از فیبرکربن بوده و در قسمت موتور فلزی است. جالب اینجا بوده که فریم یا قاب نگه‌دارنده موتور به راحتی به بخش تمام کربنی اتاق پیچ شده است. قسمت نگه‌دارنده موتور یا شاسی در جایی که موتور بسته می‌شود تحت تنش بسیار زیادی قرار گرفته و نیروی زیادی را تحمل می‌کند. این نشان‌دهنده ظرفیت بالای فیبرکربن در تحمل نیرو و تنش است.

طبقه‌بندی فیبرهای کربنی

فیبرهای کربنی را بر اساس مقاومت کششی آن‌ها طبقه‌بندی می‌کنند. مقاومت کششی معیاری است که مقاومت یک فیبر را در برابر نیروی کششی خارجی تا قبل از شکست و پاره‌شدن بیان می‌کند. فیبرهای

کربن با مقاومت کششی زیر ۲۴۰ گیگاپاسکال را در دسته فیبرهای با مقاومت پایین طبقه‌بندی می‌کنند. نوع دیگری از آن را به صورت صعودی بر اساس مقاومت کششی در دسته‌های جداگانه‌ای با عنوان "مقاومت استاندارد"، "مقاومت متوسط"، "مقاومت زیاد" و "مقاومت فوق زیاد" طبقه‌بندی می‌کنند.

فیبرهای کربن با مدول فوق زیاد دارای مقاومت کششی بین ۵۰۰ گیگا تا ۱ تراپاسکال می‌باشند. در مقایسه آن با فولاد که مقاومت کششی ۲۰۰ گیگاپاسکال دارد، واضح است که فیبرهای کربنی ۵ برابر فولاد استحکام دارند.

فیبرهای گرافیتی گفته شده از نوع فیبرهای کربن با مدول فوق زیاد می‌باشند که از قیر به دست می‌آیند. ساختار داخلی این فیبرها طوری است که در آن کریستال‌ها در سه جهت به خصوص قرار گرفته‌اند که شکل خاصی از کربن خالص که گرافیت نامیده می‌شود، می‌نامند. انتقال حرارتی این فیبرها به مراتب از مس بیشتر است. به همین خاطر از این ویژگی فیبرهای گرافیتی نسبت به ویژگی مکانیکی آن استفاده می‌شود.

ماده خام

الیاف اکریلیک تجاری مورد استفاده برای تولید الیاف کربن همان الیاف به کار رفته در پوشاک، فرش و پتو هستند که از این حیث هیچ محدودیتی در تولید یا واردات نداریم. بستر تکنولوژی و دانش فنی کاملاً بومی صددرصد قابل توسعه است. ایران با دستیابی به دانش فنی و بومی‌سازی تولید الیاف کربن 300°T ، به عنوان یازدهمین کشور دنیا و اولین در خاورمیانه در دستیابی به این دانش معرفی شد.

ماده خام مورد استفاده برای ساخت فیبرهای کربنی را پیش ماده می‌نامند، تقریباً ۹۰ درصد فیبرهای کربن موجود از پلی‌آکرونیتریل ساخته می‌شوند ۱۰ درصد باقی مانده از ابریشم مصنوعی یا قیر نفتی ساخته می‌شوند. تمام این مواد پلیمرهای طبیعی هستند که از رشته‌های بلند مولکولی که توسط اتم‌های کربن به هم متصل شده، تشکیل می‌شوند. ترکیب دقیق پیش ماده برای هر کمپانی به صورت انحصاری و سری می‌باشند.

در طی فرآیند تولید از گازها و مایع‌های مختلفی استفاده می‌شود. بعضی از این ماده‌ها طوری طراحی شده‌اند تا در واکنش با فیبرها اثر مورد نظر را ایجاد کنند. دیگر ماده‌ها طوری طراحی شده‌اند که با فیبرها واکنش ندهند یا حتی از هر واکنشی با آن جلوگیری کنند. مانند پیش ماده‌ها که ترکیب دقیق مواد بسیاری از این فرآیندها به صورت سری و انحصاری برای شرکت‌های تولید کننده آن‌ها می‌باشند.

تقسیم بندی و فرآیند تولید الیاف فیبر کربن

فرآیند تولید فیبرهای کربنی شامل دو بخش شیمیایی و مکانیکی می‌باشد. پیش ماده به صورت رشته‌های بلند یا فیبری کشیده می‌شوند سپس با دمای خیلی بالا حرارت داده می‌شوند بدون این که با اکسیژن در تماس باشند. فیبر بدون اکسیژن نمی‌سوزد اما با حرارت دهی تا دمای خیلی بالا اتم‌های کربن در جای خود ارتعاش کرده تا تقریباً تمامی اتم‌های غیرکربنی خارج شوند. این فرآیند را کربونیزه کردن می‌نامند و در نهایت فیبرهای تشکیل شده از زنجیرهای بلند، محکم و درهم تنیده اتم‌های کربن و مقدار ناچیزی از مواد غیرکربنی باقی می‌ماند.

در حال حاضر سه نوع منبع برای تولید این الیاف وجود دارد :

۱- الیاف ساخته شده از گیاهان یا سلولزی

۲- الیاف کربن ساخته شده از قیر (phich)

۳- الیاف کربن ساخته شده از پلی آ کرونیتریل (PAN)

به دلیل ساختمان مولکولی و اتمی و هم‌چنین تولید مدول کششی قابل توجه با سایر انواع الیاف نوع سوم از اهمیت بیش‌تری برخوردار بوده و کاربردهای متعددی دارد.

با مقایسه سریع بین خواص این الیاف و فولاد می‌توان به اهمیت این مواد پی‌برد :

فیبرکربن استاندارد:

مقاومت کششی : Pa ۳,۵

مدول کششی : Pa ۲۳۰

چگالی : g/cm ۱,۷۵

فولاد با مقاومت زیاد :

مقاومت کششی: GPa ۱,۳

مدول کششی: GPa ۲۱۰

چگالی : g/cm ۷,۸۷

با توجه به جدول واضح است که الیاف کربن مقاومت کششی بالاتری نسبت به فولاد دارند در حالی که وزن آن‌ها نسبت به فولاد بسیار پایین‌تر است. به همین دلیل امروزه در صنایع مختلفی به ویژه خودروسازی سعی می‌شود از الیاف به جای فلزها استفاده شود.

ریسندگی

❖ پودر پلاستیک آکرونیتریل با یک پلیمر دیگر مانند آکریلات یا متیل متا آکریلات مخلوط می‌شود سپس با کاتالیزور طی یک فرآیند پلیمریزاسیون، محلول برای فرم و شکل‌دهی پلاستیک پلی‌آکرونیتریل، واکنش داده می‌شود.

❖ سپس ترکیب پلیمر به‌دست آمده به همراه فیبرها به روش‌های مختلفی درهم بافته و تنیده می‌شوند. در بعضی روش‌ها پلاستیک با ماده‌های شیمیایی خاصی مخلوط شده و به‌وسیله‌ی پمپ‌های جت کوچکی به داخل یک حوضچه حاوی ماده شیمیایی یا محفظه‌ی سخت‌کاری که پلاستیک در آن جا جامد شده و شکل ابتدایی خود را می‌گیرد، پمپ می‌شود. این فرآیند شبیه فرآیندی است که برای تولید الیاف فیبرهای آکرونیتریل به کار برده می‌شود. در روش دیگر مخلوط پلاستیک پس از حرارت دهی و توسط پمپ‌های کوچک جت به داخل محفظه‌ای که محلول تبخیر شده و فیبر جامد باقی می‌ماند، رانده می‌شود. مرحله ریسندگی به علت این که ساختارهای اتمی فیبرها در طی این فرآیند شکل می‌گیرند، اهمیت به‌سزایی دارد.

❖ فیبرها شستشو شده و به قطرهای مختلف کشیده می‌شوند. فرآیند کشش کمک می‌کند مولکول‌ها در طول فیبر جهت‌گیری مناسبی داشته و شکل‌دهی کریستال‌های کوچک کربن پس از کربونیزاسیون را فراهم می‌سازد.

تقویت کردن

قبل از این که فیبرها کربونیزه شوند لازم است تا از نظر ساختار اتمی و مولکولی، پیوند اتمی خطی به یک پیوند پلکانی مستحکم‌تر تبدیل شوند، این واکنش با حرارت دهی تا دمای بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس برای مدت ۲۰ تا ۳۰ دقیقه کامل می‌شود. این عملیات باعث می‌شود که فیبرها مولکول‌های اکسیژن را از هوا گرفته و آرایش مولکولی خود را دوباره تغییر دهد. واکنش‌های ثابت شده شیمیایی، پیچیده و شامل چندین مرحله می‌باشند که بعضی از آن‌ها بسیار شبیه هم هستند. در طی این واکنش‌ها گرمای زیادی ایجاد می‌شود که باید کنترل گردد تا بیش از اندازه حرارت فیبرها را بالا نبرند. از لحاظ اقتصادی و تجاری عملیات تقویت وابسته به تجهیزات و تکنیک‌های بسیاری می‌باشد. در بعضی فرآیندها فیبرها در طول یک سری محفظه حرارتی کشیده می‌شوند و در بعضی دیگر فیبرها در بستر مواد رقیق که به‌صورت معلق توسط جریان داغ هوا نگه‌داشته می‌شوند، به‌وسیله‌ی غلتک‌های داغ عبور داده می‌شوند. بعضی فرآیندها از مخلوط هوای گرم با گازهای خاصی که فرآیند تقویت را سرعت می‌بخشد استفاده می‌کنند.

کربونیزه کردن

هنگامی که فیبرها تقویت و میتحکم شدند، تا دمای ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد برای چند دقیقه در کوره‌ای که حاوی گازی خالی از اکسیژن است حرارت داده می‌شوند. نبود اکسیژن از سوختن فیبرها در حرارت‌های بالا جلوگیری می‌کند. فشار گاز داخل کوره بالاتر از فشار هوای خارج آن است و نقطی که فیبرها داخل یا خارج می‌شوند کاملاً آب‌بندی می‌شوند تا اکسیژن به آن وارد نشود. هنگامی که فیبرها حرارت داده می‌شوند، شروع به از دست دادن اتم‌های غیرکربنی به‌علاوه کمی از اتم‌های کربن به‌صورت گازهای مختلفی از قبیل آب، آمونیاک، مونواکسیدکربن، کربن‌دی‌اکسید، هیدروژن، نیتروژن و غیره می‌کند. وقتی که اتم‌های غیرکربنی آزاد شدند اتم‌های کربنی باقی مانده به‌صورت کریستال‌های به‌هم چسبیده محکمی در می‌آیند که به موازی محور فیبرها جهت‌گیری کرده‌اند. در بعضی فرآیندها برای کنترل بهتر نسبت خنک‌شدن در طی فرآیند کربونیزه‌شدن از دو کوره با دو دمای متفاوت استفاده می‌شود.

آماده‌سازی

بعد از کربونیزه‌کردن سطح فیبرها طوری است که به آسانی با اپوکسی‌ها و سایر موادی که در مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود اتصال برقرار نمی‌کند یا به اصطلاح نمی‌چسبد. به این منظور سطح فیبرها را اندکی اکسیده می‌کنند. اضافه کردن اتم‌های اکسیژن به سطح باعث بهبود چسبندگی و اچ‌کردن و زبری می‌شود. اکسیداسیون می‌تواند با فروبردن فیبرها در گازهای مختلفی مانند هوا، کربن‌دی‌اکسید یا ازن حاصل شود. یا با فروبردن فیبرها در مایعاتی مانند سدیم‌هیپوکلراید یا نیتریک‌اسید حاصل شود. فیبرها می‌توانند با قرارگرفتن به‌عنوان قطب مثبت در محفظه‌ای که در آن مواد رسانای الکتریکی مختلفی قرار گرفته است به‌صورت الکترواستاتیکی اکسیده شوند. در این فرآیند باید توجه شود که اثرهای نامطلوب سطحی مانند ایجاد حفره در سطح در فیبرها ایجاد نشود.

فیبرها به شکل رشته‌های به‌هم تابیده بلند کشیده می‌شوند سپس در معرض حرارت بسیار بالا بدون این‌که در تماس اکسیژن باشند، قرار می‌گیرند. بدون اکسیژن فیبرها نمی‌سوزند اما دمای بالا باعث می‌شود تا اتم‌ها در جای خود شروع به ارتعاش شدیدی کرده تا این‌که اتم‌های غیرکربنی از آن‌ها خارج شوند.

سایز کردن

پس از عمل‌آوری لازم است سطح فیبرها برای این‌که از آسیب‌دیدن هنگام عملیات بافت و هوادهی در امان باشند پوشش‌دهی شود. این عملیات را سایز کردن یا اندازه‌دهی می‌نامند. ماده‌های پوشش‌دهنده طوری

انتخاب می‌شوند که با چسب مورد استفاده جهت شکل‌دهی کامپوزیت سازگار باشند. ماده‌های پوشش‌دهی رایج عبارتند از پلی‌استر، نایلون، اورتان غیره.

در مرحله بعد فیبرهای پوشش‌دهی شده به دور ماسوره‌ها پیچانده می‌شوند و این ماسوره‌ها در دستگاه چرخش قرار گرفته و فیبرها به شکل نخ در ابعاد مختلف از آن جدا می‌شوند.

کنترل کیفیت

فیبرهای کربن بسیار نازک این امکان را به ما نمی‌دهد که بتوانیم ابعاد آن‌ها را حین تولید کنترل کنیم پس به‌جای آن می‌توانیم پارامترهای مختلف تولید را مانند زمان، دما، دبی گاز و ترکیب شیمیایی را در هر مرحله از تولید کنترل نماییم.

البته فیبرهای کربن پس از تولید در معرض آزمایش‌های گوناگونی مانند سنجش چگالی، استحکام، مقدار سایزکردن و غیره قرار می‌گیرد. در دهه ۹۰ میلادی تولید کنندگان فیبرهای کربن استاندارد را برای استفاده صنایع در این زمینه تعریف کردند.

بهداشتی و ایمنی

در تولید فیبرهای کربن سه فاکتور زیر باید مورد توجه قرار بگیرند :

۱- پراکندگی گردوغبار

۲- حساسیت پوستی

۳- تاثیر فیبرها روی تجهیزات الکتریکی

در حین تولید ممکن است تکه‌های فیبرهای کربن شکسته و در هوا به‌صورت ذره‌های ریز پراکنده شوند. تحقیق‌های بهداشتی صنعتی نشان می‌دهد که به جز بعضی فیبرهای آزبستی، ذره‌های فیبرهای کربن آن‌قدر بزرگ هستند که نمی‌توانند برای سلامتی انسان خطرناک باشند البته آن‌ها نیز می‌توانند باعث سوزش چشم‌ها شوند پس کسانی که در این محیط‌ها کار می‌کنند باید از ماسک‌های محافظ استفاده کنند.

فیبرهای کربن می‌توانند باعث حساسیت‌های پوستی در پشت دست‌ها و مچ‌ها شوند. استفاده از لباس‌های محافظ و کرم‌های محافظ حین کار در این محیط‌ها بسیار توصیه می‌شود. ماده‌های مورد استفاده در فرآیند سایزکردن که برای پوشش‌دهی فیبرها استفاده می‌شوند حاوی ترکیب‌هایی هستند که می‌توانند باعث واکنش ناهنجار پوست شوند در حین این فرآیند لازم است که اصول ایمنی را رعایت کنیم.

علاوه بر قدرت و استحکام زیاد، فیبرهای کربن رساناهای الکتریکی خوبی هستند، در نتیجه گردهای ریز کربن در هوا می‌تواند باعث ایجاد آرک و جرقه در تجهیزات الکتریکی شوند. اگر امکان جداکردن این

تجهیزات از محلی که گردوغبار در آن زیاد است وجود نداشت، می‌توان آن‌ها را در محفظه‌های آب‌بندی شده‌ای قرار داد تا با گردوغبار در تماس قرار نگیرند.

آینده و تکنولوژی

آخرین پیشرفت در زمینه تولید فیبرهای کربنی لوله‌های نازک کربنی هستند که نانو لوله نامیده می‌شوند. این لوله‌های تو خالی به کوچکی قطر 0.001 میلی‌متر هستند و دارای ویژگی‌های منحصر به فرد مکانیکی و الکتریکی می‌باشند که برای ساخت فیبرهای جدید با استحکام بسیار بالا، لوله‌های فوق میکروسکوپی، یا ماده‌های نیمه رسانای جدید برای مدارهای مجتمع (IC)، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

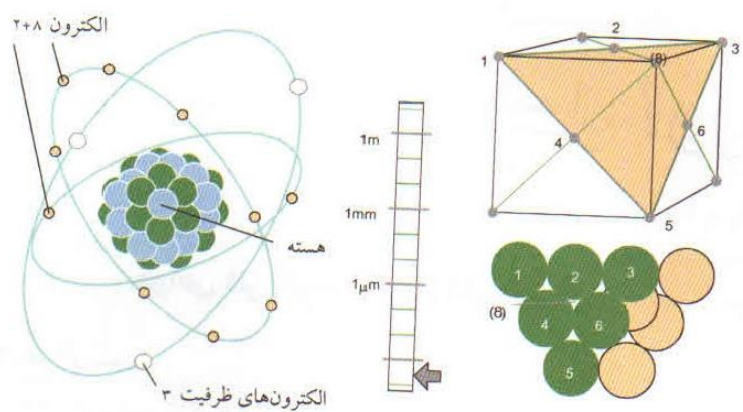
فصل پنجم

خاصیت آلومینیوم و آلیاژهای آن

فلز آلومینیوم

آلومینیوم با عدد اتمی ۱۳ و جرم اتمی ۲۶/۹۸ عنصری فلزی است که در گروه IIIA جدول مندلیف قرار دارد. این بدان معناست که اتم آلومینیوم دارای ۱۳ الکترون در سه لایه‌ی اوربیتالی می‌باشد. تعداد الکترون‌های لایه‌ی آخر هر عنصر تعیین‌کننده‌ی ظرفیت آن عنصر است. آلومینیوم در لایه‌ی ظرفیت خود سه الکترون دارد و به همین جهت عنصری سه ظرفیتی محسوب می‌شود.

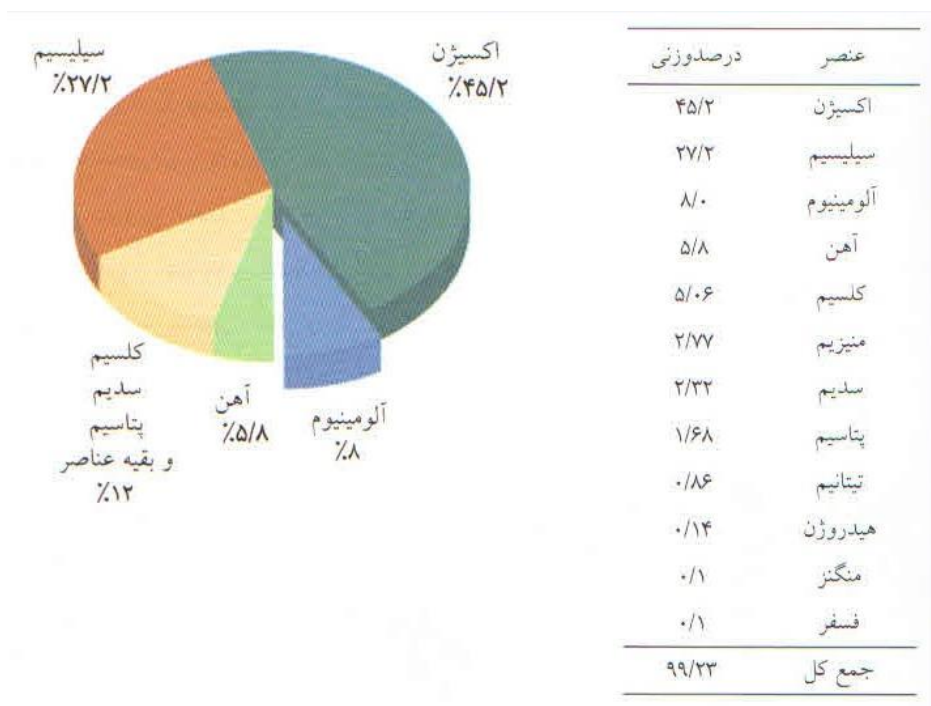
زمانی که فلز از حالت مذاب به جامد تغییر حالت می‌دهد، ساختاری در آن ایجاد می‌شود که به ساختار کریستالی آن فلز مرسوم است. در این حالت اتم‌ها تحت الگوهای ویژه‌ای کنار هم قرار گرفته و ساختارهای خاصی را به‌وجود می‌آورند که متالورژیست‌ها با عنوان شبکه کریستالی از آن یاد می‌کنند. آلومینیوم، مانند فلزهای مس، طلا و نقره دارای ساختار کریستالی مکعب با سطوح مرکزدار F.C.C. می‌باشد. در این ساختار اتم‌ها در گوشه‌های مکعب و مراکز سطح کریستالی فلز قرار دارند (مانند شکل ۱) و در نتیجه می‌توانند بیش‌ترین لغزش و حرکت را داشته باشند که باعث افزایش فرم‌پذیری و شکل‌پذیری آن فلز می‌شود. بیش‌تر فلزها با شکل‌پذیری بالا مانند مس، آلومینیوم و ... دارای این نوع شبکه کریستالی می‌باشند.



شکل ۵-۱ ساختار کریستالی فلز آلومینیوم

این فلز نیز همچون بیش‌تر فلزهای دیگر به‌صورت اکسید در پوسته زمین وجود دارد. مقاومت به خوردگی آلومینیوم بسار بالاست. آلومینیوم در اکسیدها کم محلول است ولی در بازهای قوی به خوبی حل می‌شود. به‌طور نمونه اسید سولفوریک خالص تاثیر چندانی بر آن ندارد.

نقطه ذوب آلومینیوم خالص ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد است و نقطه جوش آن ۲۴۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. آلومینیوم میل ترکیبی فوق‌العاده‌ای با اکسیژن دارد که سریعاً اکسید آلومینیوم پایدار بر سطح آن ایجاد می‌کند و همین عامل باعث می‌شود تا آلومینیوم از مقاومت به خوردگی بالایی برخوردار گردد. این عنصر از نظر فراوانی پس از اکسیژن و سیلیسیم سومین عنصر بر روی کره زمین محسوب می‌شود. (شکل ۲)



نمودار ۵-۱ میزان فراوانی عناصر شیمیایی اصلی در پوسته زمین

آلومینیوم امروزه پس از فولاد پرمصرف‌ترین فلز دنیا محسوب می‌شود. آلومینیوم و آلیاژهای آن نقش تعیین کننده‌ای در صنعت معاصر دارند. چنان‌که امروزه یکی از شاخص‌های صنعتی هر کشور میزان تولید و مصرف سرانه این فلز محسوب می‌گردد.

مجموعه ویژگی‌های جالب و حیرت‌انگیز این فلز چنان است که سبب گشته تا در طی حدود صد سال، میزان مصرف آن پیشرفتی خارق‌العاده داشته باشد. بدون آلومینیوم، ساخت هواپیما و ماهواره امکان‌پذیر نبود. وسایل نقلیه موتوری سوخت بیشتری مصرف می‌کردند. امکان حفظ مواد غذایی برای مدت طولانی وجود نداشت. صرفه‌جویی در انرژی و روش‌های اقتصادی تولید سازه‌ها، در بسیاری از زمینه‌ها، تنها به خاطر وجود آلومینیوم میسر شده است. آلومینیوم ماده ضروری صنایع بسته‌بندی است و پوشش حفاظتی قابل اطمینانی برای مواد غذایی و دارویی محسوب می‌شود. در مقابل بو و رطوبت نفوذ ناپذیر است. از تاثیر نور و حرارت بر مواد بسته‌بندی شده جلوگیری می‌کند. غیر سمی و سبک وزن است همین نکته باعث کاهش

هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود. در صنایع خودروسازی، استفاده از آلومینیوم توانسته است وزن خودرو را تا حد بسیار زیادی کاهش دهد. در نتیجه میزان مصرف سوخت کاهش یافته و راهی جهت حفظ محیط زیست گشوده شده است.

مهندسی برق در عصر ما بدون وجود آلومینیوم نمی‌توانست آن چیزی باشد که اکنون است. امروزه، هادی‌ها و کابل‌های برق آلومینیومی، الکتریسیته را به منازل منتقل می‌کنند. استفاده در آلومینیوم در سازه‌ها، عمر کاری آن‌ها را تقریباً نامحدود می‌کند و شکل‌ها و رنگ‌های متفاوت و نیز مزایای صنعتی زیادی به آن‌ها می‌بخشد. در عایق بندی حرارتی که معیار اصلی در ارزشیابی مواد ساختمانی محسوب می‌شود، ساخت و تهیه پروفیل‌ها و ورق‌های آلومینیومی عایق شده بسیار رواج دارد. ساخت پنجره، نما، در و سقف ساختمان‌های اداری، بیمارستان‌ها، کارخانه‌ها و منزل‌ها نمونه‌هایی از موارد مصرف آلومینیوم به‌عنوان ماده ساختمانی برای صرفه‌جویی در انرژی است. استفاده از آلومینیوم در خودروهای سواری باعث شده تا میلیون‌ها لیتر سوخت در سال صرفه‌جویی شود. نمونه‌های بسیار دیگری از مصرف این فلز در صنایع مختلف وجود دارد. لذا می‌توان آلومینیوم را فلز مهمی خواند که بدون آن دنیای صنعتی امروز غیر قابل تصور است.

آلومینیوم عنصری سبک محسوب می‌شود که حجم تولید آن از حجم تولید فلزهای غیر آهنی بیشتر است. ویژگی‌ها و خاصیت این فلز چنان است که لقب فلز جادویی را به آن داده‌اند. مجموعه این خاصیت‌ها که در یک فلز جمع شده‌اند؛ راه تازه‌ای فرا روی صنایع مختلف باز کرده است تا بتوانند تکنولوژی را هر چه بیشتر بارور سازند.

تاریخچه و روش استخراج آلومینیوم

با وجود آن که امروزه آلومینیوم پس از فولاد پرمصرف‌ترین فلز جهان محسوب می‌شود، اما پیشینه و سابقه تولید این فلز حتی به دو قرن هم نمی‌رسد و در مقایسه با فولاد و مس که از فلزهای دیر آشنای صنعت هستند فلزی جوان محسوب می‌شود که توانسته است با عمری کوتاه، جایگاه مصرفی و ارزشی بالایی را در صنایع مختلف به خود اختصاص دهد. دلیل این عمر کوتاه و عدم استفاده از این فلز در سال‌های پیشین، نوع سنگ معدن این فلز و نحوه‌ی استخراج آلومینیوم از آن می‌باشد. مشکل و هزینه‌بر بودن استخراج آلومینیوم از سنگ معدن اکسیدی آن (روش الکترولیز) باعث تاخیر حضور این فلز در توسعه صنعتی تا سال‌های پس از آغاز قرن نوزدهم شد.

تهیه آلومینیوم در مقیاس تجاری برای اولین بار در سال ۱۸۵۵ توسط سن کلردویل انجام شد و بعنوان فلزی کمیاب و بسیار گرانبه‌قیمت (در حدود کیلویی ۵۰۰ دلار) وارد بازار شد. به گونه‌ای که گفته می‌شود در قصر

ناپلئون سوم از ظرف آلومینیومی به جای ظروف طلا جهت پذیرایی مهمانان ویژه استفاده می‌شد. اما کشف‌های مستقل که در سال ۱۸۸۶ توسط هال در امریکا و هرولت در فرانسه انجام شد به توسعه یک روش اقتصادی برای استخراج آلومینیوم با خلوص بالا به روش الکترولیز منجر شد که هم‌اکنون نیز مبنای تولید صنعتی آلومینیوم محسوب می‌شود.

در سال ۱۸۸۸ بایر دانشمند نامی آلمان فرآیند فوق را کامل نمود و تحول عظیمی در صنعت آلومینیوم به‌خاطر کاهش هزینه‌های تولید آن ایجاد کرد. با ابداع این روش‌ها قیمت آلومینیوم به کم‌تر از ۴ دلار کاهش یافت و هم‌اکنون قیمت آن به حدود دو تا سه دلار به ازای هر کیلوگرم کاهش یافته است. می‌توان گفت قرن بیستم قرن شکوفایی صنعت آلومینیوم بوده است و هم‌اکنون حضور آن در صنایع حمل‌ونقل (هواپیما، خودرو، کشتی و...) به‌خوبی قابل مشاهده است.

به‌طور کلی برای تولید فلز آلومینیوم پیمودن سه مرحله ضروری است. در مرحله نخست، از طریق روش استخراج روباز، مبادرت به استخراج بوکسیت می‌شود. بوکسیت استخراج شده در محل معدن، خرد و شکسته شده و تحت عمل پرعیار کردن قرار می‌گیرد تا برای تصفیه آماده گردد. در مرحله دوم از طریق روش بایر (Bayer) عمل تصفیه صورت می‌گیرد. این فرآیند یک فرآیند شیمیایی است که تحت آن، آلومینا از ناخالصی‌های موجود در بوکسیت جدا می‌گردد. در مرحله سوم یا مرحله ذوب، از روش الکترولیز به روش "هال_هرولت" استفاده شده و فلز آلومینیوم از آلومینا به‌دست می‌آید.

برای تولید هر تن آلومینیوم حدود ۲ تن آلومینا (که از حدود ۴ تن بوکسیت استخراج شده) و ۵۰۰ کیلوگرم کربن، به‌عنوان آند، لازم است. این روش، روش اصلی تولید آلومینیوم به شمار می‌رود.

در این فرآیند، آند و کاتد هر دو از جنس کربن هستند که از بالا وارد سلول الکترولیز می‌شود و کاتد در کف سلول قرار دارد. با اتصال جریان مستقیم به دلیل مقاومت زیاد الکترولیت، انرژی الکتریکی به حرارت تبدیل شده و درجه حرارت سلول به بالاتر از ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در این درجه حرارت الکترولیت ذوب شده و اکسید آلومینیوم را در خود حل می‌کند. این اکسید در میدان الکترولیز تجزیه می‌شود. یون حاوی آلومینیوم در کاتد به آلومینیوم فلزی تبدیل می‌گردد. یون اکسیژن نیز به آند رفته و در تماس با کربن آند، به‌صورت CO یا CO₂ خارج می‌شود.

پس از آن آلومینیوم مذاب از طریق ریخته‌گری پیوسته به شکل‌های تجاری آن تبدیل و جهت فروش عرضه می‌شود.

خاصیت شگفت‌انگیز آلومینیوم

آلومینیوم چه خاصیت ویژه و منحصر به فردی دارد که توانسته است به این سرعت پیشرفت نماید و جایگزین بسیاری از فلزهای دیگر گردد؟

آنچه باعث شده تا این فلز تا این حد مورد توجه قرار گیرد، جمع شدن خاصیت‌های مختلف و البته بسیار کاربردی در کنار یک‌دیگر در یک فلز به نام آلومینیوم است. ویژگی‌هایی که همراه شدن آن‌ها با هم باعث شده تا آلومینیوم براساس نیازهای متفاوت در موارد بسیاری کاربرد پیدا کند. علاوه بر آن، وجود آلیاژهای مختلف آلومینیوم (بیش از چهارصدوپنجاه آلیاژ مختلف ثبت شده) و تنوع ویژگی‌های آن‌ها نیز از دلایل به‌کارگیری آلومینیوم به مقدار بسیار و در کاربردهای متفاوت شده است. هر یک از این آلیاژها به منظور خاصی طراحی شده‌اند و دارای ویژگی‌های مخصوص به خود می‌باشند. ولی کلیه آن‌ها دارای یک رشته ویژگی مشترک هستند. مثلاً سبکی وزن در همه آن‌ها دیده می‌شود. سایر ویژگی‌ها، مانند نسبت استحکام به وزن بالا در بعضی آلیاژهای خاص دیده می‌شود.

ویژگی‌های آلومینیوم به‌گونه‌ای است که می‌توان گفت هیچ فلز یا خانواده‌ای از فلزها یک چنین ترکیبی از ویژگی‌های مورد نظر را مانند آلومینیوم ندارند. برخی از آلیاژهای آلومینیوم از نظر کیفیت و خاصیت‌های مختلف از تمام فلزها پیشی گرفته‌اند. خاصیت ویژه‌ای که باعث شده تا این فلز لقب اعجوبه فلزها را به خود بگیرد عبارتند از:

- وزن مخصوص کم
- هدایت الکتریکی زیاد
- هدایت حرارتی زیاد
- قابلیت‌های انعکاس
- خاصیت جرقه نزدن و غیر مغناطیسی بودن
- مقاومت زیاد در مقابل خوردگی
- نقطه ذوب متفاوت آلیاژهای آلومینیوم
- افزایش استحکام در دماهای پایین
- نسبت استحکام به وزن بالا

- استحکام نسبی
- مدول الاستیک
- پارامتر سفتی
- درصد ازدیاد طول
- استحکام فشاری، پیچشی و سختی در آلیاژهای آلومینیوم
- شکل پذیری بالا
- چقرمگی شکست در آلیاژهای آلومینیوم
- سمی نبودن
- اتصال آسان
- جوش پذیری آلیاژهای آلومینیوم
- قیمت زیاد ضایعات و قراضه
- قابلیت بازیافت آلومینیوم

که در زیر چند نمونه از این ویژگی‌ها را مورد بررسی قرار داده‌ایم.

وزن مخصوص کم

چگالی سنگین‌ترین آلیاژ آلومینیوم 2.95 g/cm^3 است. وزن کم آلومینیوم باعث می‌شود تا حمل‌ونقل آن آسان‌تر و ارزان‌تر شود، چه در مورد حمل‌ونقل کالاهای آلومینیومی و چه در مورد وسیله نقلیه ساخته شده از آلومینیوم.

علاوه بر آن، سبکی باعث امکان صرفه‌جویی در وزن سازه‌های آلومینیومی می‌شود. این مورد به‌خوبی در پایه‌ها و تاسیسات حفاری چاه‌های نفت دیده می‌شود.

هم‌چنین سبکی آلومینیوم باعث نصب سریع‌تر و اقتصادی‌تر سازه‌ها، نیاز به کارگر کم‌تر و خستگی کم‌تر در حین استفاده از وسایل آلومینیومی می‌شود.

به دلیل دانسیته کم آلومینیوم، ممان اینرسی قطعات آلومینیومی نیز کم‌تر است. هرچه قطعه سنگین‌تر باشد ممان اینرسی آن بیش‌تر و کار بیش‌تری برای حرکت دادن و یا متوقف کردن آن نیاز است. ماشین‌کاری‌های سریع و مدرن امروزی نیاز ب موادی با ممان اینرسی کم دارند به طوری که بتوان با سرعت و بازدهی خوب دستگاه را به کار انداخت و یا از کار بازداشت که آلومینیوم از این لحاظ مناسب است.

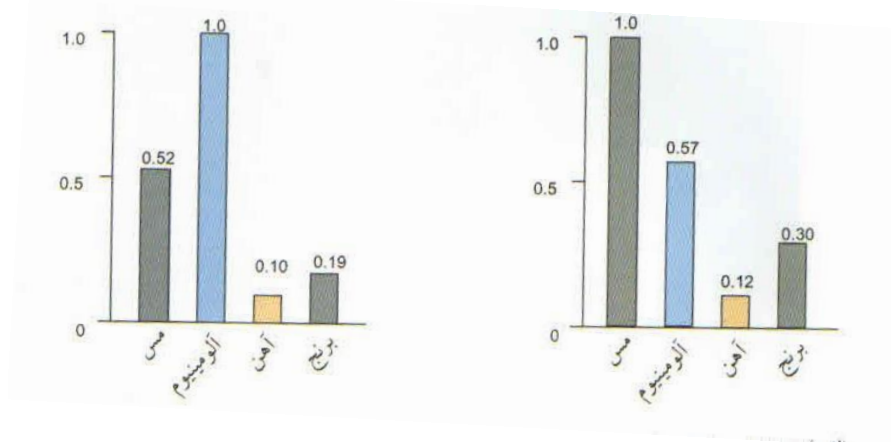
وزن کم‌تر قطعات آلومینیومی به معنی تعداد قطعات بیش‌تر در تولید است. در جدول زیر چگالی آلومینیوم در مقایسه با برخی مواد ذکر شده است. میخ، پیچ، مهره و واشر آلومینیومی را می‌توان به ازای واحد وزن تا سه برابر قطعات مشابه فولادی ساخت.

| ماده | چوب | آجر | منیزیم | بتون | آلومینیوم | تیتانیوم | منگنز | آهن | مس |
|-------------------------------|------|------|--------|------|-----------|----------|-------|------|------|
| چگالی (g/cm ³) | ۰/۷۴ | ۰/۵۱ | ۱/۷۳ | ۲/۲۲ | ۲/۷ | ۴/۵۱ | ۷/۴۳ | ۷/۸۷ | ۸/۹۲ |

جدول ۵-۱ اختلاف چگالی‌ها

هدایت حرارتی زیاد

هدایت حرارتی چهار فلز از هادی‌ترین فلزها به همان ترتیب هدایت الکتریکی می‌یابد (نقره، مس، طلا، آلومینیوم). هدایت حرارتی آلومینیوم خالص (۹۹/۹۹٪) در دمای ۰-۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد 244 W/mk و برابر با ۶۱/۹٪ استاندارد IACS می‌باشد. مشابه هدایت الکتریکی، در صورتی که هدایت حرارتی در واحد وزن مبنا قرار گیرد، هدایت حرارتی آلومینیوم دو برابر مس خواهد بود (شکل ۱۲).



ب - هدایت حرارتی به واحد وزن (تن) فلزات مختلف

الف - هدایت حرارتی فلزات مختلف

نمودار ۵-۲ مقایسه هدایت حرارتی در فلزهای مختلف

هدایت حرارتی آلومینیوم از رابطه (۱) محاسبه می‌شود که در این رابطه K هدایت حرارتی، λ هدایت الکتریکی و T دما بر حسب کلوین است.

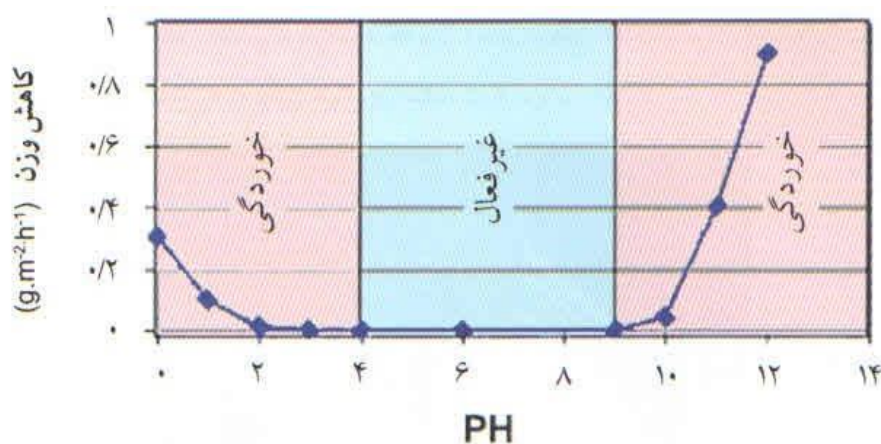
$$k = 5.02\lambda T \times 10^{-9} + 0.03 \quad (1)$$

هدایت حرارتی آلومینیوم با اضافه شدن عناصر آلیاژی به جز در مورد عنصر آلیاژی سیلیسیم به مقدار بسیار کمی تغییر می‌کند و رابطه بالا، مستقل از نوع آلیاژ است.

جمع شدن خاصیت‌هایی چون هدایت حرارتی بالا، وزن کم و شکل پذیری زیاد آلومینیوم موجب کاربرد این فلز در ساخت مبدل‌های حرارتی، رادیاتورها و سرسیلندرهای خودرو و نیز در ساخت ظرف‌های پخت‌پز شده است. ساخت ظرف‌های آشپزخانه آلومینیومی مهم‌ترین مورد استفاد هدایت حرارتی بالا است. پوسته آلومینیومی رادیاتور باعث می‌شود حرارت از مایع سرد کننده سریعاً جذب شود و مایع سرد شده به سرعت به موتور برگردد.

مقاومت زیاد در مقابل خوردگی

یکی از خاصیت‌های مهم آلومینیوم مقاومت در برابر خوردگی این فلز است. آلومینیوم خالص وقتی که در هوا قرار می‌گیرد، بلافاصله با یک لایه اکسید آلومینیومی پوشیده می‌شود. این لایه مشابه یک پوشش، مانع خوردگی می‌گردد و در بیش‌تر محیط‌ها نسبتاً پایدار است. اگر در اثر ساییدگی این لایه کنده شود بلافاصله دوباره تشکیل می‌گردد. ضخامت این لایه نازک طبیعی در حد 0.025 میکرون است، با این وجود به قدری محکم است که مانع موثری در مقابل اغلب مواد خورنده محسوب می‌گردد. به‌طور کلی می‌توان گفت که لایه محافظ در محلول‌های یونی با PH بین $4/5$ تا $8/5$ پایدار است و فقط در اسیدها و بازهای قوی محلول می‌باشد (شکل ۱۳).



نمودار ۳-۵ مقاومت به خوردگی آلومینیوم در محیط‌های مختلف

این فلز در مقابل بسیاری از مواد شیمیایی، صنعتی و مواد شیمیایی موجود در اتمسفر، مقاوم است. البته برخی از آلیاژهای خاص آلومینیوم نسبت به دیگر آلیاژها مقاوم‌تر هستند. برای نمونه گروه آلیاژهای آلومینیوم

- منیزیم (Al-Mg) مخصوصاً در مقابل هوا و آب دریا مقاوم هستند. از طرف دیگر آلیاژهای آلومینیوم که حاوی مس یا روی هستند از نظر مقاومت به خوردگی ضعیف‌تر و از نظر استحکام مکانیکی قوی‌تر می‌باشند.

تنها برخی مواد شیمیایی خاص مانند کلر، آمونیم و هیدرواکسیدباریم موجب خورده شدن آلومینیوم می‌گردند. موادی چون لبنیات، روغن، محلول‌های شکرदार و آب مقطر تاثیری بر روی آلومینیوم در درجه‌های حرارت، عمل ندارند. مایعاتی مانند آب سیب، آب‌لیمو و غیره تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد هیچ تاثیری بر روی آلومینیوم نمی‌گذارند.

مواد شیمیایی دیگر از جمله استن خالص، بنزن، گازهای نفتی چون بوتان و پروپان، دی‌سولفورکربن، تتراکلروکربن، بنزین و نفت خام نیز تاثیری بر روی آلومینیوم ندارند.

شکل‌پذیری با روش‌های مختلف

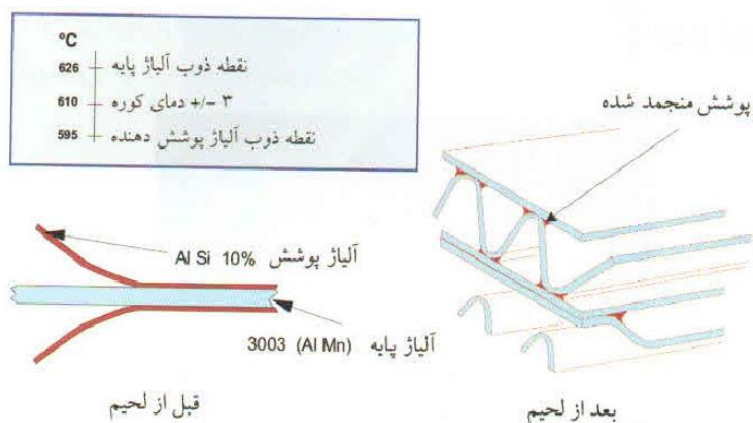
به آسانی می‌توان روی آلومینیوم کار انجام داد و آن را شکل داد. این فلز قابلیت نورد، فورج، اکستروژن، چین‌دادن، شیاردار کردن، لبه‌دار شدن، حک کردن، خم، پرس، کشش عمیق برش را دارد. علاوه بر آن می‌توان آلومینیوم را ااره کرد، مته‌زد، تراش داد، سنگ‌زد، پرداخت کرد و حتی تا ضخامت ۰/۰۰۴ میلی‌متر نورد کرد. آلیاژهای آلومینیوم را می‌توان به شکل‌های مختلف مانند فویل، ورق، صفحه، میل‌گرد، میله و چهارگوش ساختمانی، سیم و لوله به صورت توپر و یا توخالی تولید کرد. به این مجموعه از قابلیت‌ها، قابلیت ریخته‌گری بسیاری از آلیاژهای آلومینیوم را نیز در شکل‌های مختلف باید اضافه کرد.

نقطه ذوب متفاوت آلیاژهای آلومینیوم

نقطه ذوب در آلیاژهای آلومینیوم به نوع عنصر آلیاژی اضافه شده و مقدار آن بستگی دارد. آلومینیوم با خلوص ۹۹/۹۹ درصد در فشار اتمسفر دارای نقطه ذوب ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد است که این مقدار برای آلومینیوم با خلوص ۹۹/۵ درصد به ۶۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. با افزایش فشار، نقطه ذوب نیز افزایش می‌یابد چنان‌که در فشار ۵۰ Kbar نقطه‌ی ذوب آلومینیوم به ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

اضافه کردن برخی عناصر آلیاژی تحت شرایط خاص نقطه ذوب را برای برخی آلیاژهای آلومینیوم - منیزیم حتی تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز کاهش می‌دهد. از این خاصیت یعنی تغییر دمای نقطه ذوب در آلیاژهای آلومینیوم در ساخت مبدل‌های حرارتی ویژه استفاده می‌شود. در این حالت پره‌های آلومینیومی از جنس آلیاژ ۳۱۰۳ یا ۳۰۰۳ که با یک لایه آلیاژ آلومینیوم حاوی ۱۰ درصد سیلیسیم پوشیده شده‌اند، پس از مونتاژ در یک کوره با قابلیت کنترل دقیق دما، در این زمان پوشش، ذوب موضعی شده و قطعات مناطق

اتصال به هم لحیم می‌شوند و مبدل حرارتی با این روش مونتاژ و ساخته می‌شود. کنترل دما در این فرآیند بسیار مهم است و لذا فرآیند در کوره‌های با اتمسفر کنترل شده و فلاکس محافظ انجام می‌گیرد (شکل ۱۴).

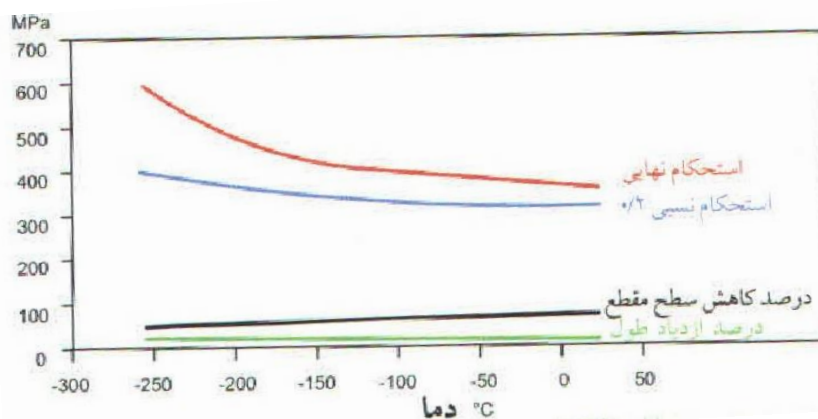


شکل ۵-۲ تولید پره‌های آلومینیومی مبدل‌های حرارتی از روش لحیم کاری خاص

افزایش استحکام در دماهای پایین

یکی از خاصیت‌های ویژه آلومینیوم، افزایش استحکام آلومینیوم در دماهای پایین می‌باشد. بسازی از فلزها در درجه حرارت‌های پایین شکننده می‌گردند. ولی استحکام آلومینیوم با سردتر شدن آن افزایش می‌یابد که این پدیده در علم مطالعه در درجه‌های حرارت پایین بسیار قابل توجه است.

در حقیقت در این فلز دمای تبدیل شکست نرم به ترد وجود ندارد و بر عکس، استحکام آلیاژهای آلومینیوم معمولاً در دماهای پایین افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه در دمای -196 درجه سانتی‌گراد استحکام آلومینیوم به میزان 12% نسبت به دمای محیط افزایش می‌یابد (مطابق شکل ۱۵).



نمودار ۵-۴ تغییرهای استحکام کششی آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم در دماهای پایین

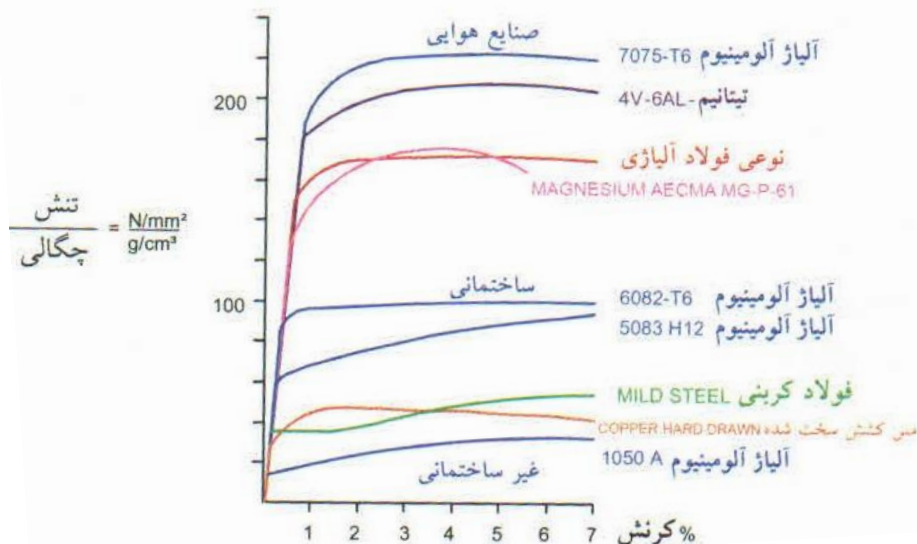
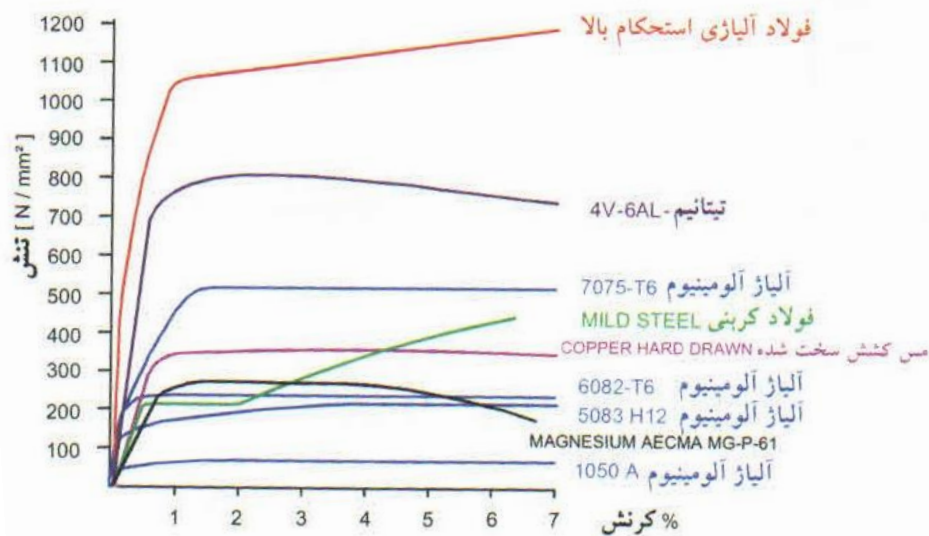
این خاصیت آلومینیوم همراه با خاصیت‌های دیگری هم‌چون نسبت استحکام به وزن بالا موجب شده تا در اجزای مختلف هواپیما و سفینه‌ها که در دماهای پایین قرار می‌گیرند از این فلز استفاده شود.

استحکام پیچشی، استحکام برشی و خمشی آلومینیوم نیز مشابه استحکام کششی آن در دماهای پایین افزایش می‌یابد. در درجه‌های حرارت ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد تا ۲۶۸- درجه سانتی‌گراد آلومینیوم ارزان‌ترین ماده مصرفی برای این نوع کاربرد به‌شمار می‌آید. چون استحکام آن در درجه‌های حرارت پایین افزایش می‌یابد بنابراین نسبت استحکام به وزن آن در مقایسه با درجه حرارت محیط بهتر نیز می‌گردد.

مطلب‌های بالا نشانگر موقعیت بالای آلومینیوم در علم مطالعه درجه‌های کم می‌باشد. یکی از موردهای استفاده مهم از این خاصیت، حمل‌ونقل متان مایع است. فولاد در دماهای پایین مانند شیشه شکننده است. بنابراین این سوخت در مخازن دوجداره‌ای که جداره داخلی آن آلومینیومی است و فضای خالی بین دو جداره به‌وسیله چوب خورد شده عایق بندی شده است، حمل‌ونقل می‌گردد.

نسبت استحکام به وزن بالا

یکی از خاصیت‌های بسیار مهم آلومینیوم، نسبت استحکام به وزن بالای آلومینیوم است. مطابق شکل ۱۶ فولاد بالاترین استحکام را در بین فلزها دارا می‌باشد و پس از آن نیز تیتانیوم و آلیاژهای آلومینیوم دارای این خصوصیت می‌باشند. اما چنان‌که نسبت استحکام به وزن قطعه‌ها را مبنای مقایسه قرار دهیم، آلیاژهای آلومینیوم دارای بالاترین مقدار آن خواهند بود. این آلیاژها در ساخت بدنه‌های هواپیما که نیاز به وزن کم و استحکام بالا دارند کاربرد فراوان دارند.



نمودار ۵-۵ مقایسه استحکام کششی و نسبت استحکام به وزن مواد مختلف

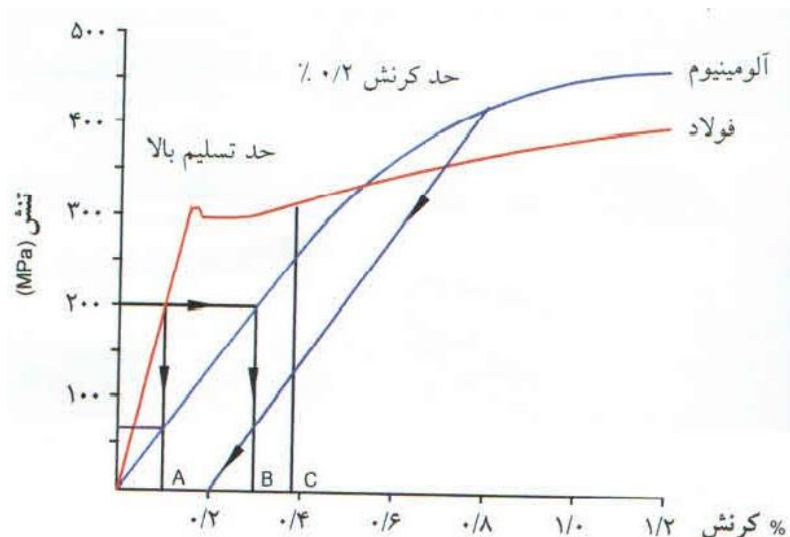
برای درک اهمیت این موضوع مقطع دو تیر H شکل را که یکی از فولاد و دیگری از آلومینیوم ساخته شده است را در نظر بگیرید. تیر فولادی دارای عرض ۱۰۱ میلی‌متر و عمق ۱۰۵ میلی‌متر و ابعاد تیر آلومینیومی به ترتیب ۱۲۷ و ۱۵۳ میلی‌متر است. با داشتن صلیب و استحکام معادل، که از طریق انتخاب آلیاژ مناسب آلومینیوم امکان‌پذیر است، وزن تیر آلومینیومی نصف تیر فولادی است.

استحکام نسبی

در منحنی‌های تنش - کرنش فولادهای کربنی نقطه‌ی ذوب خاصی وجود دارد که نقطه‌ی پایان منطقه‌ی الاستیک و ورود به منطقه‌ی پلاستیک قطعه می‌باشد. تا این نقطه استحکام قطعه متناسب با کرنش ایجاد شده به صورت خطی افزایش می‌یابد و سپس در این نقطه ناگهان کاهش یافته و ماده وارد منطقه‌ی تغییر شکل پلاستیک شده و استحکام با کرنش به صورت غیر خطی تا نقطه‌ی شکست افزایش می‌یابد.

استحکام معادل این نقطه از نظر طراحی برای مهندسان مکانیک بسیار مهم‌تر از استحکام کشش نهایی قطعه است. زیرا از این حد به بعد قطعه وارد منطقه‌ی تغییر شکل پلاستیکی خود می‌شود و پس باید در طراحی‌ها حتماً مدنظر قرار گیرد.

محل دقیق این نقطه در منحنی‌های تنش - کرنش همه‌ی آلیاژها مشابه فولاد کربنی کاملاً واضح نمی‌باشد. در گذشته استحکام کششی را که منجر به ایجاد ۰/۱ درصد کرنش در قطعه می‌شد و امروزه استحکام کششی که منجر به ۰/۲ درصد کرنش می‌شود را معادل این نقطه در نظر می‌گیرند و با نام استحکام کششی نسبی تعریف می‌کنند (شکل ۱۷).



نمودار ۵-۶ منحنی تنش - کرنش آلومینیوم و فولاد

اگر چه داشتن استحکام نسبی بالا یک مزیت محسوب می‌شود ولی نسبت استحکام نسبی به استحکام کششی نهایی بالا نشان‌دهنده‌ی داکتیلیته‌ی کم می‌باشد. زمانی که کرنش (تغییر شکل) عامل مهمی در

طراحی باشد نکته‌ی جالبی درباره‌ی آلومینیوم وجود دارد. مطابق شکل ۱۷ برای ایجاد ۰/۱ درصد کرنش در فولاد حدود ۲۰۰ مگاپاسکال تنش لازم است. در حالی که برای آلومینیوم این مقدار تنها ۶۶/۶ مگاپاسکال است (خط A در شکل). این مقدار تنش (۲۰۰ مگاپاسکال) می‌تواند حدود ۰/۳ درصد کرنش در آلومینیوم ایجاد نماید (خط B در شکل). همچنین شکل نشان می‌دهد که با اعمال کرنش یکسان معادل ۰/۳۸ درصد، آلومینیوم هنوز در منطقه تغییر شکل الاستیک قرار دارد در حالی فولاد وارد منطقه‌ی تغییر شکل پلاستیک خود شده است.

این نکته در طراحی بسیار حایز اهمیت است. به‌عنوان نمونه در طراحی بدنه‌ی خودرو یا ضربه‌گیرها که نیاز به قابلیت جذب ضربه‌ی زیادی می‌باشد از این خاصیت آلومینیوم استفاده می‌شود، چرا که منطقه‌ی زیر منحنی تنش - کرنش هر فلز تا نقطه‌ی شکست معادل میزان انرژی ضربه‌ی قابل جذب توسط آن ماده است.

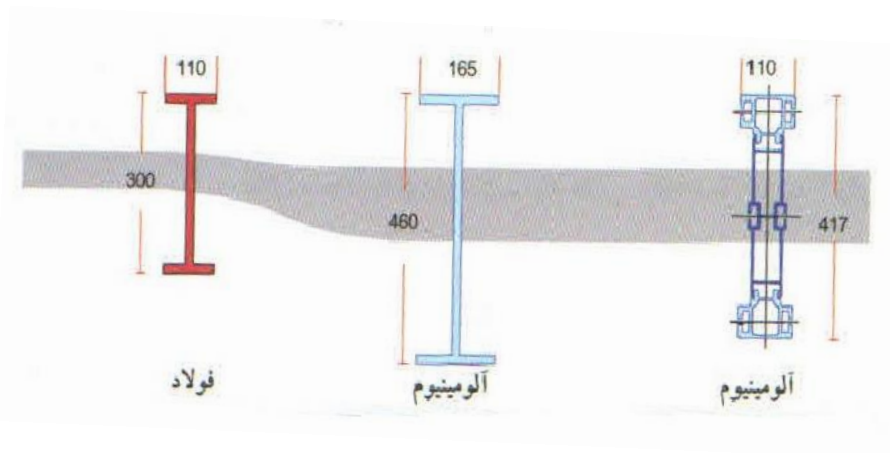
مدول الاستیک

چنان‌که در منحنی تنش - کرنش شکل ۱۷ نشان داده شد، کرنش بر واحد تنش در آلومینیوم حدود سه برابر فولاد است. شیب این منحنی در منطقه‌ی الاستیک یعنی نسبت تنش به کرنش را مدول الاستیک یا مدول یانگ می‌نامند. بنابراین مدول الاستیک آلومینیوم حدود یک سوم فولاد و در حدود ۶۵۵۰۰ تا ۷۲۴۰۰ مگاپاسکال برای آلیاژهای آلومینیوم است.

با توجه به این مطلب‌ها مشخص است که در دو قطعه مشابه آلومینیومی و فولادی، قطعه‌ی آلومینیومی دارای وزنی حدود یک‌سوم قطعه‌ی فولادی است در حالی که تغییر شکل الاستیک آن حدود سه برابر خواهد بود. پس چنین نتیجه‌گیری می‌شود که قطعه‌ی آلومینیومی جهت تغییر شکل یکسان انرژی معادل سه برابر فولاد جذب می‌کند.

پارامتر سفتی

پارامتر سفتی که نشان دهنده‌ی تغییر شکل در حین بارگذاری خمشی است، برگرفته از مدول الاستیسیته (E) و ممان اینرسی (I) سطح مقطع یک قطعه می‌باشد. آلومینیوم دارای قابلیت ویژه‌ای است که در شکل‌های پیچیده و خاص از طریق فرآیند اکستروژن قابل تولید است و بنابراین طراحان با طراحی خاص و مناسب، می‌توانند ساختارهایی تولید نمایند که دارای سفتی برابر با فولاد، ولی وزنی حدود یک‌دوم آن باشند (شکل ۱۸).



| | | | | |
|------------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| وزن | kg/m | 40 | 16.9 | 27 |
| ممان I | mm ⁴ | 78 X 10 ⁸ | 225 X 10 ⁸ | 228 X 10 ⁸ |
| مدول Z | mm ³ | 25 X 10 ⁶ | 49 X 10 ⁶ | 52 X 10 ⁶ |
| فاکتور سفتی پیچشی | | 1 | 0.24 | 27.5 |
| درصد وزن صرفه جویی شده | | | 57 | 32.5 |

شکل ۵-۳ مقایسه سفتی در مقاطع آلومینیوم و فولاد

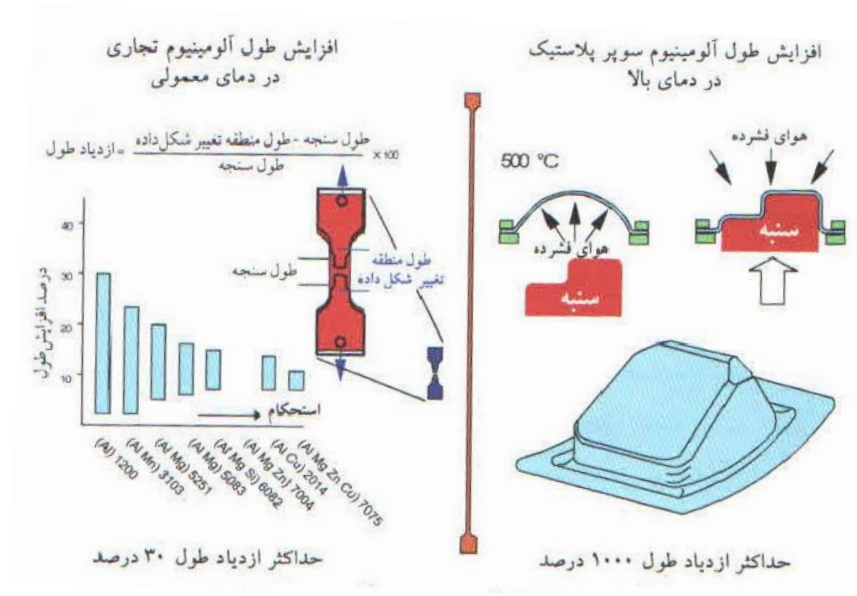
شکل ۱۸ سه قطعه را با سفتی خمشی یکسان نشان می‌دهد. شکل سمت چپ از فولاد و شکل میانی قطعه آلومینیوم I شکل و شکل سمت راست مقطع آلومینیومی اکستروود شده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل نشان داده می‌شود مقطع میانی آلومینیومی با کاهش وزنی حدود ۵۷ درصد نسبت به مقطع فولادی دارای مدول بالاتر ولی پایداری پیچشی کم‌تری است. در حالی که مقطع آلومینیومی اکستروود شده دارای کاهش وزنی حدود ۳۳ درصد، پایداری پیچشی بالا و مدول سطح مقطع بالاتر می‌باشد. در مورد مدول پیچشی (مدول پواسون) نیز قوانین مشابه مدول الاستیک حاکم است. از این خاصیت آلومینیوم در طراحی سازه‌ها جهت کاهش وزن، استفاده فراوان می‌شود.

درصد ازدیاد طول

یکی دیگر از پارامترهایی که در تعیین میزان چقرمگی و داکتیلیته و نیز شکل‌پذیری یک قطعه در طراحی‌ها مدنظر قرار می‌گیرد میزان درصد ازدیاد طول آن ماده است. این پارامتر عموماً از طریق تست استاندارد میلیه ۵۰ میلی‌متری تحت آزمایش کشش محاسبه می‌شود که از تقسیم مقدار تغییرهای طول ایجاد شده به طول اولیه $(\Delta L/L_0 \times 100)$ به دست می‌آید.

آلیاژهای آلومینیوم عموماً در دمای محیط دارای درصد ازدیاد طولی برابر با ۳۵ درصد (برای نمونه اولیه با طول ۵۰ میلی‌متر) در آلیاژ آنیل شده و کم‌تر از ۳ درصد برای آلیاژ کرنش سخت شده. درصد ازدیاد طولی آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم از ۵ تا ۲۰ درصد در آلیاژهای مختلف تغییر می‌کند. شکل ۱۹ مقدار ازدیاد طول را در آلیاژهای مختلف نوردی آلومینیوم نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵ درصد تغییر طول در آلیاژهای آلومینیوم

پارامتر دما در تعیین میزان درصد ازدیاد طول مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. عموماً با افزایش دما ازدیاد طول نیز افزایش می‌یابد. برخی آلیاژهای آلومینیوم دارای خاصیت‌های بسیار خاصی هستند به گونه‌ای که این آلیاژها تا ۱۰۰۰٪ افزایش طول از خود نشان می‌دهند. به این خاصیت سوپر پلاستیسیته گفته می‌شود. (به موادی که قابل تغییر شکل تا ۲۰۰ درصد، بدون گلوئی شدن و یا حتی شکست را دارند سوپر پلاستیک گویند). از این خاصیت آلومینیوم در شکل‌دهی پلاستیک‌ها در دمای بالا و با اعمال فشار یک‌نواخت هوا در اطراف ماده، جهت تولید قطعه‌ها با شکل‌های بسیار پیچیده استفاده می‌کنند.

استحکام فشاری، پیچشی و سختی در آلیاژهای آلومینیوم

به دلیل پدیده بشکه‌ای شدن در حین فشار، استحکام فشاری در آلیاژهای آلومینیوم به اندازه استحکام کششی در این آلیاژها دقیق و قابل محاسبه نیست. در بیش‌تر مواقع‌ها در طراحی‌ها و محاسبه‌های مکانیکی استحکام فشاری را نیز برابر با استحکام کششی در نظر می‌گیرند. آلیاژهای آلومینیوم را با اعمال فشار می‌توان به مقطع‌های بسیار نازک تبدیل کرد. این کار از طریق فرآیند اکستروژن امکان‌پذیر است. به‌طوری

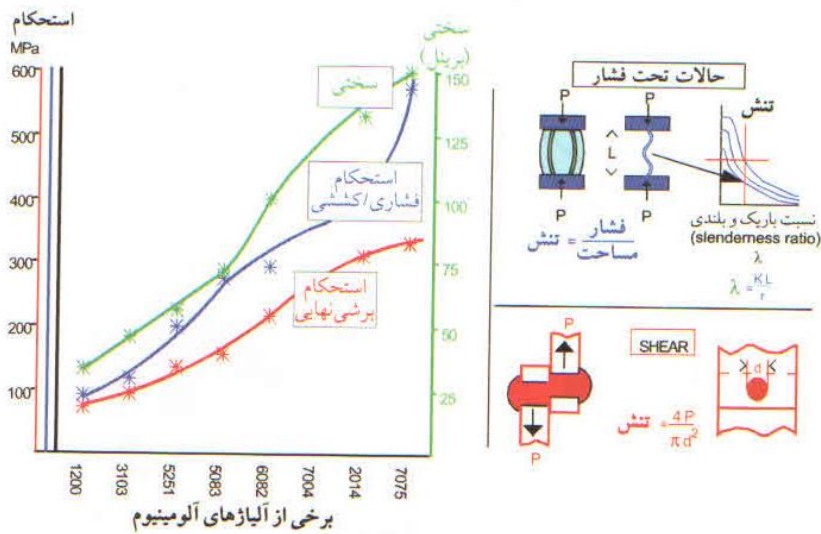
که می‌توان مقطع‌های بسیار نازک و پیچیده را از این طریق تولید نمود. معمولاً استحکام نسبی فشاری را برابر با استحکام نسبی کششی در نظر می‌گیرند. ورق‌ها و محصولات اکستروود شده آلومینیومی عموماً تحت فرآیند کشش قرار می‌گیرند. این عمل باعث کمی افزایش در استحکام نسبی کششی و کاهش در استحکام فشاری نسبی می‌شود.

اندازه‌گیری استحکام خمشی در آلیاژهای آلومینیوم نیز مانند بیشتر مواد دیگر مشکل می‌باشد. این اندازه‌گیری از روش‌های تست ویژه خود انجام می‌گیرد.

در مورد آلیاژهای آلومینیوم استحکام نهایی خمشی عموماً $1/8$ برابر استحکام نهایی کششی در نظر گرفته می‌شود. استحکام برشی نهایی آلیاژهای آلومینیوم نیز در حدود $0/5$ تا $0/75$ استحکام کششی نهایی (U.T.S) می‌باشد. زمانی که امکان تست دقیق وجود نداشته باشد این عدد را برای بیش‌تر آلیاژها $0/55$ در نظر می‌گیرند.

پرچ‌ها و پیچ‌های آلومینیومی از آلیاژهای با استحکام متوسط، دارای حدود 200 مگاپاسکال استحکام برشی هستند. این مقدار در پیچ‌های عملیات حرارتی شده به 260 مگاپاسکال نیز می‌رسد.

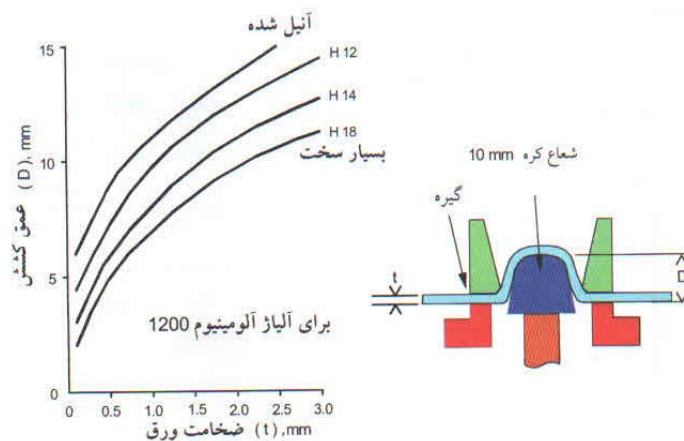
اگرچه سختی آلیاژهای آلومینیوم عموماً از طریق تست‌های برینل - ویکرز و شور قابل اندازه‌گیری است ولی سختی برینل عمومی‌ترین روش اندازه‌گیری آن می‌باشد. این سختی بین 20 برینل برای آلیاژهای آنیل‌شده تا 175 برینل برای آلیاژهای با استحکام بالاتر تغییر می‌کند. سختی سطحی آلومینیوم از طریق آنودایزینگ ویژه می‌تواند تا 500 VPN بالا برود. از این خاصیت آلومینیوم در ساخت قطعه‌هایی که نیاز به یک سطح مقاوم به سایش بالا دارند، استفاده می‌شود. شکل 20 استحکام برشی، فشاری و پیچشی و نیز سختی آلیاژهای مختلف آلومینیوم را در مقایسه با هم نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵ استحکام برشی، فشاری و پیچشی و نیز سختی آلیاژهای مختلف آلومینیوم

شکل پذیری بالا

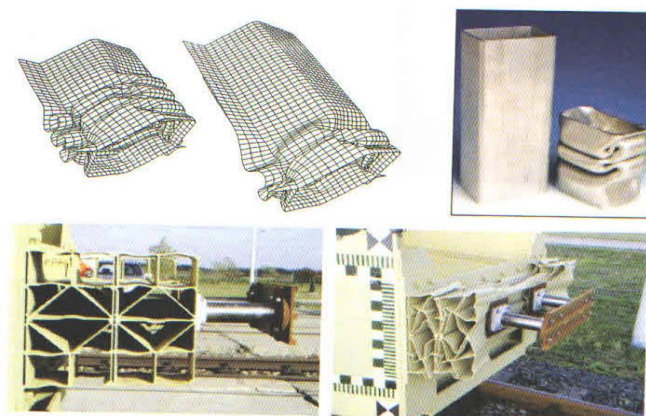
یکی از ویژگی‌های مهم آلومینیوم شکل‌پذیری بالای این فلز و آلیاژهای آن می‌باشد. تست‌های مختلف جهت اندازه‌گیری و نمایش این خاصیت در ماده‌ها وجود دارد. یکی از این تست‌ها، تست کشش عمیق ورق می‌باشد. در این حالت مطابق شکل، یک ورق را با اعمال فشار از یک طرف آن بر روی یک گوی استکانی شکل، قرار می‌دهند (تست Erichsen). میزان این کشش بدون پارگی یا ترک، نشان‌دهنده قابلیت شکل‌پذیری ماده می‌باشد که به ضخامت‌های مختلف ورق بکاررفته نیز بستگی دارد. آلومینیوم دارای شکل‌پذیری بالایی بوده و از خاصیت آلومینیوم در شکل‌دهی انواع اشکال خاص، ساخت کتری، قوری، قالب چراغ‌ها، نورافکن‌ها و بسیاری از اشکال ویژه که از طریق کشش عمیق قابل تولید هستند استفاده می‌شود.



شکل ۵-۶ تست Erichsen برای اندازه‌گیری میزان شکل‌پذیری آلومینیوم

چقرمگی شکست در آلومینیوم

چنانکه گفته شد پارامترهایی نظیر درصد ازدیاد طول و نسبت استحکام تسلیم به استحکام کشش، هر دو، مشخصه‌هایی از خواص شکست قطعه را به ما می‌دهند. ولی این پارامترها به تنهایی برای طراحی اجزاء کافی نمی‌باشند. یکی از پارامترهای مهمی که مهندس‌های مکانیک در طراحی مدنظر قرار می‌دهند، تمایل فلز یا قطعه به ایجاد ترک، رشد سریع ترک و در نتیجه شکست سریع قطعه می‌باشد. برای اندازه‌گیری و محاسبه چقرمگی و نیز مقاومت به ضربه قطعات معمولاً از تست ضربه چارپی یا آیزود استفاده می‌شود. در این تست یک نمونه با مشخصات استاندارد توسط یک بار ضربه‌ای شکسته می‌شود و با محاسبه میزان بار اعمالی، چقرمگی قطعه محاسبه می‌شود. در قطعات فولادی با انجام تست چارپی در دماهای متفاوت دمای تبدیل شکست نرم به ترد قطعات اندازه‌گیری و تعیین می‌شود. اما چنانکه گفته شد در آلومینیوم با کاهش دما، استحکام افزایش می‌یابد و در برخی آلیاژها حتی تا دمای -268 درجه سانتیگراد نیز شکست ترد مشاهده نمی‌شود و اصولاً آلومینیوم دارای چنین دمای تبدیلی نمی‌باشد. میزان چقرمگی در آلیاژهای آلومینیوم از روش‌های دیگری همچون محاسبه سطح زیر منحنی اعمال بار و نیز تئوری رشد ترک محاسبه می‌شود. در آلیاژهای آلومینیوم مقاومت به رشد ترک حتی در دماهای پائین نیز بسیار بالا می‌باشد که در مورد آلیاژ $6061-T6$ این مقدار بسیار قابل توجه می‌باشد و به همین دلیل آلومینیوم از قابلیت جذب انرژی بالایی برخوردار است و عموماً شکست نرم در آن اتفاق می‌افتد که در طراحی اجزاء خودرو و نیز اجزاء تحت ضربه بسیار با اهمیت است. در اکثر آلیاژهای آلومینیوم مقاومت به رشد ترک به قدری بالاست که می‌توان گفت "شکست ترد در آلیاژهای آلومینیوم غیرممکن است" و لذا آلومینیوم به میزان قابل توجهی قابلیت تغییر شکل پلاستیک تا شکست را دارد و به همین دلیل نیز از قابلیت جذب انرژی بالایی برخوردار است.



شکل ۵-۷ میزان جذب انرژی ضربه بالا در آلیاژهای آلومینیوم

قابلیت بازیافت آلومینیوم

علاوه بر استحکام، دوام، زیبایی و مقاومت به خوردگی، مهم‌ترین مزیت آلومینیوم، بازیافت آن می‌باشد. حفظ محیط زیست، حفظ منابع انرژی و کاهش میزان اتلاف انرژی مهم‌ترین چالش‌های عصر حاضر هستند. انسان به دست خود با تولید مواد مصنوعی و غیرقابل برگشت و افزودن آن‌ها به چرخه طبیعت، محیط اطراف خویش را آلوده ساخته است. گسترش لایه تخریب‌شده ازن، تولید گازهای سمی و خطرناک از کارخانه‌های بزرگ و مختلف صنعتی، همه و همه تصویری از آینده خطرناک و آلوده را در مقابل دیده آگاهان مساله قرار داده است. کاهش منابع طبیعی و خدادادی، کاهش انرژی‌های ارزان و در دسترس طبیعی نیز ترو و وا همه جدیدی است که از مشکلات عصر حاضر و نسل آینده به شمار می‌رود. یافتن مواد ویژه و نو که بتوان تا حد اکثر ممکن از آن‌ها استفاده کرد و سپس به راحتی قابل بازیافت باشند، ضمناً تولید آلودگی و قراضه نکنند و نیز یافتن روش‌هایی که بتوان در حفظ انرژی و به حداقل رساندن مواد آن مؤثر باشند از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار گشته‌اند و توجه کارشناسان و متخصصین زیادی را به خود معطوف کرده‌اند. در این میان آلومینیوم به عنوان فلز شگفت‌انگیز قرن حاضر بار دیگر خودنمایی می‌کند. قطعات و اجزای آلومینیوم جدا از اینکه در چه صنعتی مصرف شده‌اند علاوه بر طول عمر کاری طولانی و مفید، قابل بازیافت و استفاده مجدد می‌باشند. ضایعات آلومینیومی پس از مصرف و خارج شدن از سیکل کاری، مجدداً ذوب و استفاده می‌شوند بدون آن که کوچک‌ترین تغییری در ویژگی‌های آن ایجاد شود. آلومینیوم از سایر مواد سریع‌تر قابل بازیافت است. بازیافت سریع و آسان این فلز باعث می‌شود تا:

۱- قراضه آلومینیوم با قیمت بالایی خرید و فروش شود که خود یک مزیت عمده برای این فلز محسوب می‌شود.

۲- توجیه اقتصادی برای جمع‌آوری قراضه‌های فلزی به وجود می‌آید و در نتیجه سیستم‌های بازیافت روز به روز پیشرفته‌تر می‌شوند و تکنولوژی خود را بالا می‌برند. این فلز بالاترین بازده را برای بازیافت داراست.

آلومینیوم در بحث استفاده از انرژی بهینه نیز نقش بسزایی ایفا می‌کند. ذوب، بازیافت و استفاده مجدد از آلومینیوم تنها ۵ درصد از انرژی را نیاز دارد که برای تولید آلومینیوم از بوکسیت مورد نیاز است. یعنی ۹۵ درصد در مصرف انرژی و جریان الکتریکی صرفه‌جویی می‌شود، ضمن آنکه بحث تولید آلودگی‌های ناشی از تولید آلومینیوم اولیه نیز در اینجا وجود ندارد و هیچ‌گونه آلودگی و خطر برای محیط زیست ایجاد نمی‌گردد.

محصول آلومینیومی در مقایسه با محصولات پی وی سی که قابلیت بازیافت ندارند و یا بازیافت آن در حد کم ممکن است و نیاز به تکنولوژی بالایی دارد و یا در مقایسه با آهن با نقطه ذوب بالا که بازیافت آن را با

مشکل و با انرژی زیاد همراه کرده است، جایگاه خاصی را برای این فلز برای کارشناسان محیط زیست مطرح می‌کند.

آلیاژ

به طور کلی لغت آلیاژ به معنی اضافه نمودن یک یا چند عنصر یا ترکیبی از آن‌ها به فلز پایه برای دستیابی به یکسری ویژگی‌های خاص می‌باشد. تغییر خواص ناشی از افزودن این عناصر بسته به نوع عنصر پایه و نیز عناصر آلیاژی اضافه شده می‌تواند منحصرأ وابسته به یک عنصر یا ترکیبی از عناصر اضافه شده باشد.

از آن‌جا که سختی و استحکام فلز خالص همیشه کم‌تر از آلیاژهای آن فلز است، عموماً از فلزات بصورت آلیاژی استفاده می‌شود و از فلز خالص معمولاً در کاربردهای ویژه استفاده می‌شود. آلومینیوم با دارا بودن آلیاژهای مختلف با ترکیب و ویژگی‌های متفاوت در محدوده کاربردی فراوانی توانسته است ایفای نقش کند.

معمولاً هرچه فلز خالص‌تر باشد استحکام آن کم‌تر، ولی نرمی و پایداری شیمیایی آن زیادتر است. اگرچه آلیاژهای آلومینیوم دارای استحکامی بیشتر از آلومینیوم خالص هستند، اما این استحکام برای کاربردهایی که تحت تنش بالا هستند کافی نیست و لذا نیاز به افزایش استحکام بیشتری دارند و به همین دلیل از طریق روش‌های مختلف، استحکام آن‌را افزایش می‌دهند. این روش‌ها عبارتند از:

۱- کرنش سختی (کار سختی): کار سختی اصطلاحی است که برای بیان مفهوم سخت شدن و افزایش استحکام فلز در اثر فرایندهای کار سرد مثل: نورد، کشش، پرس و... عنوان می‌گردد.

۲- عملیات حرارتی انحلال-پیرسختی: یک نوع عملیات حرارتی است که روی آلیاژهای آلومینیوم انجام می‌پذیرد و باعث افزایش استحکام سختی قطعه می‌شود.

روش‌های افزایش استحکام آلومینیوم:

هریک از این روش‌ها از طریق مکانیزم خاص خود استحکام فلز را افزایش می‌دهند. ترکیبی از عملیات حرارتی پیرسختی و آلیاژسازی توانسته است استحکام آلومینیوم را به حدی برساند که حتی در بعضی موارد جایگزین فولاد گردد. قبل از بررسی مشخصات آلیاژهای آلومینیوم لازم است تا تأثیر هر عنصر به صورت منفرد بر خواص فلز پایه آلومینیوم بررسی گردد.

تأثیر عناصر آلیاژی:

هریک از عنصرهای آلیاژی به تنهایی یا در حضور سایر عنصرها، خاصیت‌های ویژه‌ای را به آلومینیوم می‌دهد.

مس (Cu)

بیشترین مقدار مس که در آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفته است حدود ۴ تا ۱۰ درصد می‌باشد. مس باعث بهبود استحکام و سختی در حالت ریختگی و عملیات حرارتی شده می‌گردد. آلیاژهای حاوی ۴ تا ۶ درصد مس، بسیار عملیات حرارتی‌پذیرند. مس عموماً مقاومت به خوردگی و در برخی ترکیب‌های شیمیایی، حساسیت به خوردگی ناشی از تنش را کاهش می‌دهد.

سیلیسیم (Si)

سیلیسیم باعث بهبود قابلیت ریخته‌گری می‌شود و شدیداً سیالیت، مقاومت به ترک گرم و خاصیت مذاب‌رسانی آلومینیوم را بهبود می‌بخشد. خانواده آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیم کاربرد بسیار زیادی در صنعت دارند و بصورت آلیاژ یوتکنیک و یا هیپویوتکنیک و هایپریوتکنیک تا ۲۵ درصد سیلیسیم مصرف می‌شوند

تیتانیوم (Ti)

این عنصر برای ریز کردن ساختار در آلیاژهای ریختگی آلومینیوم بکار می‌رود و معمولاً همراه با مقادیر کمی از بُر استفاده می‌شود.

استرانسیم (Sr)

این عنصرها جهت اصلاح و بهسازی آلیاژهای یوتکنیک آلومینیوم-سیلیسیم استفاده می‌شود. این عنصر در مقادیر بسیار کم ۰,۰۰۲ تا ۰,۰۴ درصد برای اصلاح و بهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر زیادتر استرانسیم باعث ایجاد تخلخل بخصوص در قطعات ضخیم که سرعت انجماد آن آهسته است، می‌شود.

آنتیموان (Sb)، سدیم (Na)

هر دوی این عنصرها در مقدار کم (در حدود ۰,۰۵ درصد)، جهت اصلاح و بهسازی سیلیسیم، در آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیم بکار می‌روند.

طبقه‌بندی آلیاژهای آلومینیوم

محصول‌های ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم، از نقطه نظر روش تولید به دو گروه تقسیم می‌شوند: آلیاژهای کارپذیر و آلیاژهای ریختگی

آلیاژهای کارپذیر با استفاده از فرایندهای شکل‌دهی (به حال‌های سرد و گرم) تولید می‌شوند. در حالیکه فرایند اصلی در تولید آلیاژهای ریختگی، ذوب و ریخته‌گری می‌باشد. آلیاژهای کارپذیر از نقطه نظر ترکیب شیمیایی و ساختار میکروسکوپی با آلیاژهای ریختگی کاملاً تفاوت دارند.

هریک از این دو گروه فوق نیز به دو دسته متمایز آلیاژها تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف) آلیاژهای عملیات حرارتی ناپذیر

ب) آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر یا پیرسختی پذیر

این طبقه‌بندی کلی‌ترین حالت طبقه‌بندی آلیاژهای آلومینیوم محسوب می‌شود

واژه عملیات حرارتی‌پذیر در مورد هر نوع عملیات حرارتی بر روی آلیاژهای آلومینیوم اطلاق نمی‌گردد. هر آلیاژ ریختگی با نورد (کارپذیر) آلومینیوم را که بتوان استحکام آن را از طریق عملیات حرارتی خاصی موسوم به رسوب سختی افزایش داد، آلیاژ عملیات حرارتی پذیر می‌نامند.

آلیاژهای ریختگی یا کارپذیر با خاصیت رسوب سخت‌شوندگی عموماً حاوی عناصری مثل: $\text{Cu}+\text{Mg}$, $\text{CuMg}+\text{Si}$ (Mg_2Si) و $\text{Mg}+\text{Zn}$ (Mg_2Zn) هستند که ویژگی سختی‌پذیری را به آلیاژ می‌دهند. آلیاژهای آلومینیوم که استحکام آن‌ها از این طریق قابل افزایش نیست، عملیات حرارتی ناپذیر نام دارند.

گروه 1XXX: آلومینیوم خاص

ویژگی‌ها:

۱- کرنش سختی‌پذیر

۲- بسیار شکل‌پذیر، مقاوم در برابر خوردگی و هادی الکتریکی

۳- عمده مصرف در صنایع الکتریکی و شیمیایی

۴-مهم‌ترین آلیاژهای این گروه: ۱۱۰۰، ۱۳۵۰

آلیاژهای گروه 1XXX به عنوان آلیاژهای آلومینیوم خالص تجاری معروفند. آلومینیوم در محدوده ترکیبی آلیاژ ۱۱۰۰ (۹۹،۰۰ درصد آلومینیوم) تا کمی خالص‌تر ۱۰۵۰، ۱۳۵۰ (۹۹،۵ درصد آلومینیوم) و ۱۱۷۵ (۹۹،۷۵ درصد آلومینیوم) متغیر می‌باشد. ناخالصی اصلی در این گروه سیلیسیم و آهن هستند.

آلیاژ ۱۳۵۰ منحصراً در صنایع الکتریکی کاربرد دارد. لذا باید ناخالصی‌های آن دقیقاً کنترل شده و از حد مجاز خارج نگردد. گروه 1XXX آلومینیوم، کرنش سختی پذیرند. ولی کارسختی تأثیر ملایمی در افزایش استحکام این گروه دارد. به همین دلیل در مواردی که استحکام بالا مورد نیاز است کاربرد بیشتری ندارند. بیشترین کاربرد این گروه آلیاژی در مواردی است که مقاومت به خوردگی، شکل‌پذیری و هدایت الکتریکی بالا مورد نیاز است. فویل برای بسته‌بندی، وسایل مصرفی در محیط شیمیایی بدنه مخازن و تانک‌های حمل و نقل، رشته سیم‌های توخالی، باس بارها، بازتابنده‌ها و... از موردهای کاربرد این گروه آلیاژی می‌باشد.

گروه 2XXX: آلیاژهای Al-Cu

ویژگی‌ها:

۱- عنصر آلیاژی اصلی: مس

۲- عملیات حرارتی پذیر

۳- استحکام در دمای اتاق و دماهای بالاتر

۴- کاربرد در صنعت‌های هوا-فضا و حمل و نقل

۵- معروفترین آلیاژهای این گروه: ۲۰۱۴، ۲۰۱۷، ۲۰۲۴، ۲۰۲۶، ۲۰۲۹، ۲۱۹۵

آلیاژهای گروه 2XXX عملیات حرارتی‌پذیر، دارای ترکیب خوبی از استحکام بالا (خصوصاً در درجه حرارت‌های بالا) و چقرمگی بالا هستند و در حالت خاصی قابلیت جوشکاری خوبی نیز دارند. مقاومت به خوردگی آلیاژهای گروه 2XXX در اتمسفر کم است و به همین دلیل معمولاً رنگ شده یا پوشش داده می‌شوند. خواص مکانیکی این گروه عملیات حرارتی رسوب سختی افزایش یافته و حتی گاهی به خاصیت‌های فراتر از فولادهای کم کربن می‌رسند. به دلیل استحکام بالا، این آلیاژ در صنعت‌های فضایی و هواپیماها (آلیاژ ۲۰۲۴) و در بدنه کامیون‌ها (آلیاژ ۲۰۱۴) و سازه‌های تحت دمای بالا کاربرد دارند. آلیاژهای ۲۲۱۹ و ۲۰۴۸ از این

گروه به آسانی جوشکاری می‌شوند و به همین دلیل در صنعت‌های فضایی و هواپیماها کاربرد دارند. آلیاژ ۲۱۹۵ به عنوان آلیاژ جدید این گروه به دلیل داشتن مدول الاستیک بالا همراه با استحکام بالا و قابلیت جوشکاری، کاربرد فراوانی یافته است. برخی آلیاژهای دیگر این گروه مانند ۲۰۱۱، ۲۰۱۷، ۲۱۱۷ برای ساخت اتصالات، پیچ‌ها و پرچ‌ها استفاده می‌شوند.

گروه 7xxx: آلیاژهای Al-Zn

ویژگی‌ها:

۱- عنصر آلیاژی اصلی: روی

۲- عملیات حرارتی پذیر

۳- استحکام و چقرمگی بسیار بالا

۴- عمده کاربرد در صنعت‌های هواپیماسازی و خودروسازی

۵- معروف‌ترین آلیاژهای این گروه: ۷۰۰۵، ۷۰۷۵، ۷۴۷۵، ۷۱۵۰

گروه آلیاژهای 7xxx عملیات حرارتی پذیر بوده و حاوی یک تا هشت درصد روی و نیز مقداری منیزیم و مس می‌باشند. این گروه خود به دو دسته آلیاژهای Al-Zn-Mg-Cu و Al-Zn-Mg تقسیم می‌شوند. گروه Al-Zn-Mg-Cu پر استحکام‌ترین آلیاژهای آلومینیوم محسوب می‌شوند. آلیاژهای ۷۱۵۰ و ۷۴۷۵ چقرمگی بسیار بالایی دارند و با کنترل میزان ناخالصی‌ها و عنصرهای آلیاژی آن می‌توان ترکیبی از استحکام و چقرمگی شکست مناسب را از این آلیاژ به دست آورد. عمده‌ترین کاربرد این گروه آلیاژی در صنعت‌های هوایی و هواپیماسازی است که به علت استحکام و چقرمگی بالای این گروه است. آلیاژهای این گروه با روش‌های معمولی و تجاری قابل جوشکاری نیستند و معمولاً از طریق پرچ‌کاری بهم متصل می‌شوند. مقاومت به خوردگی این گروه در حد گروه 6xxx و 5xxx نیست و معمولاً عملیات پوشش‌دهی روی آن انجام می‌گیرد و یا ورق‌ها و پلیت‌های از جنس آلیاژ 7xxx بصورت Alclad شده بکار می‌روند. در مواردی که برای این آلیاژها نیاز به مقاومت در برابر ترک ناشی از خوردگی تنش باشد، از عملیات حرارت T73 بجای T6 استفاده می‌شود

آلیاژهای آلومینیوم – لیتیم (Al-Li)

اخیراً فعالیت‌های زیادی بر روی آلیاژهای آلومینیوم-لیتیم به عنوان خانواده جدید آلیاژهای آلومینیوم انجام گرفته و تولید و استفاده از این آلیاژ را به حد بالایی رسانده است. مهم‌ترین کاربرد این آلیاژ در صنایع پیشرفته هوا-فضا و نیز ساخت هواپیما می‌باشد. لیتیم با چگالی پائین (0.54 g/cm^3) و نیز حلالیت حالت جامد بالای خود در آلومینیوم در بین آلیاژهای جدید آلومینیوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گشته است. زیرا که به ازای هر یک درصد افزایش لیتیم در آلیاژ، دانسیته آن سه درصد کاهش می‌یابد. لیتیم همچنین در بین عناصر محلول منحصراً به فرد است، زیرا افزایش قابل ملاحظه‌ای در مدول الاستیک (مدول یانگ) آلومینیوم بوجود می‌آورد. به گونه‌ای که به ازای هر یک درصد افزودن لیتیم شش درصد مدول یانگ افزایش می‌یابد.

همچنین لیتیم باعث افزایش مقاومت به رشد ترک ناشی از تنش خستگی و نیز افزایش چقرمگی در دماهای پائین می‌شود. با توجه به مشخصه‌های فوق‌الذکر، آلیاژهای آلومینیوم حاوی لیتیم به عنوان نسل جدیدی از ماده‌ها با دانسیته پائین و سفتی بالا در سازه هواپیماها کاربرد فراوانی یافته‌اند و باعث افزایش سفتی تا ۵۲ درصد گشته‌اند.

به این ترتیب به نظر می‌رسد این آلیاژها آخرین شانس برای توسعه نمونه‌های کاملاً جدید آلیاژهای آلومینیوم هستند که امکان رقابت با کامپوزیت‌ها را جهت استفاده در هواپیماها و سفینه‌ها را دارند. دو آلیاژ ۸۰۹۰ و ۲۰۹۰ از مهم‌ترین آلیاژهای حاوی لیتیم هستند که در صنعت هواپیماسازی نیز از جایگاه مصرفی بالایی برخوردار گشته‌اند.

مشخصات کلی گروه‌های آلیاژهای ریخته‌گری آلومینیوم

این دسته از آلیاژهای آلومینیوم کارپذیر نیستند. زیرا عنصرهای آلیاژی آنها تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. از جمله ویژگی بارز آنها مقاومت به سایش و خاصیت‌های ریخته‌گری مناسب می‌باشد. عنصرهای اصلی آنها سیلیسیم و مس است. سیلیسیم سیالیت هنگام ریخته‌گری را افزایش می‌دهد و سبب می‌شود که مذاب تمام نقطه‌های قالب را پر کند. مس نیز باعث افزایش خاصیت‌های مکانیکی آنها می‌شود و پس از ریخته‌گری در قالب اصلی با انجام عملیات ماشین‌کاری، قطعه آماده بهره‌برداری می‌شود.

آلیاژهای ریخته‌گری، در مقایسه با آلیاژهای کارپذیر آلومینیوم حاوی مقادیر بیشتری از عنصرهای آلیاژی مثل سیلیسیم و مس هستند که سبب ایجاد ساختار ریخته‌گری غیرهمگن و تولید فازهای ثانویه

می‌شود. بررسی این فازهای ثانویه مهم است، زیرا ساختارهای سوزنی و خشن مضر بوده و باعث ایجاد ترک در حین بارگذاری و کاهش چقرمگی می‌شوند. خاصیت‌های چقرمگی شدیداً به ساختار قطعه وابسته است و به ناهمگونی ساختار حساس است. با این وجود چنانکه ذکر شد خاصیت‌های متالوژی و ریخته‌گری خوب این آلیاژها، عیب‌های آن‌ها را قابل چشم‌پوشی می‌کند. درصد ازدیاد طول و استحکام (خصوصاً استحکام چقرمگی)، اکثر آلیاژهای ریخته‌گری کمتر از آلیاژهای گارپذیر می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه فرآیندهای ریخته‌گری و محصولات آن انجام شده که باعث پیشرفت‌های زیادی در زمینه تولید خاصیت‌های این آلیاژها شده است. این آلیاژها در گروه‌های زیر طبقه‌بندی شده‌اند:

گروه 2xx.x: آلیاژهای Al-Cu

ویژگی‌ها:

۱- عنصر آلیاژی اصلی: مس

۲- عملیات حرارتی‌پذیر

۳- قابل ریخته‌گری در ماسه و قالب دائم

۴- استحکام بالا در دمای اتاق و دماهای بالاتر، چقرمگی خوب

۵- عمده کاربرد در صنعت‌های هوایی و خودروسازی و قطعه‌های خودرو

۶- آلیاژهای مشهور این گروه ۲۰۱،۰ و ۲۰۳،۰

مستحکم‌ترین آلیاژ ریخته‌گری آلیاژ ۲۰۱،۰ می‌باشد. این گروه آلیاژی تا حدی مستعد تولید تخلخل‌های ریز و ترک داغ است که البته با توجه به خاصیت‌های ریخته‌گری خوب این آلیاژ بهترین گزینه برای تولید قطعه‌ها به روش ریخته‌گری دقیق است.

چقرمگی و قابلیت رسوب سختی بالای این آلیاژ باعث استفاده از آن در موردهایی شده که اجزاء تحت تنش می‌باشند، مثل ابزار و آلات ماشین‌ها، کلیدهای الکتریکی در صنعت‌های برق و مورد مصرف در اجزاء مختلف هواپیماها. علاوه بر آلیاژهای ریخته‌گری استاندارد، آلیاژهای خاصی نیز تولید می‌شوند که در موردهای خاص مثل سرسیلندر موتور، بلوک سیلندر یک تکه و یاتاقان‌ها کاربرد دارند. در چنین موردهایی آلیاژی انتخاب می‌شوند که مقاومت در برابر سایش خوب و ضریب اصطکاک کمی داشته باشند و علاوه بر آن در دماهای

بالا استحکام خوبی داشته باشند. یک مثال خوب در این زمینه آلیاژ $(AlCu_5NiCo)203.0$ است که پراستحکامترین آلیاژ در بین آلیاژهای ریختگی در دماهای بالا حدود ۲۰۰ درجه سانتی گراد است.

گروه 3xx.x : آلیاژهای (Al-Si+Cu or Mg)

ویژگی‌ها:

۱- عنصر آلیاژی اصلی: سیلیسیم+مس و یا سیلیسیم+منیزیم/مس

۲- عملیات حرارتی پذیر

۳- قابل ریخته‌گری در ماسه، قالب دائمی و دایکاست

۴- سیالیت عالی، استحکام بالا، برخی آلیاژهای این گروه دارای چقرمگی بالا هستند

۵- عمده‌ترین کاربرد در قطعه‌های خودرو، پیستون، پمپ

۶- مهم‌ترین آلیاژهای این گروه $A360.0$, 359.0 , $A.356.0$, 356.0

گروه آلیاژهای ریختگی 3xx.x به دلیل داشتن سیلیسیم بالا، سیالیت و خاصیت‌های ریختگی خوبی دارند. عملیات حرارتی پذیر هستند و می‌توان از این طریق استحکام آن‌ها را افزایش داد. آلیاژهای این گروه از پرکاربردترین آلیاژهای ریختگی هستند. چرا که آلیاژهای این گروه قابل ریخته‌گری در ماسه، قالب دائم، ریخته‌گری دایکاست، ریخته‌گری به روش لاست فوم است. آینده شاهد رشد بیشتر ساختمان‌های هوشمند و شیوه‌های ساختمان‌سازی جدیدی مثل ساختمان‌های پیش‌ساخته خواهد بود که کار را از مناطق ساختمانی به کارخانه‌ها خواهد کشاند. آلومینیوم و انواع پلاستیک‌ها هر دو پتانسیل بالایی برای این نوع نوآوری دارند و به مقدار وسیعی وارد این صنعت شده‌اند و مصرف روزافزون آن‌ها برای ساختمان‌های آینده قابل پیش‌بینی است.

صنایع هوا-فضا و هواپیماسازی

صنعت هواپیماسازی و طراحی عرصه هوا-فضا همواره به موادی نیاز دارند که امکان تولید اسکلت‌های سبک وزن، با دوام و هزینه معقول را داشته باشد. علاوه بر این در دماهای پائین و نیز در دماهای بالا بتواند مقاومت لازم را داشته باشد. پیدایش آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا در سال ۱۹۰۶ توسط آلفرد دیلم و کشف امکان پدیده پیرسختی در آلیاژهای آلومینیوم منجر به توسعه کاربرد آلیاژهای آلومینیوم در حیطه

هواپیماسازی شد و از آن موقع این فلز به عنوان ماده اصلی در ساختار هواپیما مورد استفاده قرار گرفته است.

با وجود بارهای دینامیکی وارد بر هواپیماهای بارگیری شده با وزنی حدود ۴۰۰ تن، این هواپیماها باید بتواند با سرعتی حدود ۹۶۰ کیلومتر در ساعت شرایط هوای توفانی پرواز کند. این موضوع اهمیت و نقش ویژه ماده‌های بکار رفته آن را مشخص می‌کند.

ساختن بال‌های هواپیما که شامل ورقه بال‌های پائینی و بالایی، بال‌های جانبی، ورقه‌های آیرودینامیکی بال‌ها و تیرهای حایل می‌باشد، بیشترین میزان آلومینیوم یعنی حدود ۳۸-۳۵ درصد کل آلومینیوم مصرفی در هواپیماها را به خود اختصاص می‌دهد.

این قطعه‌ها از صفحه‌های اکستروژن شده و فورج شده آلومینیومی ساخته می‌شوند تا ضمن سبکی، استحکام مورد نیاز برای این کاربرد برآورده سازند. ۳۵ درصد دیگر آلومینیوم مصرفی در ساخت هواپیما برای ساخت پوسته بدنه، قاب‌ها، زوارهای استحکام‌بخش بر روی بال و کف بدنه مصرف می‌شود که از صفحه‌ها و قطعه‌های اکستروژنی و لوله‌های آلومینیومی ساخته شده‌اند. برخی قطعه‌ها با شکل پیچیده سه بعدی نیز از روش ریخته‌گری تولید می‌شوند.

بخش مسافران یا بدنه یک هواپیمای تجاری عبارت است از یک پوسته ورقه‌ای آلومینیومی که به زوارهای استحکام‌بخش بر روی بال متصل است و معمولاً در فاصله‌هایی از طول آن فریم‌های دایره‌ای (فلنچ) نصب شده است.

بدنه از ورقه‌های روکش داده شده ساخته می‌شود و برای ساخت قاب‌ها و کف هواپیما ترکیبی از صفحه‌ها، قطعه‌های اکستروژنی و ورقه‌های شکل داده شده استفاده می‌شود، به گونه‌ای که در یک بوئینگ ۷۴۷ جمبوجت بیش از ۶۵ تن آلومینیوم بکار می‌رود.

آلیاژهای آلومینیومی مصرفی در هواپیماسازی

هر یک از قسمت‌های مختلف هواپیما بر اساس بارهای وارد بر آن نیاز به خاصیت‌های ویژه‌ای دارند.

آلیاژهای سری 7xxx، متداولترین آلیاژهای آلومینیومی هستند که در صنعت هوا-فضا استفاده می‌شوند. برای سالیان متمادی آلیاژ ۷۰۷۵ که توسط شرکت Alcoa در سال ۱۹۴۳ ساخته شده بود، مورد استفاده طراحان هواپیما بود.

شرکت Alcoa این آلیاژ را به عنوان اولین آلیاژ با استحکام بالا شامل (Al-Zn-Mg-Cu) معرفی کرد که فایده‌های دیگری نیز داشت. مثلاً از طریق آلیاژ سازی با کروم، مقاومت به ترک ناشی از خوردگی تنش صفحه‌ها و ورق‌های ساخته شده از آلیاژ ارتقاء می‌یافت. این آلیاژ در ساخت سازه‌ها بخصوص بدنه که تلفیقی از استحکام بالا و چقرمگی (تافنس) متعادل به همراه مقاومت به خوردگی بالا را نیز دارند، بکار برده می‌شود. متداول‌ترین آلیاژ مورد استفاده در پوسته بال بالایی، آلیاژ ۷۰۵۵ است که علت کاربرد آن استحکام فشاری بالا به همراه چقرمگی شکست خوب و مقاومت به خوردگی آن است.

برای بدنه بال پایینی به علت چقرمگی شکست بالا و استحکام کششی و خستگی مناسب از آلیاژ ۲۳۲۴ و ۲۲۲۴ استفاده می‌شود. در حالیکه آلیاژهای ۲۰۲۴ و ۲۵۲۴ که دارای چقرمگی شکست بسیار بالا به همراه استحکام کششی قابل قبول می‌باشند، برای بدنه هواپیما ترجیح داده می‌شوند. اتصالات نیز از آلیاژهایی مثل آلیاژ ۷۰۵۰ (آلیاژهای با استحکام بالا) ساخته می‌شوند که چقرمگی شکست و مقاومت به خستگی خوبی دارند.

بر اساس آخرین تحقیقات انجام گرفته در زمینه آلیاژهای آلومینیوم، بوئینگ ۷۷۷ در بدنه و پوسته بال بالایی از آلیاژهای با استحکام بیشتری استفاده می‌کنند که مقاومت به خوردگی بهتری نیز دارند. آلیاژ ۲۵۲۴ که نوع پیشرفته ۲۰۲۴ است، با چقرمگی شکست بالا، به گونه‌ای طراحی شده که دارای تحمل ضربه بالا، وزن کم و انعطاف پذیری بالا است و بیشتر هواپیماهای جدید از ایا آلیاژ استفاده می‌کنند.

مثال دیگری از آلیاژهای جدید، آلیاژ 2024-HF است که یک آلیاژ با شکل پذیری بالا برای مصرف در بدنه است. دو مدل آلیاژ قابل جوشکاری ۶۰۶۵ تولید شده است که برای تولید صفحه‌های هواپیما بکار می‌روند و برای از بین بردن حساسیت آلیاژ به خوردگی درون دانه‌ای عملیات پیرسازی خاصی بر روی آن اعمال می‌شود.

برای اجزای بال، آلیاژهای جدیدی طراحی و تولید شده‌اند که شامل صفحه‌هایی سنگین از آلیاژ 2324-T39 Type2 در ساخت سه پانل بزرگ زیر بال جدیدترین نوع بوئینگ ۷۷۷ بکار رفته است. عملیات حرارتی و کشش انجام شده روی آلیاژ حین ساخت موجب می‌شود که علی‌رغم حفظ خاصیت مورد نیاز بوئینگ، بتوان از پانل‌های نازک‌تر استفاده کرد.

در هواپیماهای جدید جمبوجت A380 که ۵۵۵ نفر مسافر را حمل می‌کند از آلیاژهای جدیدی استفاده شده است که محصول شرکت Alcoa می‌باشند. در این هواپیما آلیاژی مقاوم به ضربه، به نام A6013HDT

برای پوسته بدنه مصرف شده است. همچنین آلیاژ A7055 برای پوسته بال بالایی و یک آلیاژ بسیار مقاوم به ضربه به نام A2024HDT برای بدنه بال پائینی این هواپیمای غول پیکر استفاده شده است. جدول زیر برخی آلیاژهای مصرفی در هواپیماهای تجاری را نشان می‌دهد.

| AA Designation | Application | Component | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Zr | Aluminium |
|----------------|---------------------|--------------------------|----------------------------------|------|---------|----------|---------|-----------|---------|------|-----------|-----------|
| 7075 | UpperWing | stringer.Skin | 0.4 | 0.5 | 1.2-2.0 | 0.30 | 2.1-2.9 | 0.18-0.28 | 5.1-6.1 | 0.20 | -- | Rem |
| 7150 | UpperWing | stringer.Skin | 0.12 | 0.15 | 1.9-2.5 | 0.10 | 2.0-2.7 | 0.04 | 5.9-6.9 | 0.06 | 0.08-0.15 | Rem |
| 7055 | UpperWing | stringer.Skin | 0.10 | 0.15 | 2.0-2.6 | 0.05 | 1.8-2.3 | 0.04 | 7.6-8.4 | 0.06 | 0.08-0.25 | Rem |
| 2024 | Lower wing Fuselage | stringer.Skin | 0.50 | 0.50 | 3.8-4.9 | 0.30-0.9 | 1.2-1.8 | 0.10 | 0.25 | 0.15 | (3) | Rem |
| 2224 | Lower wing Fuselage | Stringer | 0.12 | 0.15 | 3.8-4.4 | 0.30-0.9 | 1.2-1.8 | 0.10 | 0.25 | 0.15 | -- | Rem |
| 2524 | Fuselage | Skin | 0.06 | 0.12 | 4.0-4.5 | 0.45-0.7 | 1.2-1.6 | 0.05 | 0.15 | 1.10 | -- | Rem |
| 2026 | Lower wing Fuselage | Stringer | 0.05 | 0.07 | 3.6-4.3 | 0.30-0.8 | 1.0-1.6 | -- | -- | 0.06 | 0.05-0.25 | Rem |
| 2324 | Lower wing | Skin | 0.10 | 0.12 | 3.8-4.4 | 0.38-0.9 | 1.2-1.8 | 0.10 | 0.25 | 0.15 | -- | Rem |
| C433 | Lower wing | Skin | High Damage Tolerance 2xxx alloy | | | | | | | | | |
| 7050 | Thick products | ribs .Spars landing gear | 0.12 | 0.15 | 2.0-2.6 | 0.10 | 1.9-2.6 | 0.04 | 5.7-6.7 | 0.06 | 0.08-0.15 | Rem |
| 7085 | Thick products | ribs .Spars landing gear | 0.06 | 0.08 | 1.3-2.0 | 0.04 | 1.2-1.8 | 0.04 | 7.0-8.0 | 0.06 | 0.8-1.5 | Rem |
| 6013 HDT(4) | Fuselage | stringer.Skin | 0.6-1.0 | 0.50 | 0.6-1.1 | 0.20-0.8 | 0.8-1.2 | 0.10 | 0.25 | 0.10 | -- | Rem |
| C460 | Fuselage | Floor beams | Lower Density Al-Li alloy | | | | | | | | | |

Source: Alcoa Aerospace Notes: (1) Composition in percent by weight maximum unless shown as a range (2) This is a non-exhaustive list of commercial aerospace alloys, and a non-exhaustive description of current applications for each alloy listed. (3) Zr+Ti limit of 0.20 percent maximum may be used under special agreements (4) HDT=High Damage Tolerance

جدول ۵-۲ ترکیب آلیاژهای آلومینیوم مصرفی در هواپیما



شکل ۵-۸ میزان مصرف آلومینیوم در هواپیمای ایرباس A380

انتخاب مواد جهت کاربرد در ساختار هواپیما عمدتاً بستگی به انتظارات مختلف از کارایی قطعه‌های مورد استفاده در هواپیما دارد. آلیاژهای آلومینیوم سهم عمده‌ای از ماده‌های بکار رفته در ساختار هواپیماهای ایرباس را به خود اختصاص داده‌اند. به عنوان مثال در A380، جدیدترین محصول این شرکت، ۶۰ درصد

ساختار هواپیما از آلیاژ آلومینیوم، ۲۲ درصد کامپوزیت‌ها، ۱۰ درصد تیتانیوم و فولاد و ۳ درصد از Glare (لایه‌های متناوب از ورق‌های آلومینیومی و فیبرهای شیشه) ساخته شده است.

امروزه ماده‌های کامپوزیتی نیز از جایگاه ویژه‌ای در صنعت هواپیماسازی برخوردار گشته‌اند. ماده‌های کامپوزیتی و آلومینیومی جهت مصرف در صنعت‌های هوا-فضا رقابت شدیدی را آغاز نموده‌اند و هریک به دنبال یافتن ماده‌ها، آلیاژها و روش‌های جدیدی هستند تا بتوانند ماده‌هایی با کارایی بالاتر را تولید کنند.

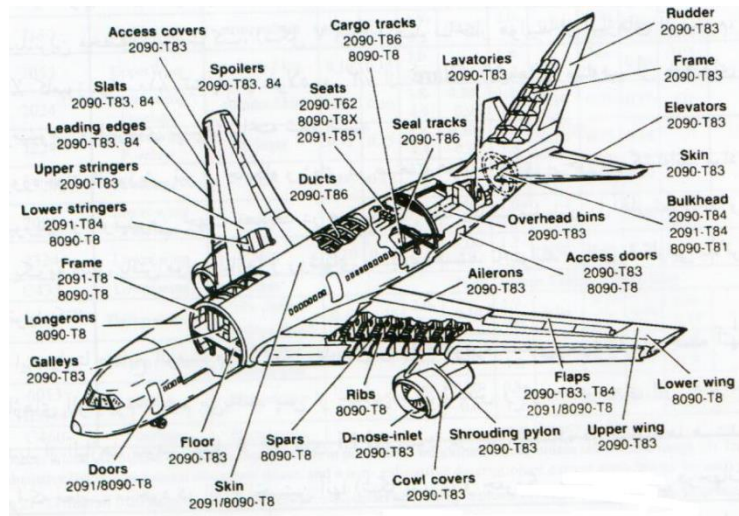
در این راستا صنعت آلومینیوم آلیاژهای جدیدی را وارد عرصه صنعت نموده‌اند از جمله آنها آلیاژهای آلومینیوم-لیتیم می‌باشد. پس از چندین سال تحقیق و توسعه بر روی این خانواده جدید از آلیاژها، سومین نسل از آلیاژهای Al-Li اکنون در حال استفاده در هواپیماها هستند، چراکه عیب‌های موجود در انواع نخستین آنها (شکل‌پذیری و چقرمگی شکسن پائین در جهت‌های کوتاه عرضی و پایداری حرارتی کم آنها) به واسطه بهبود و پیشرفت در ترکیب شیمیایی آلیاژها و بهینه سازی عملیات ترمومکانیکی بر روی آنها حل شده است.

این آلیاژها مجموعه خاصیت‌های مکانیکی بهتری را نسبت به آلیاژهای استاندارد (2524-T351 برای ورق‌ها و یا 7175-T73511 برای مقطع‌های اکستروژن) نشان می‌دهند. از آنجا که چگالی این آلیاژها ۵-۶ درصد کم‌تر از آلیاژهای متداول قبلی است، استفاده از آنها منجر به کاهش وزن به میزان ۳۵۰ کیلوگرم در هواپیماهای A380-F و ۲۰۰ کیلوگرم در مدل مسافربری شده است.

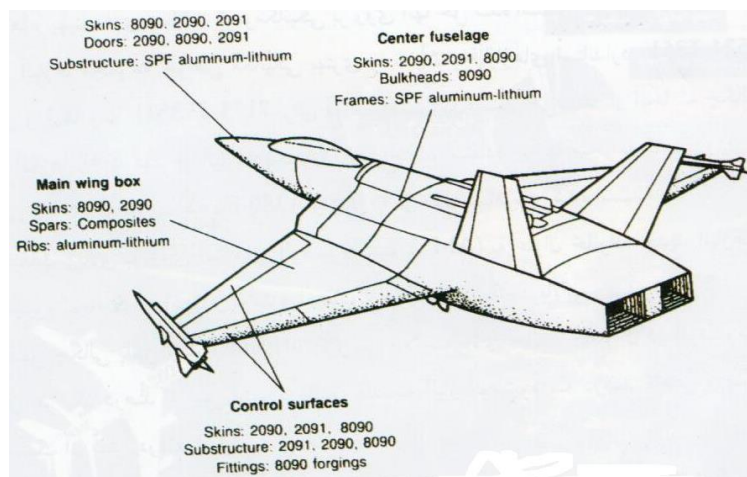
تحقیق‌های زیادی بر روی آلیاژهای آلومینیوم-لیتیم (Al-Li) به عنوان خانواده جدید آلیاژهای آلومینیوم انجام گرفته است و تولید و استفاده از این آلیاژ را به حد بالایی رسانده است.

به دلیل چگالی پائین لیتیم (0.54g/cm^3) و نیز حلالیت بالای حالت جامد آن در آلومینیوم به ازای هر یک درصد افزایش لیتیم در آلیاژ، دانسیته آلیاژ آلومینیوم سه درصد کاهش و مدول الاستیک آن شش درصد افزایش می‌یابد.

همچنین لیتیم باعث افزایش مقاومت به رشد ترک ناشی از تنش خستگی و نیز افزایش چقرمگی در دماهای پائین می‌شود. به این ترتیب به نظر می‌رسد این آلیاژها جزء آخرین فرصت‌ها برای توسعه انواع کاملاً جدید آلیاژهای آلومینیوم هستند که امکان رقابت با کامپوزیت‌ها جهت استفاده در سازه هواپیماها و سفینه‌ها را دارند. دو آلیاژ ۸۰۹۰ و ۲۰۹۰ از مهم‌ترین آلیاژهای حاوی لیتیم هستند که در صنعت هواپیماسازی از جایگاه مصرفی بالایی برخوردار گشته‌اند.



شکل ۵-۹ موارد مصرف آلیاژهای آلومینیوم - لیتیم در هواپیمای مسافری



شکل ۵-۱۰ موارد مصرف آلیاژ آلومینیوم - لیتیم در هواپیمای جنگی

کاربرد مواد آلومینیومی در سفینه‌های فضایی، هواپیماهای پیشرفته و نظامی، موشک‌ها و سایر وسایل پیشرفته در صنایع هوافضا از سایر موارد کاربرد این فلز می‌باشد که مجال بس فراخ جهت توضیح می‌طلبد.

صنایع خودروسازی

رشد روز افزون صنایع نیاز به مواد جدید با خاصیت ویژه‌ای را سبب شده است. صنایع خودروسازی و حمل‌ونقل نیز به دلیل رقابت تنگاتنگ، هر روز به تکنولوژی‌های جدیدتری مجهز شده و از مواد پیشرفته‌تری برای رسیدن به مقاصد اقتصادی و تکنولوژیکی خود استفاده می‌کنند.

امروزه سه هدف اصلی در صنایع حمل‌ونقل دنبال می‌شود که عبارتند از:

۱_ کاهش وزن وسایل حمل و نقل جهت صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی محیط زیست

۲_ تضمین کلیه استانداردهای ایمنی با استفاده از موادی با استحکام بالا

۳_ تسهیل فرآیندهای ساخت و کاهش هزینه‌های تولید

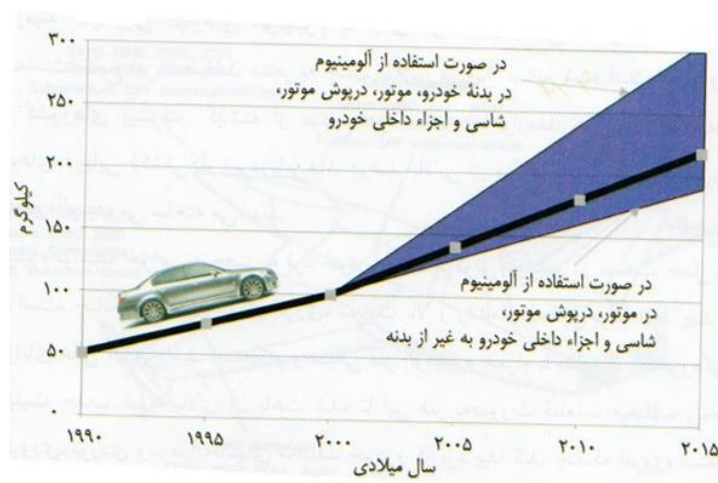
از آن جایی که آلیاژ آلومینیوم تقریباً هر سه هدف بالا را برآورده می‌کنند، تحقیق‌های زیادی در زمینه جایگزینی آلیاژهای آلومینیوم به جای فولاد در صنایع حمل و نقل صورت گرفته است. نتایج این تحقیق‌ها منجر به چنان انقلابی در این صنایع شده است که امروزه در بیش‌تر کشورهای پیشرفته، گذشته از صنایع هوا - فضا (ماهواره‌ها، هواپیماها، سفینه‌ها) و سازه‌های دریایی (کشتی‌ها، زیردریایی‌ها)، درصد بالایی از واگن‌ها، اتوبوس‌ها و خودروها از آلیاژهای آلومینیومی ساخته می‌شوند.

آلومینیوم به واسطه خاصیت منحصر به فرد خود باعث دگرگونی عظیمی در صنعت حمل و نقل شده است. چنان‌که صرفه جویی در انرژی، سرعت بالا و راندمان چندین برابر فقط چند مورد از مزایای عالی آن می‌باشد. استحکام و سبکی فلز آلومینیوم همراه با مقاومت به خوردگی بالا و قابلیت جذب ضربه بالای آن باعث شده تا این فلز به صورت قطعه‌های مختلف ریخته‌گری، اکسترودی، نوردی و ... در بخش‌های مختلف خودرو کاربرد پیدا کند. چنان‌که امروزه استفاده از آلومینیوم در برخی خودروهای خاص به ۳۵۰ کیلوگرم نیز رسیده است و هم‌چنان در حال افزایش است و حتی در خودروهای پیشرفته جایگزین بدنه فولادی گشته است.

کمبود سوخت و نیز آلودگی ناشی از خودروها به‌عنوان دغدغه‌های اصلی صنایع خودروسازی محسوب می‌شوند. استفاده از آلیاژهای آلومینیوم به جای فولاد، منجر به کاهش وزن حدود ۶۰ درصد (در ضخامت مساوی) می‌گردد که این امر اهمیت صرفه جویی در انرژی و کاهش آلودگی محیط را به خوبی نشان می‌دهد. وزن کم آلومینیوم ضمن کاهش وزن خودرو باعث کاهش در میزان مصرف سوخت و هم‌چنین کاهش در میزان آلودگی ناشی از آن می‌شود.

تحقیق‌ها نشان داده که ۱۰ درصد کاهش وزن در خودرو منجر به ۵/۵ درصد کاهش مصرف سوخت می‌شود. کاهش مصرف سوخت به معنای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌باشد. به‌عنوان مثال کاهش وزن خودرو به اندازه یک کیلوگرم در خودرویی که ۱۷۰۰۰۰ کیلومتر را طی کند، میزان CO₂ خروجی آن را ۲۰ کیلوگرم کاهش می‌دهد که این موارد از لحاظ کاهش در مصرف سوخت و آلودگی بسیار حایز اهمیت هستند.

علاوه بر موارد بالا امکان بازیافت و ذوب مجدد قطعه‌های آلومینیومی می‌تواند ۹۵٪ از گازهای آلاینده ناشی از تولید شمش آلومینیوم اولیه را بکاهد و این در حالی است که انرژی لازم جهت تولید آلومینیوم از مواد بازیافتی نیز تنها ۵ درصد انرژی لازم جهت تولید آلومینیوم اولیه می‌باشد. مجموع ویژگی‌های بالا باعث گشته تا مصرف آلومینیوم در یک خودرو از ۳ کیلوگرم در سال ۱۹۴۷ به ۱۰۰۰ کیلوگرم در سال ۲۰۰۰ (شکل ۱۰) برسد و همچنان نیز در حال افزایش است.



نمودار ۵-۷ میزان مصرف آلومینیوم در یک خودروی سواری در اروپا در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵

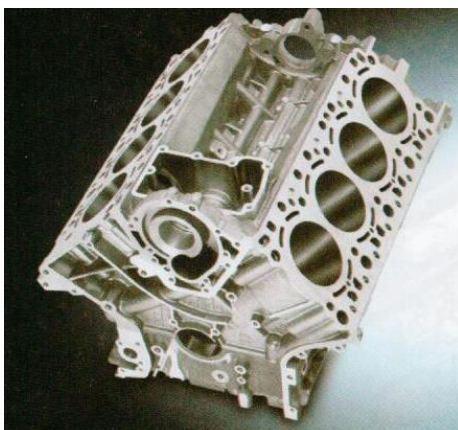
استفاده از آلومینیوم در صنایع خودروسازی از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ بیش از ۶۰ درصد رشد داشته است و به‌طور متوسط در هر خودروی سواری به ۱۴۰ تا ۱۹۰ کیلوگرم در سال رسیده است.

آلومینیوم در خودرو به دو شکل مصرف می‌شود:

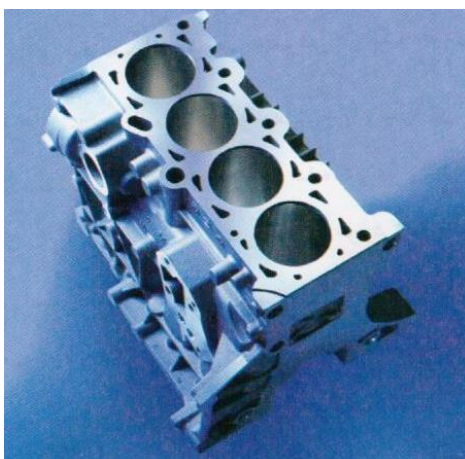
۱_ به صورت قطعه‌های ریخته‌گری

۲_ به صورت قطعه‌های اکستروود شده یا کار شده

قطعه‌های ریخته‌گری شده‌ی آلومینیوم در قسمت‌های مختلف اتومبیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. قطعه‌های اصلی موتور که یکی از سنگین‌ترین قسمت‌های خودرو است (شکل ۱۱ و ۱۲)، در جهت کاهش وزن از چدنی به آلومینیومی تبدیل شده‌اند. در ۵۰٪ درصد کل اتومبیل‌های تولید شده در سال ۲۰۰۰ موتورهای آلومینیومی مورد استفاده قرار گرفتند. آلیاژهای A356, A413, A380 در میان قطعه‌های ریخته‌گری آلومینیوم گسترده‌ترین محدوده‌ی مصرفی را به خود اختصاص داده‌اند.

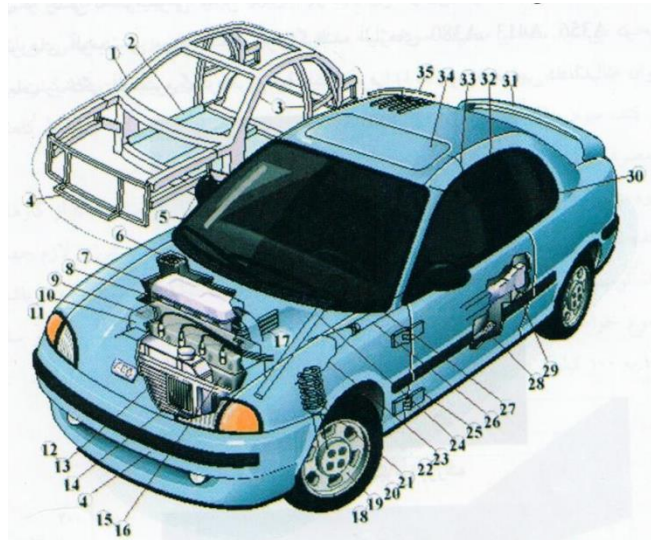


شکل ۵-۱۱ موتور آلومینیومی پورش



شکل ۵-۱۲ موتور آلومینیومی Audi2

در بخش قدرتی خودرو ۱۰۰٪ پیستون‌ها و ۷۵٪ از سرسیلندرها آلومینیومی هستند. برای تولید شاسی خودرو، قطعه‌های ریخته‌گری آلومینیوم تقریباً برای ۴۰٪ چرخ‌ها، سیستم ترمز، کاسه چراغ، سیستم تعلیق (بازوهای کنترل و نگه‌دارنده‌ها)، قطعه‌های سیستم فرمان (نگه‌دارنده‌های کیسه هوا، میل فرمان، سگ‌دست، جعبه فرمان و غربیلک فرمان) و دیگر تجهیزات استفاده می‌شوند. شکل ۱۳ اجزای مختلف آلومینیومی مصرفی در یک خودروی سواری را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۳ اجزای مختلف آلومینیومی مصرفی در یک خودروی سواری

اخیرا استفاده از آلیاژهای کارپذیر آلومینیوم در مقایسه با آلیاژهای ریخته‌گری با نرخ افزایش بیشتری در حال گسترش است. رینگ‌های فورج‌شده در مواردی که بار اعمالی بسیار زیاد است و خصوصیت‌های مکانیکی بالاتری مورد نیاز است، مورد استفاد قرار می‌گیرند. هم‌چنین آلومینیوم کارپذیر در سپرهای حرارتی، سپرهای ضربه‌گیر خودرو، سیستم پنوماتیک، کارتل روغن، قاب صندلی و ضربه‌گیرهای کناری موارد مصرف پیدا کرده است.

آلیاژهای آلومینیوم کاربردهای گسترده‌ای در مبدل‌های حرارتی دارند. تا دهه ۱۹۷۰ رادیاتورهای اتومبیل و گرم‌کننده‌ها از مس و برنج بودند. ولی در سال ۱۹۷۴، آلومینیوم جایگزین آن‌ها شد و تا کنون نرخ استفاده از آلومینیوم در این قطعه‌ها به‌طور پایدار، افزایش یافته است.

آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده در بدنه داخلی خودرو

مطالعه‌ها نشان می‌دهد با استفاده از آلومینیوم به جای فولاد در اسکلت فلزی خودرو تا ۵۰٪ کاهش وزن ایجاد خواهد شد که با در نظر گرفتن کل قطعه‌ها، این کاهش وزن به ۲۰ تا ۳۰ درصد کل وزن خودرو می‌رسد.

دیدگاه‌های مختلف نسبت به استفاده از آلومینیوم موجب دو نوع طراحی مختلف برای قطعه‌های خودرو شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از مقاطع اکستروودی آلومینیومی و دیگری استفاده از ورق‌های شکل‌پذیر آلومینیومی است که هر کدام مزایای خاص خود را دارند. اولی هزینه تجهیزات و هزینه تولید را کاهش

می‌دهد و دومی با کاهش تعداد قطعات باعث کاهش هزینه ساخت می‌شود. ولی در هر حالت ۴۰ تا ۵۰ درصد کاهش وزن در اسکلت و فلزی مشاهده می‌شود.

پیدا کردن آلیاژ صحیح برای ساختار بدنه و پانل‌های نگه‌دارنده بسیار مهم است. برای ورق‌های پوسته خارجی خودرو خصوصیت‌های متعددی از قبیل شکل‌پذیری خوب، استحکام رنگ و کیفیت سطح بعد از پرس اهمیت زیادی دارند.

به‌طور قطع، استحکام پس از سخت‌کاری نهایی در آلیاژهای ۶XXX مهم‌ترین فاکتور در استفاده از این آلیاژهاست. برای ورق‌های مورد استفاده در اسکلت خودرو، استحکام فاکتور مهمی در انتخاب است. همچنین میزان جذب انرژی ضربه و قابلیت کشش عمیق نیز اهمیت زیادی دارد. برای رسیدن به این هدف‌ها آلیاژهای گروه ۵XXX و ۶XXX به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که نسبت به فولاد مقاومت به خوردگی بالایی از خود نشان می‌دهند. جدول ۲ نمونه مقادیر تنش تسلیم و کاربردهای آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده در بدنه و ساختمان اتومبیل را نشان می‌دهد.

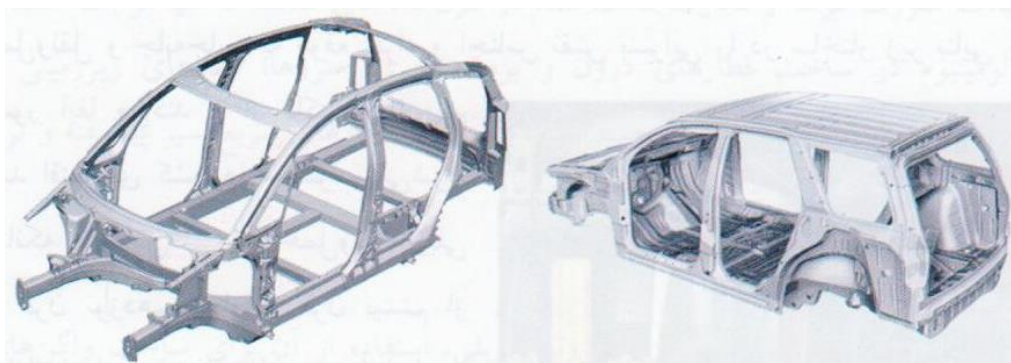
| نماد آلیاژ | ترکیب شیمیایی | نوع عملیات حرارتی | تنش تسلیم اسمی | کاربرد |
|------------|------------------------|-------------------|----------------|----------------------------------|
| 2008 | 0.9Cu-0.65Si-0.4Mg | T4 | 125 | پانل‌های بدنه، سازه‌ها |
| | | T6 | 240 | |
| 2036 | 2.6Cu-0.45Mg-0.25Mn | T4 | 195 | پانل‌های بدنه |
| 5182 | 4.5Mg-0.35Mn | O | 115 | پانل‌های بدنه حفاظ‌های حرارتی |
| 5454 | 2.7Mg-0.75Mn-0.12Cr | O | 115 | پانل‌های بدنه، سازه‌ها |
| 5052 | 2.5Mg-0.25Cr | O | 90 | پانل‌های بدنه |
| 6009 | 1.1Si-0.6Mg-0.35Mn | T4 | 125 | پانل‌های بدنه |
| | | T6 | 260 | سازه‌ها |
| 6010 | 1Si-0.8Mg-0.5Mn-0.4Cu | T4 | 165 | پانل‌های بدنه |
| | | T6 | 340 | |
| 6013 | 1Mg-0.85Cu-0.8Si-0.5Mn | T4 | 170 | تیرهای بزرگ |
| | | T6 | 340 | شکل داده شده با نورد |
| 7021 | 5.5Zn-1.5Mg-0.13Zr | O | 150 | تیرهای بزرگ |
| | | T6 | 415 | |
| 7029 | 4.7Zn-1.65Mg-0.7Cu | T6 | 380 | میله‌های بزرگ |

جدول ۵-۳ نمونه مقادیر تنش تسلیم و کاربردهای آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در بدنه و ساختمان اتومبیل

در مورد ورق‌های فولادی به‌طور گسترده‌ای از پوشش‌های گالوانیزه برای افزایش قابلیت رنگ‌پذیری و جلوگیری از ریزش رنگ استفاده می‌شود ولی ورق‌ها و مقطع‌های آلومینیومی با شکل‌پذیری بالا و کیفیت سطحی مناسب خوب، نیازی به پوشش ندارند.

شرکت آلومینیوم‌سازی امریکا Alcoa تصمیم گرفته است تا روش اساسی‌تری را در طراحی اسکلت اتومبیل دنبال کند. در این روش اسکلت خودرو، عمدتاً از مقطع‌های توخالی آلیاژهای اکستروژده آلومینیوم که از طریق بست‌های ویژه‌ای که به روش ریخته‌گری تحت فشار (دایکاست) تولید شده‌اند و یا به وسیله جوش کاری روباتیک به یکدیگر متصل می‌شوند، ساخته می‌شود.

مقاطع اکستروژدی از آلیاژهای سری ۶XXX و بست‌های ویژه از آلیاژهای ریختگی تحت فشار آلومینیوم - سیلیسیم ساخته می‌شوند. در این طراحی صرفه‌جویی وزنی در حدود ۴۰٪ حاصل می‌شود. به علاوه به قطعه‌های به کار رفته در ساختار بدنه اولیه به مراتب کم‌تر از نوع فولادی آن است. به طوری که در اسکلت آلومینیومی کم‌تر از ۱۰۰ قطعه ولی در ساختار فولادی بیش از ۳۰۰ قطعه به یکدیگر متصل می‌گردند. پانل‌های خارجی بدنه از جنس آلیاژهای آلومینیوم به روش‌های مختلف مانند جوش کاری قوسی تحت پوشش آرگون (TIG)، جوش کاری مقاومتی (نقطه‌ای)، پرچ کاری و اتصال با استفاده از چسب مخصوص به اسکلت بیرونی متصل می‌شوند. برای اولین بار در آلمان یک واحد تولید بدنه آلومینیومی برای شرکت Audi AG تاسیس گردید و اولین مدل مربوط به طراحی جدید را در سال ۱۹۹۴ به نام Audi A8 تولید نمود. این طرح توسط سایر شرکت‌های خودروسازی هم‌چنان در حال پیشرفت می‌باشد.



شکل ۵-۱۴ بدنه آلومینیومی Audi A2



شکل ۵-۱۵ بدنه آلومینیومی Audi A8

از دیگر موارد، کاربرد آلیاژهای آلومینیوم کارپذیر گروه ۶XXX در ساخت محورهای محرکه بود که منجر به کاهش وزن در حدود ۶ کیلوگرم گردید. برای میله‌های سپر و تقویت‌کننده‌ها نیز از آلیاژهای Al-Zn-Mg و Al-Zn-Mg-Cu از سری ۷XXX استفاده می‌شود. (مانند آلیاژ T6-۷۰۲۹ در ساختمان هواپیماها نیز به کار رفته است).

دو عامل دیگر که بر انتخاب مواد برای بدنه اتومبیل تاثیرگذار است، یکی مساله ایمنی و دیگری امکان و ظرفیت بازیافت می‌باشد. یکی از خاصیت مهم آلیاژهای مورد استفاده در بدنه ماشین، سفتی آن‌ها می‌باشد که این پارامتر مستقیماً به مدول الاستیک مرتبط است.

به‌عنوان یک قاعده کلی، وقتی که وزن یک سازه آلومینیومی نصف وزن سازه مشابه فولادی می‌باشد قطعه‌های آلومینیومی به کار رفته چیزی حدود ۵۰٪ درصد ضخیم‌تر از نمونه فولادی بوده که باعث ارتقا سفتی و صلبیت آن شده و مقاومت به شکست لازم را تامین می‌کند. در ارتباط با بازیافت، قراضه آلومینیوم دارای ارزش ذاتی بالا بوده و مخصوصاً می‌توان آلیاژهای مشابه را در یک سیستم بسته، ذوب مجدد نمود و مورد استفاده قرار داد.

در این ارتباط در حال حاضر ۶٪ وزن متوسط یک ماشین را آلومینیوم تشکیل می‌دهد در حالی که ۳۰٪ ارزش مواد بازیافت شده متعلق به آلومینیوم می‌باشد.

صنایع حمل‌ونقل ریلی

حمل‌ونقل و جابه‌جایی به موقع افراد و اجناس نقش به‌سزایی را در ساختار زیر بنایی یک کشور ایفا می‌کند و از فاکتورهای مهم رشد اقتصادی کشورها محسوب می‌شود. چنان‌که گسترش سیستم حمل‌ونقل ریلی در قرن نوزدهم و ابتدای قرن بیستم از عوامل اصلی رشد اقتصادی بریتانیا، اروپا و امریکا بود.

میزان استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل هوایی و ریلی با توجه به مزایا و معایب هر یک در طول دوره‌های صنعتی و در کشورهای مختلف متفاوت بوده است و جهت‌گیری سیستم حمل‌ونقل در دنیا به‌صورت مداوم در حال تغییر است.

با اوج‌گیری مسایل امنیتی و ازدحام ترافیک خطوط هوایی که مسافرت‌های هوایی را با ترسی ویژه همراه کرده است، سیستم حمل‌ونقل ریلی از مقبولیت بیش‌تری در بین مسافران برخوردار گشته است. به نحوی که مسافرت با قطار، به‌طور فزاینده‌ای امن‌تر، راحت‌تر و سریع‌تر جلوه نموده است. پیشی گرفتن سیستم

حمل و نقل ریلی در جابه‌جایی بار و مسافر بر سیستم هوایی و جاده‌ای، ابتدا در ژاپن و سپس در فرانسه و دیگر نقاط اروپا مشاهده شده است.

این در حالی است که آلومینیوم در این نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و ماده اصلی و مناسب جهت ساخت قطارها و واگن‌های سریع‌السیر و سبک وزن محسوب می‌گردد. ارتباط بین صنعت آلومینیوم و حمل و نقل ریلی به مدت‌ها پیش برمی‌گردد. اولین کاربرد گزارش شده‌ی آلومینیوم در صنعت حمل و نقل ریلی به استفاده از آن در ساخت چارچوب صندلی‌های واگن‌های مسافری در سال ۱۸۹۴ برمی‌گردد که از این واگن‌ها برای حمل مسافر در خط نیویورک، نیوهایون و هات‌فرت استفاده می‌شد. مورد بعدی گزارش شده، ساخت کامل واگن‌های باری از جنس آلومینیوم در سال ۱۹۳۱ بود. در سال ۱۹۳۳، در نمایشگاه جهانی شیکاگو، دو قطار مسافری که تماماً از آلومینیوم ساخته شده بودند به نمایش گذاشته شدند. گسترش اسفاد از آلومینیوم در صنعت حمل و نقل ریلی بعد از جنگ جهانی دوم ادامه داشته و علت اصلی این گسترش‌ها، خاصیت منحصر به فرد آلومینیوم یعنی سبکی، مقاومت به خوردگی و دوام آن بود.

تحقیق‌های صورت گرفته و تجربه‌های به‌دست آمده در طول دهه‌های گذشته نه تنها موجب استفاده از آلومینیوم در ساخت قطارهای درون و بیرون شهری، متروها، قطارهای زیرزمینی و واگن‌های باری شده است، بلکه موجب استفاده از آن در قطارهای سریع‌السیر پیشرفته و ترن مغناطیسی فوق مدرن نیز شده است.

ترن و قطارهای مسافری

این دسته از ترن‌ها و قطارها، طراحی و ساختارهای متفاوتی داشته و شامل انواع ترن‌ها و قطارهای مورد استفاده برای حمل مسافر در درون و بیرون شهر می‌شوند. قطارهای سریع‌السیر و بین شهری و هم‌چنین قطارهای مترو نیز جزو این دسته قرار می‌گیرند.

در طراحی ترن‌های مسافری وزن صندلی‌ها و مسافران باید در نظر گرفته شود. معمولاً برای ساخت ترن‌های مسافری از مقطع‌های اکسترودی طولی استفاده شده و سپس این مقطع‌ها در امتداد طول به هم جوش داده می‌شوند. به عبارتی طول پروفیل‌های اکسترودی، طول یک واگن ترن را تشکیل می‌دهد. به عنوان نمونه طول این مقطع‌ها برای ترن‌های متروی واش‌نگتن، ۷۵ فوت است. در طراحی و ساخت قسمت‌های مختلف یک واگن مسافری مانند کف، دیواره‌ها، مناطق نزدیک چرخ‌ها، درب‌ها و پنجره‌ها و ... نیز تمهیدات خاصی برای مستحکم‌سازی آن‌ها اندیشیده می‌شود.

همان‌گونه که قبلا در مورد واگن‌های باری نیز اشاره شد، برای ساخت واگن‌های آلومینیومی در مقایسه با واگن فولادی مشابه، هم تعداد قطعه‌ها کاهش یافته و هم این‌که مقدار جوش‌کاری مورد نیاز نیز کاسته می‌شود. در نهایت با استفاده از آلومینیوم، سازه‌ای به‌دست می‌آید که قابلیت تحمل بارهای پیچیده و نیروهای ایرودینامیکی را نیز دارد.

استفاده از آلومینیوم در ترن‌های مترو از اهمیت به‌سزایی برخوردار است، چرا که این ترن‌ها به هنگام سرویس‌دهی توقف و حرکت مداوم دارند و در نتیجه کاهش وزن این ترن‌ها منجر به کاهش انرژی مصرفی و افزایش شتاب‌گیری آن‌ها بعد از توقف‌شان می‌شود. علاوه بر این، دوام و مقاومت به خوردگی آلومینیوم از هزینه‌های نگهداری کاسته و بر عمر این ترن‌ها می‌افزاید. یکی از تکنولوژی‌های جدید، تولید قطارهای کج‌شونده می‌باشد. این تکنولوژی در سال ۲۰۰۲ بر روی ترن Acela اعمال شد. برای توضیح این تکنولوژی باید به این نکته اشاره نمود که یک دوچرخه‌سوار به هنگام عبور از یک پیچ، چنان‌چه کج‌شود، به راحتی می‌تواند پیچ را پشت سر بگذارد. در مورد قطارها و ترن‌های بین شهری نیز این موضوع صادق است. با استفاده از این تکنولوژی یک ترن می‌تواند به هنگام عبور از پیچ‌ها، تا ۳۵ درصد سرعت بالاتری نسبت به ترن‌ها و قطارهای معمولی داشته باشد. تکنولوژی گفته شده، باعث بهبود سرعت قطارها و ترن‌های بین شهری شده است، بدون این‌که نیازی به بهبود خطوط ریلی و یا ایجاد خطوط جدید باشد (شکل ۱۸).



شکل ۵-۱۶ ترن سریع‌السیر Acela مجهز به سیستم کج‌شونده در پیچ‌ها

امروزه از ترن‌های کج‌شونده در سرتاسر اروپا استفاده می‌شود. رکورد سرعتی که در مورد این نوع ترن‌ها در کشور چک به ثبت رسیده، 237 Km/hr می‌باشد. تلاش‌ها برای بهبود این سیستم هم‌چنان ادامه دارد و هم‌چنان آلومینیوم به‌عنوان فلزی سبک وزن، بهترین گزینه برای طراحی این نوع قطارها محسوب می‌گردد.

استفاده از یک آلومینیوم در ساختار یک ترن دو طبقه باعث افزایش سرعت این ترن از ۲۲۰ به ۲۷۰ کیلومتر بر ساعت شده است.

قطارهای سریع‌السیر پیشرفته به قطارهایی اطلاق می‌گردد که برای استفاده از آن‌ها نیازمند تغییر و تحول خطوط ریلی معمولی بوده و یا به‌طور کلی به خطوط ریلی جدید نیاز داشته باشند. یک نمونه از این گروه ترن‌های Maglev می‌باشد که نیازمند طراحی خطوط ریلی جدید است. این قطارها در آلمان و ژاپن در حال توسعه و گسترش می‌باشند. گزارش شده که سرعت ترن Maglev در تست آزمایشی خود به 581 Km/hr نیز رسیده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود برای رسیدن به این سرعت‌های بالا، آلومینیوم نقش به‌سزایی دارد چرا که موجب کاهش وزن ترن‌ها می‌گردد.

بنابراین علاوه بر پروفیل‌های اکسترودی طولی از صفحه‌های آلومینیومی برای ساخت دیواره‌های این ترن‌ها و قطارها استفاده می‌گردد. شکل ۱۹ نشان دهنده ترن Maglev می‌باشد.



شکل ۵-۱۷ ترن سریع‌السیر پیشرفته

اگرچه معلوم نیست و نمی‌توان حدس زد که تکنولوژی قطارهای سریع‌السیر تا کجا پیشروی نموده و یا حتی به کجا خواهد رسید؛ اما به این نکته می‌توان اشاره نمود که بدون استفاده از آلومینیوم دستیابی به چنین پیشرفتی در حوزه حمل‌ونقل ریلی امکان‌پذیر نبود. در جدو ۳ خاصیت‌های کلیدی آلومینیومی و اثر آن بر کاربرد این فلز در حوزه ریلی گفته شده است.

| کاربردهای باری | |
|----------------|-----|
| ویژگی | اثر |

| | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - افزایش ظرفیت بار مفید، کاهش سوخت مصرفی - افزایش هزینه‌های تولید در دو سال اول برگشت می‌نماید | سبکی |
| <ul style="list-style-type: none"> - هزینه نگهداری کم - قابلیت بازیابی فلز از قراضه زیاد می‌باشد | دوام |
| <ul style="list-style-type: none"> - کاهش یا حذف نیاز به رنگ آمیزی | مقاومت به خوردگی |
| <ul style="list-style-type: none"> - طراحی‌های جدید - کاهش وزن به همراه افزایش سختی مقطع‌ها - بهبود طراحی دیواره‌ها موجب کاهش نیروی انسانی می‌شود - کاهش تعداد قطعه‌های لازم - کاهش نیاز به جوش کاری و ماشین کاری | قابلیت تولید شامل : قابلیت جوش پذیری، شکل پذیری، اکستروژن پذیری و ... |
| <ul style="list-style-type: none"> - دستیابی به صنعت پایدار - حفظ مقدار بالای EOL (Engine-On-Load) | قابلیت بازیابی |
| کاربردهای مسافری | |
| اثر | ویژگی |
| <ul style="list-style-type: none"> - کاهش انرژی مصرفی (برای مترو) - افزایش نرخ شتاب‌گیری بعد از هر توقف (برای مترو) | سبکی |
| <ul style="list-style-type: none"> - افزایش امنیت مسافران - افزایش قابلیت کنترل در طراحی ترن‌های کج‌شونده | ساختار مستحکم |
| <ul style="list-style-type: none"> - کاهش هزینه نگهداری - کاهش نیاز به رنگ کاری - افزایش عمر کاری | مقاومت به خوردگی |
| <ul style="list-style-type: none"> - دستیابی به صنعت پایدار - حفظ مقدار بالای EOL (Engine-On-Load) | قابلیت بازیابی |
| ترن‌های سریع‌السیر پیشرفته | |
| اثر | ویژگی |
| <ul style="list-style-type: none"> - امکان طراحی ترن‌های دوطبقه - استفاده از پانل‌های چند لایه آلومینیومی | سبکی |
| <ul style="list-style-type: none"> - امکان ساخت ترن‌های قوی و با امنیت بالا | تکنولوژی ساخت |

جدول ۴-۵ خلاصه‌ای از خاصیت آلومینیوم در صنعت حمل‌ونقل ریلی

آلیاژهای آلومینیوم مصرفی در حمل و نقل ریلی

انتخاب آلیاژهای آلومینیوم برای استفاده در صنعت حمل و نقل ریلی با توجه به فاکتورهای راحتی تولید، استحکام مکانیکی، جوش پذیری و مقاومت به خوردگی صورت می‌گیرد. بر این اساس، آلیاژهای آلومینیوم - منیزیم (سری 5xxx) و آلیاژهای آلومینیوم - منیزیم - سیلیسیم (سری 6xxx) برای این منظور استفاده می‌شوند. آلیاژهای سری 5xxx عملیات حرارتی پذیر نبوده و استحکام مکانیکی را از طریق کار سرد به دست می‌آورند. این آلیاژها استحکام متوسط، مقاومت به خوردگی و جوش پذیری عالی دارند. در مقایسه، آلیاژهای سری 6xxx عملیات حرارتی پذیر بوده، استحکام بالاتر و جوش پذیری و مقاومت به خوردگی مناسبی دارند.

ورق‌ها و صفحه‌هایی که در تولید تجهیزات متحرک ریلی استفاده می‌شوند از جنس ۵۰۵۲ و ۵۰۸۳ و ۵۰۸۶ و ۵۴۵۴ و ۶۰۶۱ می‌باشند. هم‌چنین جنس پروفیل‌های اکسترودی مصرف شده برای این منظور ۵۰۸۳ و ۶۰۶۱ و تا حد کمی ۷۰۰۵ انتخاب می‌شود. اخیراً آلیاژهای جدیدتری مانند آلیاژهای ۵۰۵۹ و ۵۳۸۳ و ۶۰۸۲ نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

با گسترش تکنولوژی جوش کاری استفاده از آلیاژهای سری ۷xxx و ۲xxx که استحکام بیش‌تری دارند ولی از قابلیت جوش کاری ضعیفی برخوردارند، نیز در حال افزایش است.

در قطارهای سریع‌السیر پیشرفته نیز از مواد بالا استفاده می‌شود. به‌عنوان نمونه در ترن Japanese Shinkansen از آلیاژ ۵۰۸۳ و آلیاژ ۷۰۷۵ و در ترن German Trans rapid از ورث ۵۰۰۵ به‌عنوان پانل و پروفیل‌های اکسترودی ۶۰۶۱ و ۶۰۶۳ و ۶۰۰۵ استفاده شده است.

تحقیق‌های انجام شده در سال‌های گذشته، بر روی آلیاژهای جدید حاوی مقدارهای کم اسکاندیم متمرکز شده است. اسکاندیم عنصری است که بیش‌ترین اثر را در استحکام بخشی به آلومینیوم نسبت به دیگر عناصر دارد. ثابت شده است که اضافه کردن مقدارهای کم اسکاندیم (۰/۱-۰/۲ درصد وزنی) به آلومینیوم موجب بهبود خاصیت مکانیکی، ریزدانه شدن ساختار آلیاژهای آلومینیوم کارپذیر و بهبود جوش پذیری از طریق کاهش ترک گرم در منطقه جوش می‌شود. با توجه به این که خاصیت‌های ذکر شده به‌طور کامل مربوط به کاربرد آلومینیوم در صنعت حمل و نقل ریلی است، بنابراین برای بررسی این که آیا آلیاژهای ۵xxx و ۶xxx و ۷xxx حاوی مقدار کم اسکاندیم می‌تواند با استفاده از تکنولوژی جوش کاری FSW موجب بهبود عمل کرد آلیاژهای آلومینیوم در تجهیزات متحرک ریلی گردد، تحقیق‌ها و آزمایش‌هایی پایه‌ریزی شد.

اضافه کردن اسکاندیم به آلیاژهای سری ۷XXX موجب بهبود خاصیت مکانیکی، جوش‌پذیری و مقاومت به خوردگی می‌شود، ولی از سوی دیگر سرعت اکستروژن این مواد را تا حد زیادی کاهش می‌دهد و بنابراین هزینه‌های تولید افزایش می‌یابد. بنابراین بررسی این نکته که آیا افزایش خاصیت مکانیکی، بهبود جوش‌پذیری و مقاومت به خوردگی در اثر اضافه کردن اسکاندیم به آلیاژهای سری ۷XXX، توجیه‌کننده افزایش هزینه‌های مواد اولیه و تولید خواهد بود یا خیر، ضروری به نظر می‌رسد.

فصل ششم

محاسبات

مقدمه

در این مسعله به بررسی یک دیسک دوار با جداره نازک با سرعت چرخشی ثابت ω که در رابطه‌ی (۳۷-۸) نشان داده شده است می‌پردازیم. حرکت دایره‌ای شکل باعث به‌وجود آمدن شتاب گریز از مرکز در هر قسمت از دیسک می‌شود و این خود باعث به‌وجود آمدن بار خارجی در این مسعله می‌شود. هیچ بار خارجی دیگری مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

برای حل راحت‌تر، از نیروی گریز از مرکز به عنوان چگالی نیروی بدنه دیسک استفاده می‌کنیم. در حالتی که سرعت زاویه‌ای ثابت می‌باشد، نیروی بدنه $\rho \omega^2 r$ در راستای محوری می‌باشد که از رابطه ۱ به‌دست می‌آید:

$$F_r = \rho \times \omega^2 \times r$$

که در آن ρ چگالی جرم جنس می‌باشد. این مسعله دارای تقارن محوری بوده، بنابراین معادله دارای تعادل بوده و به رابطه ۲ ساده می‌شود:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho \times \omega^2 \times r = 0$$

جواب می‌تواند به دلیل استفاده از تابع تنش خاصی که به‌صورت $\sigma_r = \varphi/r$ معادله را به‌صورت موازنه تبدیل می‌کند دارای تغییر باشد.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \varphi/r \\ \sigma_\theta &= \frac{d\varphi}{dr} + \rho\omega^2 r^2 \end{aligned}$$

رابطه‌ی بین خواص و تابع تنش از رابطه ۳ به‌دست می‌آید که در آن $f = f_r$ تابع تنش می‌باشد. برای حالت گریز از مرکز، تنش جابه‌جایی از طریق $u_r = u_r(r)$ و $u_\theta = 0$ به‌دست می‌آید بنابراین تنش کششی برابر است با:

$$e_r = \frac{du_r}{dr}, \quad e_\theta = \frac{u_r}{r}, \quad e_{r\theta} = 0$$

با حذف u_r از معادله شکل ساده‌تری از این معادله به‌دست می‌آید:

$$\frac{d}{dr}(re_\theta) - e_r = 0$$

با استفاده از قانون هوک برای تنش صفحه‌ای، تنش‌های فشاری (کششی) به صورت زیر می‌باشد :

$$e_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) = \frac{1}{E}\left(\frac{\varphi}{r} - \nu\frac{d\varphi}{dr} - \nu\rho\omega^2r^2\right)$$

$$e_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_r) = \frac{1}{E}\left(\frac{d\varphi}{dr} - \rho\omega^2r^2 - \nu\frac{\varphi}{r}\right)$$

با جایگذاری نتایج قبل در دیگر رابطه‌ها، رابطه‌های جدیدی به وجود می‌آید :

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\varphi}{dr} - \frac{\varphi}{r^2} + (3 + \nu)\rho\omega^2r = 0$$

که می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}(r\varphi)\right) = (3 + \nu)\rho\omega^2r$$

با انتگرال گرفتن از این معادله، رابطه زیر به دست می‌آید :

$$\varphi = -\frac{(3 + \nu)}{8}\rho\omega^2r^3 + \frac{1}{2}C_1r + C_2\frac{1}{r}$$

که در آن C_1 و C_2 ثابت هستند. تنش‌های مشابه این جواب هستند :

$$\sigma_r = -\frac{(3 + \nu)}{8}\rho\omega^2r^2 + \frac{C_1}{2} + \frac{C_2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = -\frac{(1 + 3\nu)}{8}\rho\omega^2r^2 + \frac{C_1}{2} - \frac{C_2}{r^2}$$

برای دیسک ساده، تنش‌ها باید در مرکز ثابت شوند بنابراین $C_2 = 0$. در حالتی که دیسک دارای تنش آزاد می‌باشد، $r=a$ است بنابراین ثابت دیگر $C_1 = (3 + \nu)\rho\omega^2a^2$ می‌باشد فرم نهایی تنش به صورت زیر است. توزیع تنش در دیسک در شکل ۸-۳۸ نشان داده شده است که در آن $\nu=0.3$ می‌باشد. توجه داشته باشید که حتی اگر نیروی بدنه بیش‌ترین حد خود را در قسمت خارج لایه‌ی دیسک داشته باشد، باز هم ماکزیمم تنش در قسمت میانی دیسک اتفاق می‌افتد که در آن $F_r = 0$ می‌باشد. ماکزیمم تنش به صورت رابطه زیر می‌باشد :

$$\sigma_{max} = \sigma_r(0) = \sigma_\theta(0) = \frac{3 + \nu}{8}\rho\omega^2a^2$$

در دیسک حلقه‌ای $a < r < b$ ماکزیمم تنش در لایه داخلی مرزی اتفاق می‌افتد و برای حالت‌هایی حفره دیسک بسیار کوچک می‌باشد. $a < b$ ماکزیمم تنش تقریباً دو برابر دیسک ساده می‌باشد.

جواب این مسعله را می توان همچنین از طریق رابطه سازی از طریق حالت جابه جایی شعاعی به دست آورد که باعث به وجود آمدن رابطه ای می شود که می توان به راحتی از آن انتگرال گرفت.

برنامه متلب برای محاسبه فلز آلومینیوم

```
p=2760;
e=7.44*10^10;
w=25;
a=50;
v=0.33;
r=0:0.01:50;
sigr=(3+v/8)*p*(w.^2)*(a.^2-r.^2);
sigteta=(p*w.^2/8)*[(3+v)*a.^2-(1+3*v)*r.^2];
plot(r,sigr)
xlabel('r')
ylabel('sigr')
grid('on')
hold('on')
plot(r,sigteta)
xlabel('r')
ylabel('sigteta')
grid('on')
hold('on')
er=(1/e)*(sigr-v*sigteta);
eteta=(1/e)*(sigteta-v*sigr);
plot(r,er)
xlabel('r')
ylabel('er')
grid('on')
hold('on')
plot(r,eteta)
xlabel('r')
ylabel('eteta')
grid('on')
hold('on')
```

برنامه متلب برای محاسبه کامپوزیت فیبر کربن

```
p=1.60;
e=70*10^9;
w=25;
a=50;
v=0.10;
r=0:0.01:50;
sigr=(3+v/8)*p*(w.^2)*(a.^2-r.^2);
sigteta=(p*w.^2/8)*[(3+v)*a.^2-(1+3*v)*r.^2];
plot(r,sigr)
xlabel('r')
ylabel('sigr')
grid('on')
hold('on')
plot(r,sigteta)
xlabel('r')
ylabel('sigteta')
grid('on')
hold('on')
er=(1/e)*(sigr-v*sigteta);
eteta=(1/e)*(sigteta-v*sigr);
plot(r,er)
xlabel('r')
ylabel('er')
grid('on')
hold('on')
plot(r,eteta)
xlabel('r')
ylabel('eteta')
grid('on')
hold('on')
```

فصل هفتم

تحليل آباكوس

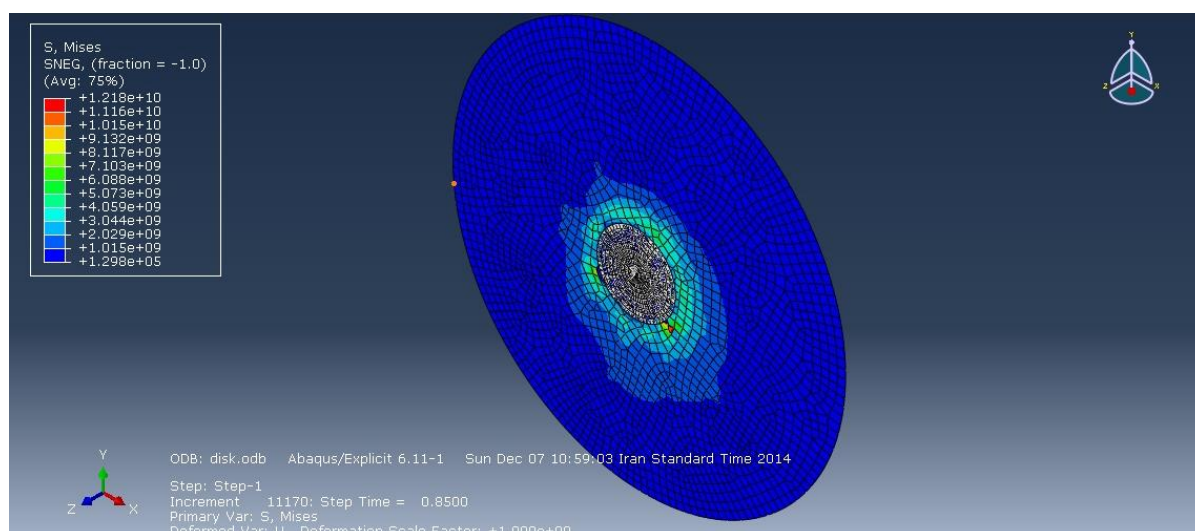
مقدمه

ما در این فصل به تحلیل با کمک از نرم افزار آباکوس می پردازیم که تمامی این تحلیل ها را با شکل نمودار نشان خواهیم داد. شایان ذکر است که تمام عددها و مقادارها و نوع آلیاژ مورد استفاده برای طراحی و تحلیل شکل های موجود در این فصل، را در فصل های گذشته به صورت کامل بیان کردیم.

محاسبات مربوط به دیسک دوار با فلز آلومینیوم و فیبر کربن

| sigr <1x5001 double> | | | | | | | | | | |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| | 1329 | 1330 | 1331 | 1332 | 1333 | 1334 | 1335 | 1336 | 1337 | 1338 |
| 1 | 1.2190e+10 | 1.2189e+10 | 1.2187e+10 | 1.2186e+10 | 1.2185e+10 | 1.2183e+10 | 1.2182e+10 | 1.2180e+10 | 1.2179e+10 | 1.2178e+ |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | |

شکل ۷-۱ تنش دیسک دوار بازه متلب (آلومینیوم)

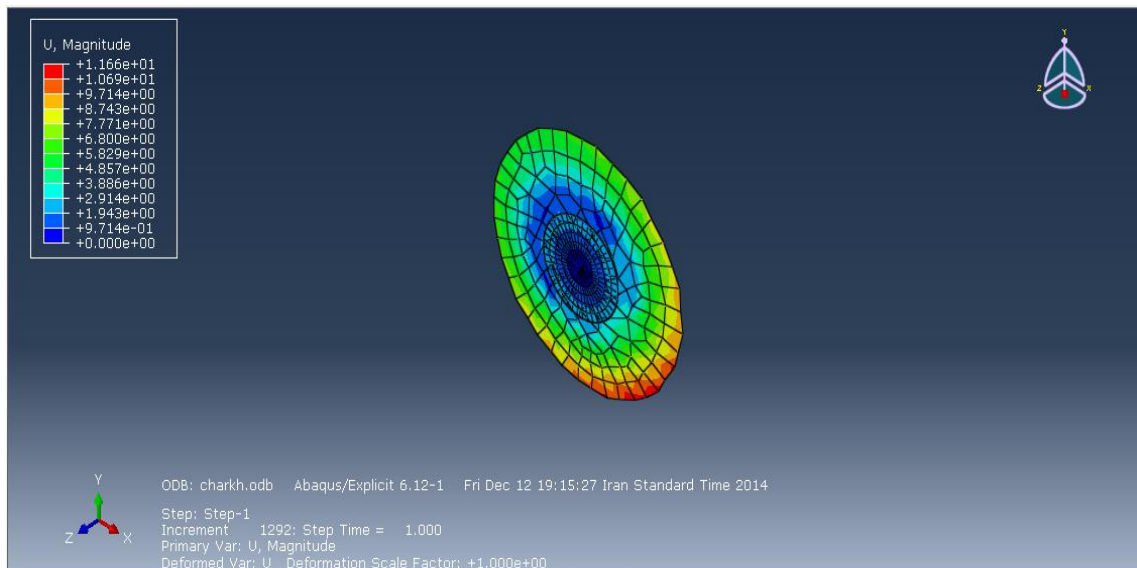


شکل ۷-۲ تنش در دیسک دوار تحلیل با آباکوس (آلومینیوم)

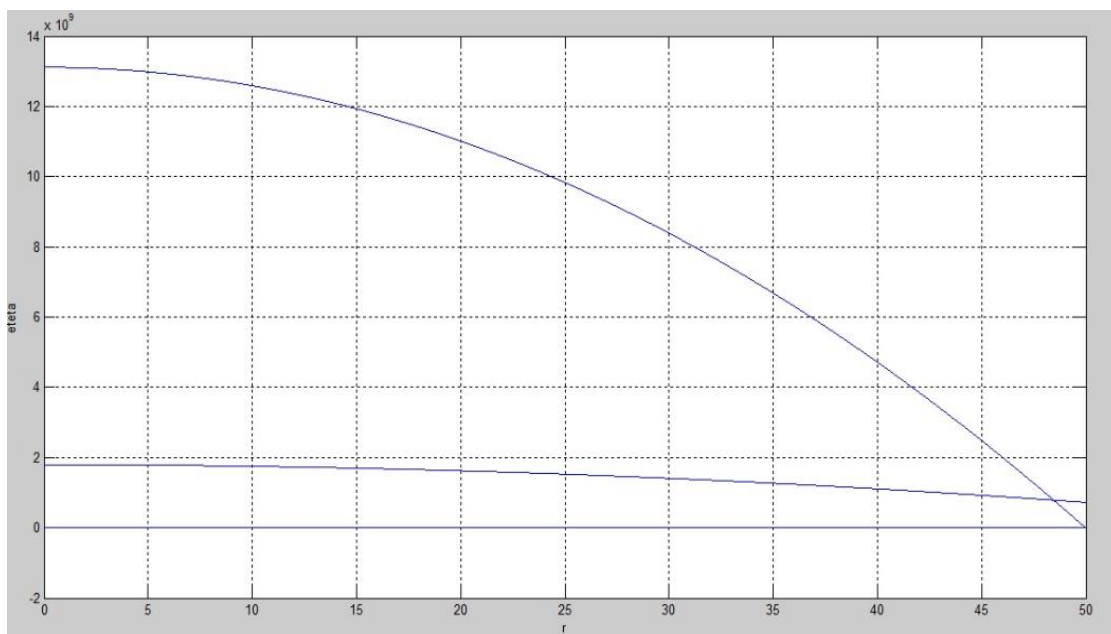
1x5001 double

| | 4847 | 4848 | 4849 | 4850 | 4851 | 4852 | 4853 | 4854 | 4855 | 4856 | 4857 | 4858 | 4859 |
|----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 1.1602e+06 | 1.1497e+06 | 1.1392e+06 | 1.1288e+06 | 1.1183e+06 | 1.1078e+06 | 1.0973e+06 | 1.0868e+06 | 1.0763e+06 | 1.0659e+06 | 1.0554e+06 | 1.0449e+06 | 1.0344e+06 |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | |

شکل ۳-۷ جابجایی دیسک دوار بازه متلب (آلومینیوم)



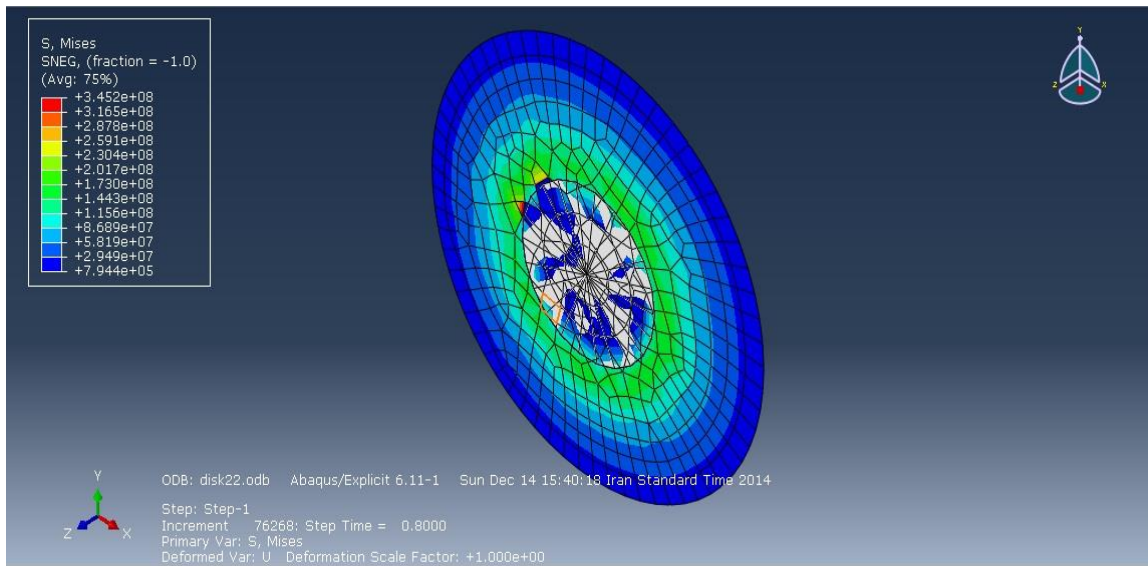
شکل ۴-۷ جابجایی در دیسک دوار تحلیل با آباکوس (آلومینیوم)



نمودار ۱-۷ تنش؛ جابجایی (آلومینیوم)

| sigr <1x5001 double> | | | | | | | | | | |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| | 3678 | 3679 | 3680 | 3681 | 3682 | 3683 | 3684 | 3685 | 3686 | 3687 |
| 1 | 3.4583e+06 | 3.4560e+06 | 3.4538e+06 | 3.4516e+06 | 3.4494e+06 | 3.4472e+06 | 3.4449e+06 | 3.4427e+06 | 3.4405e+06 | 3.4383e+ |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | |

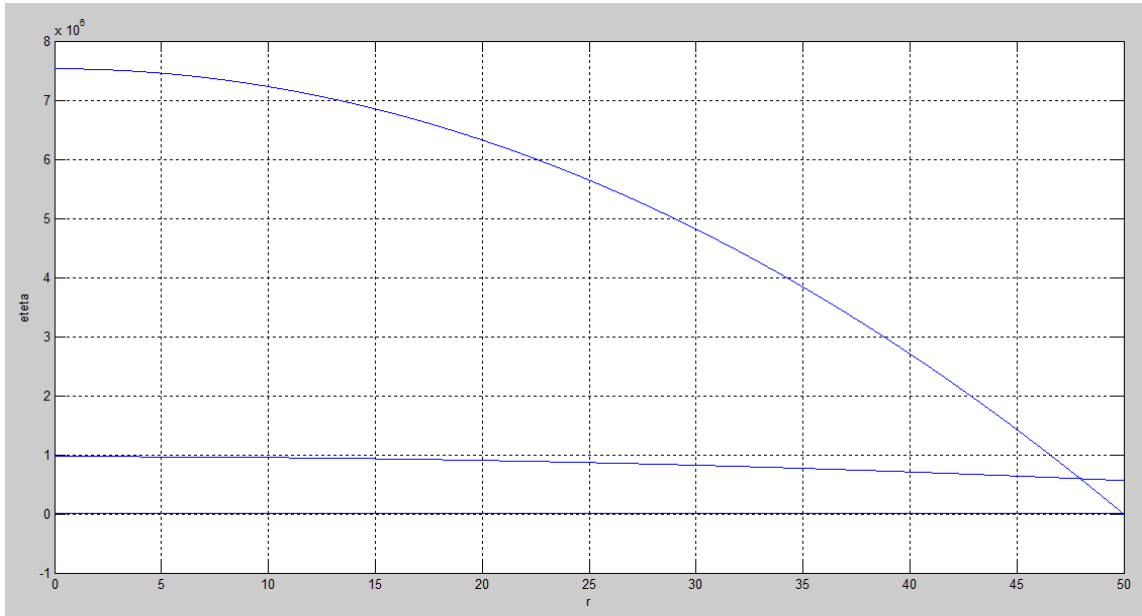
شکل ۵-۷ تنش دیسک دوار در بازه متلب (فیبر کربن)



شکل ۶-۷ تنش در دیسک دوار تحلیل با آباکوس (فیبر کربن)

| 1x5001 double | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 4964 | 4965 | 4966 | 4967 | 4968 | 4969 | 4970 | 4971 | 4972 | 4973 | 4974 | 4975 | 4976 |
| 1 | 7.7430e-07 | 7.3181e-07 | 6.8931e-07 | 6.4680e-07 | 6.0429e-07 | 5.6176e-07 | 5.1923e-07 | 4.7668e-07 | 4.3413e-07 | 3.9157e-07 | 3.4900e-07 | 3.0643e-07 | 2.6384e-07 |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | |

شکل ۷-۷ جایجایی دیسک دوار در بازه متلب (فیبر کربن)



نمودار ۷-۲ نمودار تنش؛ جابجایی (فیبر کربن)

نتیجه‌گیری

ما در این پروژه تحلیل و بررسی دیسک‌های دوار با شرایط و بارگذاری‌های مساوی اما با دو آلیاژ پرکاربرد در صنعت را انجام داده‌ایم.

یکی از این آلیاژها آلومینیوم ۲۶۱۸- تی ۶۱ که کاربردهای این آلیاژ در تولید قطعه‌های فورجینگ، پیستون و قطعه‌های چرخنده موتور هواپیما که در دمای بالا کار می‌کنند از موارد کاربرد این آلیاژها هستند.

دیگر آلیاژ مورد استفاده یک نوع کامپوزیت به نام فیبرکربن است که دارای وزن مخصوص کم و مقاومت خیلی بالایی است. ما با تحلیل این دو آلیاژ در شرایط مساوی به این نتیجه رسیدیم که :

درست است این نوع آلیاژ آلومینیوم دارای مقاومت خوبی است ولی کامپوزیت فیبرکربن در شرایط مساوی مقاومت بالاتری از خود نشان داده و چون مقاومت بالا و وزن مخصوص کم مد نظر ما بوده است این کامپوزیت را برای استفاده در صنایع بهتر و کاربردی‌تر می‌دانیم.

البته این نکته هم وجود دارد که استفاده از آلومینیوم مقرون به صرفه‌تر است از فیبرکربن که باید بسته به شرایط کارکرد و نوع استفاده در صنعت مختلف است.

به‌طور نمونه اگر در صنعتی وزن مخصوص کم و مقاومت بالایی مد نظر است مانند صنایع هوا و فضا که مقدار هزینه مالی زیاد مدنظر نیست کامپوزیت فیبرکربن پیشنهاد می‌شود ولی در صنایعی که هزینه مالی در اولویت قرار دارد آلومینیوم کاربردی‌تر است. البته این نکته نیز حایز اهمیت است که جان انسان‌ها همیشه در پروژه‌ها اولویت داشته است و هزینه‌های مالی در رتبه‌های پایین‌تر قرار دارند.

اما در رابطه با نرم‌افزار آباکوس که در این پروژه برای تحلیل استفاده شده است باید گفت که به‌دلیل این‌که برای ورود به بازار ایران این برنامه قفل‌شکنی شده است ما در تحلیل‌ها شاهد اختلاف اعداد به‌دست آمده نیز خواهیم بود که متأسفانه باعث شده دقت نرم‌افزار پایین بیاید و درصد خطای به‌وجود آمده بالا باشد.

منابع

آلومینیوم و آلیاژهای آن ، جواد قربانیان/حسین سراجیان ، حسین سراجیان ، تهران ، ۱۳۸۷
اصول علم مواد (ساختار ، خواص و مهندسی مواد) ، حسین تویسرکانی ، دانشگاه صنعتی اصفهان ،
اصفهان ، ۱۳۸۵

مقاومت مصالح ، ویراست پنجم ، فردیناند پی. بی.یر / ای. راسل جانسون / جان تی.دی.ولف / دیوید اف
مازوک ، دکتر ابراهیم واحدیان ، نشر علوم دانشگاهی ، تهران ، ۱۳۹۱

جزوات درس طراحی اجزا ماشین دوره کاردانی (دکتر وحید نورایی فر) و کارشناسی (مهندس شاپور
شیرزادی) جزوه درس مصالح مهندسی دوره کارشناسی (مهندس ندا دیده‌ور)

Materials – Handbook, manuals, etc. I. Shackelford, James F.II. Alexander,
William, 1950 Feb. 13

Elasticity: Theory, Applications & Numerics, Martin H. Sadd, University of
Rhode Island

American Society for Testing and Materials (ASTM) D 4123, Standard Test
Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous
Mixtures, 1987

Barber JR: Elasticity, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1992

Boresi AP, Schmidt RJ, and Sidebottom OM: Advanced Mechanics of
Materials, 5 th ed., John Wiley, New York, 1993

سایت های اینترنتی :

انجمن مهندسين ايران

وبلاگ انجمن مهندسين مکانیک تبریز

www.Amazon.com

www.Wikipedia.com

www.knowclub.com

www.auto_eng.blogfa.com

www.engineer.blogfa.com

www.gfxpedia.com