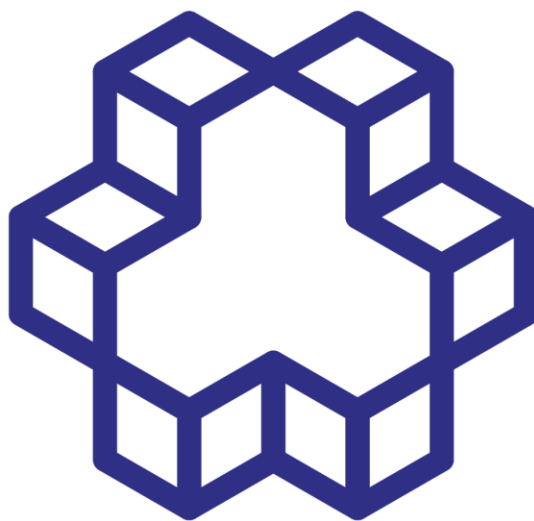


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

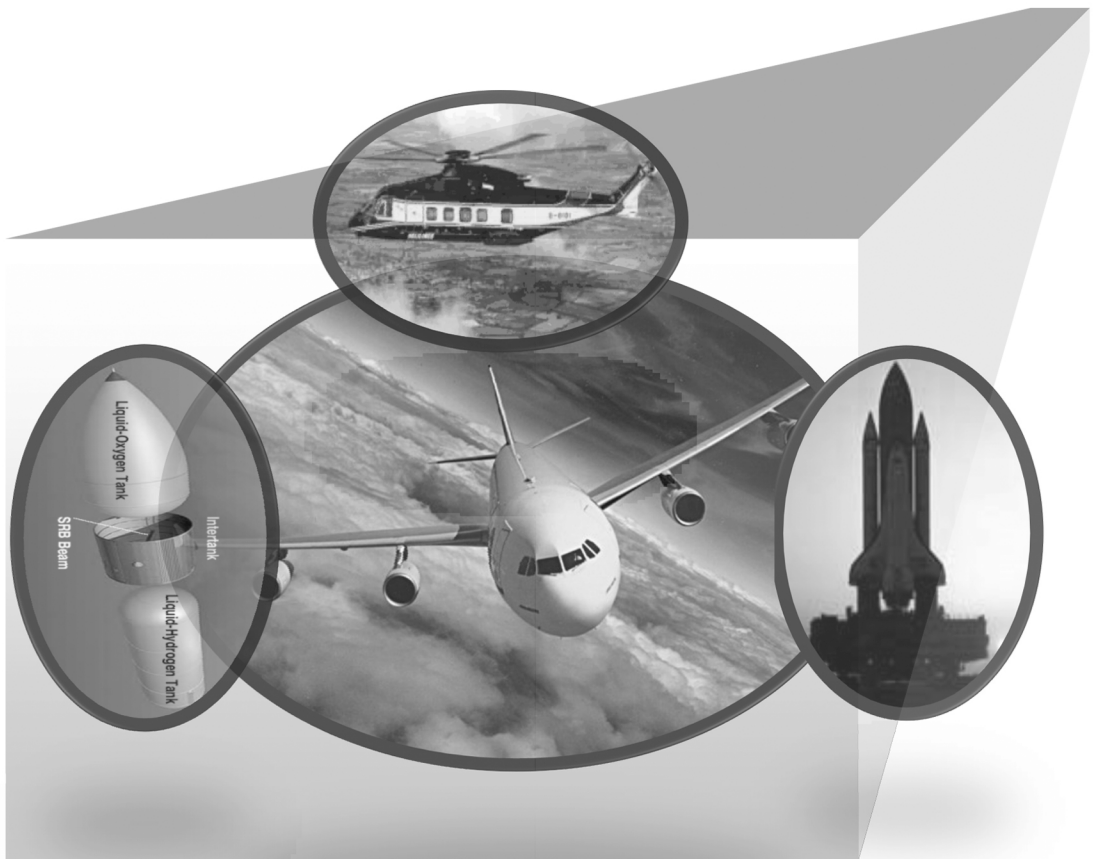


۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
نخستین دانشگاه صنعتی ایران

شناخت فلزات و آلیاژهای صنعتی
آلیاژهای سبک و فوق مستحکم آلومینیم

موادی نوین در صنایع هوا فضا



علی شکوه فر

آرش رضائی

شهرام احمدی



شماره ۲۴۴

سرشناسه: شکوه فر، علی، ۱۳۳۳ -
عنوان و نام پدیدآور: آلیاژهای سبک و فوق مستحکم: موادی نوین در صنایع هوا فضا / تألیف علی شکوه فر، آرش رضایی، شهرام احمدی.
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۳۸۸.
مشخصات ظاهری: [۲۴۷]ص: مصور، جدول، نمودار.
فروست: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ ۲۴۴
شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۸۷۰۳-۵۸-۰

ISBN: 978-964-8703-58-0

وضعیت فهرست نویسی: فیبا
یادداشت: بالای عنوان: شناخت فلزات و آلیاژهای صنعتی.
یادداشت: واژه نامه
یادداشت: کتابنامه: ص. [۲۴۷].
عنوان دیگر: شناخت فلزات و آلیاژهای صنعتی.
موضوع: آلیاژهای سبک
موضوع: آلیاژهای مقاوم حرارت
موضوع: آلیاژهای مقاوم حرارت
موضوع: هواپیماها - مواد صنعتی
موضوع: هوافضا
شناسه افزوده: رضایی، آرش، ۱۳۶۱ -
شناسه افزوده: احمدی، شهرام، ۱۳۵۵ -
رده بندی کنگره: ۱۳۸۸ ۱۷۸۱۷/ش/۴۸۴ TA
رده بندی دیویی: ۶۲۰/۱۶
شماره کتابشناسی ملی: ۱۷۸۳۰۴۸



ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی press.kntu.ac.ir

عنوان: آلیاژهای سبک و فوق مستحکم: موادی نوین در صنایع هوا فضا

مؤلفان: علی شکوه فر، آرش رضایی، شهرام احمدی

نوبت چاپ: دوم

تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۳

شمارگان: ۲۰۰ جلد

چاپ و صحافی: گرنامی

بها: ۵۲۰,۰۰۰ تومان

تمام حقوق برای ناشر محفوظ است

خیابان میرداماد غربی - شماره ۴۷۰ - انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲

میدان ونک - خیابان ولی عصر (عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - شماره ۲۶۲۶ - مرکز پخش و فروش انتشارات

تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: press@kntu.ac.ir - تارنما (فروش برخط): <http://press.kntu.ac.ir>

۶	مقدمه
۸	فصل اول: معرفی آلیاژهای آلومینیم
۸	۱-۱- فلزات سبک
۸	۱-۲- خواص کلی آلومینیم
۱۰	۱-۳- آلیاژهای آلومینیم
۱۴	۱-۴- تاثیر لیتیم بر خواص آلومینیم
۱۵	۱-۵- متالورژی عناصر آلومینیم و لیتیم
۱۵	۱-۵-۱- متالورژی آلومینیم
۱۶	۱-۵-۲- متالورژی لیتیم
۱۸	مراجع
۲۰	فصل دوم: آلیاژهای آلومینیم - لیتیم
۲۰	۲-۱- سبک سازی آلیاژهای آلومینیم
۲۶	۲-۲- معرفی انواع آلیاژهای آلومینیم - لیتیم
۲۷	۲-۳- تاریخچه پیدایش آلیاژهای آلومینیم - لیتیم
۳۰	۲-۴- خواص عمومی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۳۱	۲-۵- روند توسعه آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۳۲	۲-۶- آلیاژهای آلومینیم- لیتیم تجاری
۳۳	۲-۶-۱- آلیاژ Werdalite -۰۴۹
۳۶	۲-۶-۲- آلیاژ ۲۰۹۰
۳۷	۲-۶-۳- آلیاژ ۸۰۹۰
۳۸	۲-۷- کاربرد آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۴۵	۲-۸- کاربرد فضایی آلیاژهای آلومینیم لیتیم
۴۸	۲-۹- تاثیر عناصر آلیاژی بر خواص آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۵۲	مراجع
۵۶	فصل سوم: استحکام دهی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۵۶	۳-۱- روشهای بهبود خواص مکانیکی در آلیاژ آلومینیم و لیتیم
۵۶	۳-۱-۱- تشکیل محلول جامد
۵۹	۳-۱-۲- استحکام دهی کرنشی
۶۳	۳-۱-۳- کاهش اندازه دانه ها
۶۴	۳-۲- سخت گردانی یا استحکام دهی منظم
۶۵	۳-۳- استحکام دهی مدولی
۶۶	۳-۳-۱- استحکام دهی کوهرننتی
۶۶	۳-۳-۲- رسوب سختی در آلیاژهای آلومینیم- لیتیم-مس

۶۷	۳-۳-۳- عملیات حرارتی انحلالی
۶۸	۳-۳-۴- آب دهی و سریع سرد کردن
۷۰	۳-۳-۵- پیرسازی
۷۳	۳-۳-۶- ترکیب مکانیزمهای استحکام دهی
۷۵	۳-۴- مکانیزمهای استحکام دهی در عملیات پیرسازی
۷۸	۳-۵- جوانه زنی و رشد رسوبات
۸۱	۳-۶- مناطق GP
۸۵	۳-۷- رسوب گذاری در آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۸۹	۳-۸- اثر اضافه کردن عناصر سوم و چهارم در آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۹۰	۳-۸-۱- رسوب گذاری در سیستم آلومینیم- لیتیم- مس
۹۸	۳-۹- تاثیر دما و زمان پیرسازی بر تشکیل فازها در آلیاژهای آلومینیم- لیتیم- مس
۱۰۰	۳-۱۰- عملیات ترمومکانیکی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم- مس
۱۰۲	۳-۱۰-۱- عملیات ترمومکانیکی میانی
۱۰۳	۳-۱۰-۲- عملیات ترمومکانیکی نهایی بر روی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم- مس
۱۰۴	۳-۱۱- مناطق عاری از رسوب در مرزخانه‌ها در آلیاژهای آلومینیم
۱۰۸	۳-۱۲- کاربرد تکنیک DSC در مطالعه آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
	۳-۱۳- بررسی استحکام دهی آلیاژ آلومینیم - لیتیم ۲۰۹۰ با عملیات پیرسازی طبیعی و مصنوعی
۱۲۹	مصنوعی
۱۴۶	مراجع
۱۵۶	فصل چهارم: خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۱۵۶	۴-۱- بررسی رفتار کششی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۱۵۸	۴-۲- بررسی رفتار خستگی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۱۶۳	۴-۲-۱- تأثیر ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم بر رفتار خستگی
۱۶۷	۴-۳- بررسی رفتار سوپرپلاستیک آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۱۶۸	۴-۳-۱- عوامل مؤثر به رفتار سوپرپلاستیک آلیاژهای آلومینیم
۱۷۰	۴-۳-۲- بررسی خواص سوپرپلاستیک در آلومینیم و آلومینیم- لیتیم-X
۱۷۲	۴-۴- خواص آلیاژهای آلومینیم- لیتیم در دماهای خیلی پایین
۱۷۶	۴-۵- ناهمسانگردی خواص در آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۱۷۷	۴-۶- تأثیر نورد بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم
۱۸۰	۴-۷- تاثیر فازهای ترد مرزخانه‌های بر نورد آلیاژ ۲۰۹۰
۱۸۶	۴-۸- پدیده تبلور مجدد دینامیکی آلیاژ ۸۰۹۰
۱۹۶	مراجع

۲۰۲	فصل پنجم: خوردگی آلیاژهای آلومینیوم- لیتیم
۲۰۷	مراجع
۲۱۰	فصل ششم: روشهای تولید آلیاژهای آلومینیوم- لیتیم
۲۱۰	۶-۱- ذوب و ریخته گری آلیاژهای آلومینیوم - لیتیم
۲۱۴	۶-۲- روش های آلیاژسازی
۲۲۰	۶-۳- بوته و قالب
۲۲۲	۶-۴- جدایش در آلیاژهای ۸۰۹۰
۲۲۳	۶-۵- تاثیر اعمال محیط خلاء بر کیفیت تولید آلیاژهای آلومینیوم- لیتیم
۲۳۰	۶-۶- جوانه زایی با زیرکنیم در آلیاژهای آلومینیوم-لیتیم
۲۳۰	۶-۷- نکات مهم کار با لیتیم
۲۳۳	۶-۸- مورفولوژی و نوع فازهای رسوبی در آلیاژهای ریختگی آلومینیوم- لیتیم
۲۴۳	مراجع
۲۴۵	واژه نامه

تقدیر و تشکر

خداوند متعال را سپاس می‌گوییم که توفیق تالیف این کتاب را به ما عطا فرمود و جلوه‌های بیشتری از کمال علم خویش در خلقت جهان را بر ما نمایان ساخت. بر خود لازم می‌دانیم از جناب آقای دکتر هادوی و برخی از همکاران آزمایشگاه تحقیقاتی مواد پیشرفته و نانوتکنولوژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی که در تالیف این کتاب و نیز در برخی از مراحل علمی و عملی پروژه‌های تحقیقاتی ما را یاری نموده‌اند کمال قدردانی و سپاسگزاری را بعمل آوریم.

مولفین

مقدمه

یکی از مهمترین اهداف محققان علوم صنایع مختلف از جمله صنایع هوا- فضا، کاهش وزن و افزایش کارایی در سازه ها و در تجهیزات ذریبط به هنگام ایفای نقش می باشد. بحران انرژی از مهمترین چالشهای بشر در قرن حاضر است که سبب گردیده افزایش بهره وری و استفاده بهینه از منابع انرژی بخش جدایی ناپذیر برنامه هایی تحقیقاتی و تولیدی در سراسر دنیا باشد. در این راستا تولید و استفاده از مواد سبک و مستحکم که بتوانند نسبت استحکام به وزن بیشتری را ایجاد نمایند، از مهمترین رویکردهای علوم و تکنولوژی جدید صنایع هوایی است. فلز آلومینیم از نخستین مواد مورد استفاده در ساخت قطعات تجهیزات پروازی بوده که در حال حاضر نیز انواع آلیاژهای جدید این فلز به عنوان ماده اصلی در ساخت سازه های هوایی مطرح می باشد. آلیاژهای آلومینیم- لیتیم با وزن کمتر و مدول الاستیک بیشتر نسبت به آلیاژهای معمول آلومینیم از جمله آلیاژهای آلومینیم- مس، جایگزین بسیاری از مواد سازه ای صنعت هوایی شناخته شده اند. افزایش خواص مکانیکی با استفاده از فرایندهای متالورژیکی و یا افزودن عناصر آلیاژی مختلف، تعیین کننده روند اصلی تحقیقات بر روی این آلیاژ در طی سالهای اخیر بوده که منجر به تولید آلیاژهای سبک و فوق مستحکم گردیده است. در زمینه توسعه آلیاژهای سبک و فوق مستحکم اخیراً آلیاژهای جدیدی معرفی شده- اند که از کیفیت مطلوبی هم برخوردار هستند ولی به لحاظ اینکه تحقیقات مولفین بیشتر بر روی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم متمرکز بوده است در این کتاب تاکید اصلی بر روی این آلیاژها بوده و امیدواریم در تالیفات آینده سایر آلیاژهای سبک و حتی فوق سبک و فوق مستحکم مورد بحث و بررسی قرار گیرند.

مطالب این کتاب بخشی از مباحث مربوط به شناخت فلزات صنعتی را پوشش داده که می تواند برای محققین، اساتید و دانشجویان رشته های مهندسی مواد، مهندسی مکانیک، مهندسی هوافضا و نیز کارشناسان صنایع ذریبط مفید باشد.

مولفین

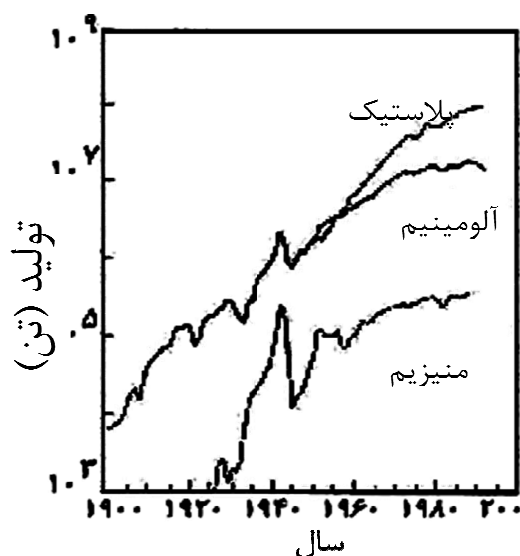
فصل اول

معرفی آلیاژهای آلومینیوم

فصل اول: معرفی آلیاژهای آلومینیم

۱-۱- فلزات سبک

یکی از شاخص‌های مهم و تعیین‌کننده در انتخاب و کاربرد مواد مهندسی در صنایع مختلف، نسبت استحکام به وزن ماده می‌باشد. به همین دلیل فلزات و آلیاژهای سبک جایگاه خاصی در صنعت حمل و نقل به ویژه هوا - فضا که در آنها کاهش وزن قطعات و سازه‌ها نقش اساسی و تعیین‌کننده دارد، احراز کرده‌اند، به طوری که در خلال ۵ دهه گذشته انگیزه قوی برای توسعه آلیاژهای سبک به وجود آمده است. فلزات سبک معمولاً به دو فلز آلومینیم و منیزیم و اخیراً فلز تیتانیم و آلیاژهایشان که اغلب برای کاهش وزن قطعات و سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، اطلاق شده است. فلزات سبک جزء مواد نسبتاً جدید به شمار می‌آیند. روند تولید فلزات سبک که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد [۱،۲].



شکل ۱-۱. روند تولید مواد سبک و مستحکم در قرن بیستم [۲].

۱-۲- خواص کلی آلومینیم

سبک بودن آلومینیم (چگالی آلومینیم خالص حدود 2.7 gr/cm^3) سبب می‌شود با وجود بالاتر بودن قیمت یک کیلوگرم آن در مقایسه با فولاد و سایر فلزات سنگین رقیب

مناسبی در مقابل آنها محسوب شود. اجزای کشتی‌ها، پل‌ها و ... را می‌توان در محل کارخانه ساخت و به آسانی به محل مونتاژ حمل کرد. برخی از آلیاژهای آلومینیم استحکامی قابل مقایسه با استحکام فولادهای ساختمانی غیرآلیاژی دارند. آلومینیم هم مانند فلزات دیگر، هر چه خالص‌تر باشد استحکام کمتری دارد. استحکام این فلز را به روش‌های مختلف می‌توان تا بیش از 540 MPa افزایش داد.

آلومینیم در برابر خوردگی اتمسفری و در برابر بسیاری از مواد شیمیایی مقاوم است. آلومینیم قابلیت شکل‌پذیری بالایی داشته و عملیاتی نظیر نورد، چکش‌کاری، خم‌کاری، پرس‌کاری و کشش عمیق را می‌توان بر روی آلومینیم و آلیاژهایش انجام داد. ریخته‌گری آلومینیم همراه با عناصر آلیاژی نظیر Cu , Mg , Si در قالب‌های ماسه‌ای، فلزی و تحت فشار امکان‌پذیر است. همچنین می‌توان از طریق کلیه روش‌های معمول جوشکاری، لحیم‌کاری، چسب زدن و پرچکاری قطعات آلومینیمی را به هم اتصال داد. آلومینیم از نظر حرارتی و الکتریکی هادی بسیار خوبی است. قابلیت هدایت حرارتی آن چهار برابر فولاد است. یک کیلوگرم آلومینیم خالص در مقایسه با همان وزن مس می‌تواند دو برابر انرژی الکتریکی حمل کند، به همین دلیل وزن رساناهای آلومینیمی در حدود نصف وزن رساناهای مسی مشابه آنهاست.

از جمله مزایای آلومینیم به طور خلاصه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- چگالی پایین 2.7 gr/cm^3
 - دمای ذوب پایین 660°C
 - ساختار FCC^۱ در دماهای مختلف و در نتیجه عدم وجود دمای انتقال نرمی به تدری
 - هدایت حرارتی و الکتریکی بالا
 - مقاومت به خوردگی خوب به واسطه تشکیل لایه اکسید محافظ به ضخامت $20-30^\circ \text{A}$
 - روش‌های تولید آسان از جمله متالورژی پودر، ریخته‌گری و شکل‌دهی مکانیکی از قبیل نورد، فشارکاری و غیره
 - امکان استفاده از عملیات حرارتی و کاربرد برای افزایش استحکام
- خواص فیزیکی آلومینیم در جدول ۱-۱ به طور خلاصه گزارش شده است.

^۱ - Face Centered Cubic

جدول ۱-۱- خواص فیزیکی آلومینیم [۳].

مقدار	خواص
۱۳	عدد اتمی
۲۶.۹۸	وزن اتمی (g/mol)
۳	ظرفیت
FCC	ساختار کریستالی
۶۶۰.۲	دمای ذوب (°C)
۲۴۸۰	دمای جوش (°C)
۰.۲۱۹	ظرفیت ویژه حرارتی در محدوده (۰-۱۰۰ °C) (cal/g.°C)
۰.۵۷	هدایت حرارتی در محدوده (۰-۱۰۰ °C) (cal/cms. °C)
۲.۶۹	مقاومت الکتریکی در دمای ۲۰°C (μΩ.cm)
۲.۶۸۹۸	چگالی (g/cm ³)
۶۸.۳	مدول الاستیک (GPa)
۰.۳۴	ضریب پوآسون

۳-۱- آلیاژهای آلومینیم

سیستم نامگذاری بین المللی، آلومینیم و آلیاژهای آن را با یک عدد چهار رقمی نامگذاری کرده است. گروه ۱xxx آلومینیم خالص (آلیاژ نشده)، گروه ۲xxx حاوی مس به عنوان عنصر اصلی آلیاژی، گروه ۳xxx حاوی منگنز، گروه ۴xxx حاوی سیلیسیم، گروه ۵xxx حاوی منیزیم، گروه ۶xxx حاوی منیزیم و سیلیسیم، گروه ۷xxx حاوی روی و گروه ۸xxx حاوی عناصر آلیاژی دیگر مخصوصاً لیتیم [۴].

در صنایع هوا فضا و صنایع نظامی بیشتر به دنبال خواصی از جمله استحکام بالا، تافنس شکست بالا، مقاومت به خوردگی عالی و مدول الاستیسیته بالا می‌باشیم.

آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر و استحکام بالای آلیاژهای آلومینیم اساساً در هواپیماها و صنایع هوا-فضا کاربرد دارند (Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Ca). تمایل به ساخت

هوآپیماهای مافوق صوت مانند هوآپیمای کنکورد باعث توسعه آلیاژهایی با استحکام خزشی بالا در زمانهای طولانی مثلاً ۵۰۰۰ ساعت در دماهای حدود ۱۲۰°C شده است برای مثال آلیاژ (Al-Zn-Mg-Ca): ۷۰۷۵ از جمله شاخص‌ترین آلیاژهای مصرفی در صنایع هوایی می‌باشد. در جدول ۱-۲ نام برخی از آلیاژهای کارپذیر به همراه خواص مکانیکی و کاربردهایشان آمده است. جدول ۱-۳ ترکیب اسمی برخی از آلیاژهای ویژه مصرفی در صنایع هوایی را نمایش می‌دهد.

آلیاژهای آلومینیم حاوی لیتیم نیز بواسطه چگالی پایین و خواص مکانیکی مناسب، در شرایط بهینه شده، در سالهای اخیر در صنایع پیشرفته توسعه زیادی پیدا کرده است.

جدول ۱-۲- خواص مکانیکی و کاربردهای برخی از آلیاژهای کارپذیر آلومینیم [۲].

آلیاژ	عملیات حرارتی	0.2% proof stress (MPa)	استحکام کششی	افزایش طول نسبی (% in 50 mm)	کاربرد
۱۱۰۰	O H18	۳۵ ۱۵۰	۹۰ ۱۶۵	۳۵ ۵	ورق، سیم و تجهیزات صنایع غذایی
۱۱۴۵	O H18	۳۵ ۱۱۵	75 145	40 5	فویل، ورق و ورق نازک
۱۱۹۹	O H18	۱۰ ۱۱۰	45 115	50 5	فویل‌های با کاربرد الکتریکی
۳۰۰۳	O H18	۲۵ ۱۸۵	۱۱۰ ۲۰۰	۳۰ ۴	ورق، ورق نازک، فویل، ظروف سلب
۳۰۰۴	O H38	۷۰ ۲۵۰	۱۸۰ ۲۸۰	۵ ۲۵	ورق، فویل، ظروف سلب
۳۰۰۵	O H18	۵۵ ۲۲۵	۱۳۰ ۲۴۰	۲۵ ۴	فویل‌های مستحکم
۵۰۰۵	O H18 H38	۴۰ ۱۶۵ ۱۸۵	۱۲۵ ۲۰۰ ۲۰۰	۳۰ ۴ ۵	فویل‌های مستحکم، سیم‌های هادی برق و ورق
۵۰۵۰	O H38	۵۵ ۲۰۰	۱۴۵ ۲۲۰	۲۴ ۶	تیوب، ورق و قوطی کنسرو
۵۰۵۲	O H38	۹۰ ۲۵۵	۱۹۵ ۲۷۰	۲۵ ۷	ورق نازک، ورق، تیوب و صنایع دریایی
۵۴۵۴	O H34	۱۲۰ ۲۴۰	۲۵۰ ۳۰۵	۲۲ ۱۰	کاربردهای خاص: سیم، ورق، ورق نازک و لوله‌های تحت فشار
۵۴۵۶	O H24	۱۶۰ ۲۸۰	۳۱۰ ۳۷۰	۲۴ ۱۲	بدنه و سازه دریایی
۵۰۸۳	O H343	۱۴۵ ۲۸۰	۲۹۰ ۳۶۰	۲۲ ۸	کاربردهای دماهای زیر صفر
۸۰۰۱	O H18	۴۰ ۱۸۵	۱۱۰ ۲۰۰	۳۰ ۴	ورق، لوله‌های گردش آب در راکتورهای هسته‌ای.