از مشهورترین کدهای بازاری فولادهای کم کربن هستند.

ب) فولادهای ساختمانی ٪۰/۲۵ > C ≥ ٪۰/۱

به دلیل افزایش کربن در این فولادها استحکام افزایش می‌یابد ولی با توجه به آنکه فولادهای ساختمانی نیازمند جوشکاری می‌باشند، سقف کربن این فولادها بسته است.

مثال‌هایی نظیر:

- پروفیل‌های سنگین (نبشی، ناودانی، تیرآهن، میلگرد، H_beam ، I_beam)
- لوله‌ها و اتصالات واحدهای نیروگاهی، نفت و گاز، سیالات و انرژی
- پروفیل‌های سبک (قوطی‌ها)
- ورق‌های نورد گرم برای ساخت بدنه مخازن، کشتی، تیر ورق، قاب ماشین‌آلات

از جمله فولادهای ساختمانی می‌باشند که هم‌زمان دو خاصیت استحکام و جوش‌پذیری را دارند.

مشهورترین کدهای این فولادها عبارت‌اند از:

فولادهای ساختمانی DIN ۱۷۱۰۰: ST۳۷، ST۵۲، ST۴۴

فولادهای ساختمانی EN ۱۰۰۲۵: S۲۳۵، S۳۵۵، S۲۷۵

فولادهای تحت فشار EN ۱۰۰۲۸ ـ۳: P۲۵۵، P۲۷۵، P۳۵۵، P۴۶۰

ASTM: A۲۳۴(اتصالات) ـ A۱۰۵(فلنج) ـ A۱۰۶, A۳۳۳(لوله) ـ A۲۸۳, A۲۸۵, A۵۱۵, A۵۱۶(ورق) ـ A۳۶(پروفیل)

لوله‌های انتقال نفت و گاز API ۵L: grade B، X۵۰، X۶۰، x۷۰

ج) فولادهای کربن متوسط (ماشین‌سازی) ٪۰/۶ > C ≥ ٪۰/۲۵

این فولادها عملیات حرارتی‌پذیرند بدان معنا که با تغییر در سیکل عملیات حرارتی خواص این فولادها قابل تغییر است.

این فولادها معمولاً در دو حالت آنیل شده (مناسب برای ماشین‌کاری) و سخت‌کاری شده (مناسب برای انتقال بار) استفاده می‌شوند.

مهم‌ترین ویژگی این فولادها استحکام و چقرمگی بالا است از این رو در ساخت قطعات انتقال قدرت ماشین‌آلات به‌کار می‌رود مانند:

- میل لنگ، میل محور، شاتون، گاردان، چرخ دنده، پینیون، فنر
- چکش
- هوک جرثقیل
- غلطک و قالب خم‌کاری، قالب کشش

مشهورترین فولادهای این گروه عبارت‌اند از:

EN ۱۰۰۸۳: CK۳۵، CK۴۵، ۴۲CrMo۶، ۳۶NiCrMo۶، ۵۸CrV۴

AISI: ۱۰۴۵، ۱۰۳۵، ۴۱۴۰، ۴۳۴۰، ۹۲۶۰

د) فولادهای پر کربن ٪۰/۶ ≤ C

این فولادها در کاربردهای ابزاری استفاده می‌شوند، جوش‌پذیری نداشته و از چقرمگی

پایینی برخوردارند. این فولادها دارای دو دسته اصلی‌اند:

- ٪ ۰/۶ ≤ C ≤ ٪ ۰/۹

در اولویت اول استحکام و در اولویت بعدی سختی اهمیت دارد، مانند:

- ابزار دستی (آچارها، انبردست، پیچ‌گوشتی و ..)
- فنر
- سیم در سازهای زهی (به دلیل نیاز به تغییر پیش تنیدگی در کوک کردن ساز)

۲ ٪ ۰/۹ < C < ٪ ۲

- ابزار برشی (تیغه، اره، مته، سوهان و...)
- بلبرینگ

مشهورترین فولادهای این گروه عبارت‌اند از:

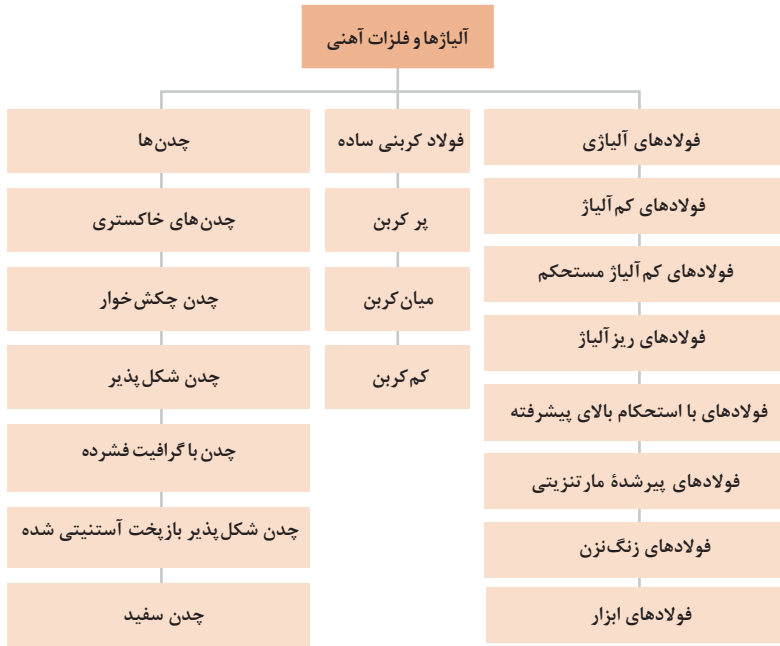
EN: CK۶۰U، CK۷۵، CK۱۰۰، X۲۱۰Cr۱۲

AISI: ۱۰۶۰، ۱۰۷۵، H۱۳، D۲، D۳، O۱، W۲

دانش افزایی

فلزات آهنی

در این جلسه فلزات و آلیاژهای عمدهٔ آهنی (پایهٔ آهن) که به‌صورت ترسیمی در شکل ۱۴ به‌طور خلاصه فهرست شده‌اند، معرفی می‌شوند. این مواد حکم ستون فقرات صنعت را در تمدن بشر داشته و تحولات صنعتی را ممکن می‌کنند. آنها را در هر جای زندگیمان می‌بینیم؛ در خودرویی که می‌رانیم، خانه‌ای که زندگی می‌کنیم، کنسروی که باز می‌کنیم و خانه‌ای که استاندارد زندگی ما را بالا برده‌اند، تنوع زیادی در سال‌های اخیر ایجاد شده است تا نیاز صنایع مختلف برآورده شود. ابداع‌ها و اصلاح‌ها ادامه دارند و در دهه‌های اخیر تعدادی از انواع و حتی کلاس‌های جدید فلزات آهنی نیز مطرح شده‌اند. براساس گزارش مؤسسهٔ آهن و فولاد آمریکا، بیش از ۷۰ درصد فولادهای مورد استفاده در تولید خودرو از این دسته‌اند. جدید ترین فولادها محکم‌تر، شکل‌پذیرتر و مقاوم به خوردگی‌تر از قبل هستند.



جدول ۱۴ـ طبقه‌بندی فلزات و آلیاژهای آهنی

به علاوه همهٔ فولادها تمایل به بازیابی هستند و این بازیابی منجر به هیچ کاهش کیفیتی نمی‌گردد. در حقیقت سالانه فولاد بیش از سایر مواد از جمله آلومینیم، شیشه و کاغذ بازیابی می‌شود. از آنجا که فولاد مغناطیسی است به راحتی ساختمان‌های تخریبی از خودروهای اسقاطی و لوازم خانگی مستعمل، جدا و بازیابی می‌گردد. در سال ۲۰۰۳ حدود ۷۰ میلیون تن فولاد در ایالت متحده با نرخ بازیابی کلی نزدیک به ۷۱ درصد بازیابی شد. نرخ بازیابی قوطی‌های فولادی ۶۰/۲ درصد، لوازم خانگی بزرگ ۸۹/۷ درصد و خودرو ۱۰۲/۹ بود. صحیح است ـ فولاد بازیافتی از اتومبیل قراضه، بیشتر از فولاد استفاده شده در ساخت یک خودروی جدید بوده است. هر تن فولاد بازیافتی بیش از ۴۰۰۰ پوند، مادهٔ خام و ۷۴ درصد انرژی برای تولید یک تن فولاد جدید را صرفه‌جویی می‌کند.

آهن: آهن قرن‌ها به‌عنوان مهم‌ترین فلز مهندسی به شمار می‌آمده است. با وجود اینکه آهن از نقطه نظر فراوانی چهارمین عنصر موجود در قشر زمین است اما به ندرت به حالت فلزیش در طبیعت یافت می‌شود؛ شکل طبیعی آن انواع ترکیب‌های معدنی یا کانه است. مطلوب‌ترین این کانه‌ها اکسیدهای آهن با ناخالصی‌های همراه آنها است. ابتدا بر این کانه‌ها نوعی عملیات احیای شیمیایی اعمال می‌شود تا پیوند آهن ـ اکسیژن شکسته شده و آهن فلزی به‌دست آید. کانه، سنگ آهک، کک و هوا به‌طور پیوسته وارد کورهٔ مخصوص می‌شود و فلزات مذاب هر از گاهی از آن خارج می‌گردد.

اکسیدهای ناخالص دیگر (که به‌عنوان ناخالصی در کانهٔ اولیه موجود بوده‌اند.) نیز در کوره احیا می‌شوند تمام فسفر و بخشی از منگنز وارد آهن مذاب می‌شوند. بخشی از اکسیدهای سیلیسیم و گوگرد احیا می‌گردند و این عناصر نیز در فلز نهایی ظاهر می‌شوند. دیگر عناصر آلوده‌کننده چون کلسیم، منیزیم و آلومینیم در سربارهٔ پایهٔ آهکی جمع‌آوری و از سیستم خارج می‌شوند. بنابراین آهن خام به‌دست آمده دارای ترکیب تقریبی زیر است:

سیلیسیم ۱ تا ۳ درصد،
فسفر ۰/۱ تا ۲ درصد،
کربن ۳ تا ۴/۵ در صد،
گوگرد ۰/۰۵ تا ۰/۱
منگنز ۰/۱۵ تا ۲/۵ درصد

بخش کمی از آهن خام مستقیماً به شکل نهایی ریخته‌گری می‌شود. مادهٔ حاصل چدن نام دارد. البته، غالباً چدن‌های تجارتی از ذوب مجدد آهن قراضه و فولاد و احتمالاً مقداری آهن خام تولید می‌شوند.

جلسه ششم موضوع: فولاد ساده کربنی

هدف: آشنایی با فولاد ساده کربنی و اصول نام‌گذاری آن

فولاد ساده کربنی از نظر تناژ تولیدی بیشتر از مجموع الباقی فلزات (فولادهای آلیاژی و آلیاژهای غیرآهنی) در صنعت مورد استفاده واقع می‌شود. علت آن هم قیمت پایین این آلیاژ در قیاس با سایر آلیاژهای مهندسی است. در جدول ۱۵ قیمت آلیاژها در مقایسه با فولاد ساده کربنی نشان داده شده است.

جدول ۱۵ــ قیمت آلیاژها در مقایسه با فولاد ساده کربنی

آلیاژ	فولاد ساده کربنی	فولاد کرم ـ مولیبدن‌دار	فولاد زنگ نزن مارتنزیتی	فولاد زنگ نزن آستنیتی	آلومینیم
نسبت قیمت به فولاد ساده کربنی	۱	۲/۲	۵ ـ ۵/۴	۱۰ـ ۶	۱۲ـ ۵
آلیاژ	آلیاژهای مس	تیتانیم خالص	تیتانیم آلیاژی	مونل	اینکونل
نسبت قیمت به فولاد ساده کربنی	۳۰ـ۱۵	۵۰ـ۴۰	۶۰ـ۴۵	۴۰ـ۳۵	۶۰ـ۳۰

این اختلاف قیمت در کنار خواص بسیار مطلوبی که فولادهای ساده کربنی با کربن‌های مختلف دارا می‌باشد سبب شده که استفاده از آن مورد اقبال مصرف‌کنندگان باشد. فولاد ساده کربنی (Plain Carbon Steel) علاوه بر آهن و کربن مقداری عناصر همراه نیز در آنالیز خود دارد. در جدول ۱۶ به حداکثر مقدار آنها اشاره شده است.

جدول ۱۶ــ آنالیز عناصر همراه در فولادهای ساده کربنی

عنصر	Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	La	Mn	Mo
مقدار (درصد وزنی)	۰/۳۰	۰/۰۰۰۸	۰/۱۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۱۰	۱/۶۵	۰/۰۸
عنصر	Nb	Ni	Pb	Se	Si	Te	Ti	V	W
مقدار (درصد وزنی)	۰/۰۶	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۱۰	۰/۶۰	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۳۰
عنصر	Zr	سایر عناصر (به جز کربن، فسفر، گوگرد و نیتروژن)							
مقدار (درصد وزنی)	۰/۰۵	۰/۱۰							

با توجه به آنکه در تولید فولاد نسبت قراضه به آهن احیا شده چه میزان باشد و نیز نوع سنگ معدن، مقدار عناصر همراه تعیین می‌شود.
عناصر همراه می‌توانند مفید (Si ـ Mn) یا مضر (S ـ P) باشند. به عناصر همراه مضر اصطلاحاً ناخالصی (Impurrity) گفته می‌شود.

روش تدریس

بیان این درس بیشتر به‌صورت ارائه مطلب می‌باشد. البته با توجه به اینکه هنرجویان فولاد ساده کربنی را در زندگی روزمره خود مشاهده می‌نمایند می‌توانید با یادآوری کاربردهای آن ذهن مخاطب را با مطالب انس دهید.
در بخش نام‌گذاری و استانداردبندی فولاد با توجه به کمبود وقت و البته نوع نیاز هنرجویان فقط به بیان استاندارد DIN۱۷۱۰۰ و DIN۱۶۱۴ بسنده شده است.
قوانین نام‌گذاری فولادها در استاندارد DIN۱۷۰۰۷ که پس از تشکیل اتحادیه اروپا به EN۱۰۰۲۷ تغییر نام داد به تفصیل بیان شده است که پیشنهاد می‌شود برای آشنایی بیشتر به آخرین ویرایش (۲۰۱۷) این استاندارد مراجعه نمایید.
لازم به ذکر است فولادهای کم کربن نورد سرد اخیراً با نام‌های دیگری که بیانگر سطح شکل‌پذیری است (DC) نشان داده می‌شوند.

→ ST۱۲ Dco۲
→ ST۱۳ Dco۳
→ ST۱۴ Dco۴

فولادهای ماشین‌سازی و پرکربن در استاندارد EN۱۰۰۸۳ معرفی شده‌اند. که پیشنهاد می‌شود با مراجعه به آن مفاهیم و قوانین حاکم را بیشتر مطالعه فرمایید.

جلسه هفتم و هشتم موضوع: کاربرد فولادهای ساده کربنی

هدف: آشنایی با کاربردهای فولادهای ساده کربنی

روش تدریس

جدای بحث کاربرد فولادهای ساده کربنی در جدول ۶ کتاب درسی برای هر نوع از فولاد کاربردی ذکر شده است. در جدول ۱۷ مثال‌های بیشتری برای هر کاربرد بیان شده است.

جدول ۱۷ـ کاربردهای فولاد ساده کربنی

کد فولاد DIN	معادل ASTM یا AISI	ویژگی	کاربرد
ST۱۲	۱۰۱۰	قابلیت خم‌پذیری	ساخت بدنه لوازم خانگی ـ ورق‌های گالوانیزه ـ مفتول جوشکاری ـ سیم خاردار ـ فنس ـ واشر فلزی
ST۱۳	۱۰۰۸	قابلیت کشش	مشابه ST۱۲
ST۱۴	۱۰۰۶	قابلیت کشش عمیق	بدنه خودرو
ST۳۷	A۲۸۳ Gr ـ C A۲۸۵ A۱۰۶ GR ـ B A۳۶ AS۱۶ GR ـ SS	استحکام مطلوب جوش‌پذیری مطلوب	ساخت کلیه قاب‌های ماشین‌آلات سبک ـ ساخت سازه‌های گوناگون ـ پروفیل‌های میز و صندلی ـ بدنه مخازن ذخیره ـ درب و پنجره‌های فولادی ـ لوله‌های انتقال آب
ST۴۴	A۱۰۶_C A۵۱۶_۶۰ A۳۶	استحکام مطلوب جوش‌پذیری مطلوب	مشابه ST۳۷
ST۵۲	A۵۱۶_۷۰ A۲۱۶ ـ WCC A۱۰۵ ـ GrB	استحکام بالا جوش‌پذیری مطلوب	قاب ماشین‌آلات سنگین ـ سازه‌های مرتفع ـ بدنه مخازن تحت فشار و کشتی ـ لوله‌های انتقال آب ـ پیچ و مهره

CK۲۲	۱۰۲۰	استحکام خوب جوش‌پذیری مطلوب	قطعات انتقال قدرت و ماشین‌های کوچک ـ زنجیر ـ پیچ و مهره
CK۳۵	۱۰۳۵	استحکام بالا جوش‌پذیری ضعیف	کلیه قطعات انتقال قدرت، مانند محورها، شاتون، گاردان، میل لنگ، زنجیر، پیچ و مهره، پینیون و چرخ دنده‌ها
CK۴۵	۱۰۴۵	استحکام بالا جوش‌پذیری ضعیف	مشابه CK۴۵ در موارد با بارگذاری سنگین‌تر
CK۶۰	۱۰۶۰	فنریت خوب مقاومت به سایش مطلوب عدم جوش‌پذیری	فنرها ابزار دستی (آچار، پیچ‌گوشتی، انبرها) ـ قالب‌ها غلتک‌های خمکاری
CK۷۵	۱۰۷۵	مشابه CK۶۰	مشابه CK۶۰ به مقاومت به سایش بالاتر ابزار برشی

حل تمرین صفحه ۱۲۰

تصویر	ویژگی	فولاد پیشنهادی
پایه نیمکت	استحکام و جوش‌پذیری	ST۳۷
چرخ دنده بزرگ	استحکام و تافنس	CK۴۵
پایه تابلو	استحکام و جوش‌پذیری	ST۳۷
ورق آجدار	شکل‌پذیری	ST۱۲
پدال دوچرخه	استحکام و تافنس	ST۵۲_ CK۲۲_ CK۳۵
غلتک خمکاری	استحکام و مقاومت به سایش	CK۴۵_CK۶۰
واشر	شکل‌پذیری بالا	ST۱۴_ ST۱۳_ ST۱۲
کیس کامپیوتر	خم‌پذیری	ST۱۲
درب	استحکام و جوش‌پذیری و شکل‌پذیری	ST۳۷

خطوط لوله	استحکام و جوش‌پذیری	ST۳۷_ST۴۴_ST۵۲ و معادل‌های ASTM آنها مانند A۱۰۶
چکش	استحکام و مقاومت به سایش	CK۴۵_CK۶۰_CK۷۵
قیچی	مقاومت به سایش	CK۶۰_CK۷۵

پیشنهاد می‌شود در هر گروه از کاربردهای جدول مثال‌های بیشتری را از اطراف خود بیابید و مثال بزنید.

دانش افزایی

فولاد

فولاد یک ماده مهندسی بی‌نهایت مفید است. فولاد دارای استحکام، صلبیت و دوام است. از دیدگاه تولیدی، قابلیت شکل‌پذیری، اتصال‌دهی و رنگ‌پذیری همچنین قابلیت تعمیر آن همگی قابل توجه و جذاب هستند. در بیست سال گذشته حدود ۵۵ درصد وزن یک خودروی سواری معمولی را شامل می‌شده است و انتظار می‌رود این روند ادامه داشته باشد. درحالی‌که صنایع خودرو و ساختمان عمده مشتریان فولاد هستند، این ماده در ساخت مخازن، لوازم خانگی و ماشینی و همچنین زیرساخت صنایعی مانند نفت و گاز نیز کاربرد گسترده‌ای دارد.

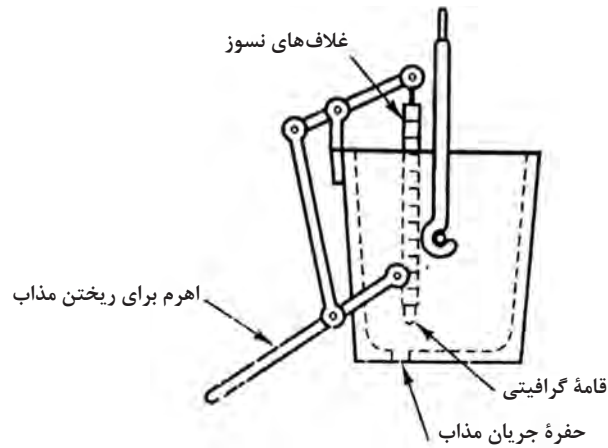
تولید فولاد اساساً یک فرایند اکسایش است که موجب کاهش مقداری کربن، سیلیسیم، منگنز، فسفر و گوگرد در مخلوط آهن خام مذاب و قراضهٔ فولاد شود. در سال ۱۸۵۱ میلادی فرایند کلی بسمر با به‌وجود آوردن امکان تولید فولاد در مقیاس تجارتی درهای این صنعت را گشود. فرایند کورهٔ باز از ظرفیت فرایند بسمر در سال ۱۹۰۸ پیشی گرفت و در سال ۱۹۶۰بیش از ۹۰ درصد فولاد جهان را تولید می‌کرد. در حال حاضر انواع کوره‌های اکسیژن و کوره‌های قوس الکتریکی بخش عمدهٔ فولادهای تجارتی را تأمین می‌کنند.

در غالب این فرایند هوا یا اکسیژن از درون فلز مذاب یا از روی آن عبور داده می‌شود تا چندین واکنش پالایش گرمازا صورت گیرد. کربن اکسیده می‌شود و گازهای CO یا CO_2 به‌وجود می‌آیند و سپس از مذاب جدا می‌شوند. عناصر دیگر مانند سیلیسیم و فسفر نیز به روش مشابه اکسید می‌شوند و سبک‌تر از فلز شده در سربارهٔ قابل جمع‌آوری وارد می‌گردند. در همین حال، اکسیژن و دیگر عناصر حاصله از واکنش‌های گازی در فلز مذاب حل می‌شوند و ممکن است موجب بروز اشکال در محصول نهایی گردند.

ملاحظات مربوط به انجماد فولاد: صرف نظر از روش تهیه، فولاد پیش از آنکه به‌صورت محصول نهایی درآید از حالت مایع به حالت جامد تبدیل می‌شود. مایع را می‌توان مستقیم به شکل قطعهٔ ریخته شدهٔ فولادی، یا به شکل مناسبی که برای فرایندهای بعدی قابل استفاده باشد منجمد کرد. در غالب موارد برخی از روش‌های ریخته‌گری پیوسته قطعهٔ خام برای انجام آهنگری و نورد را آماده می‌کنند.

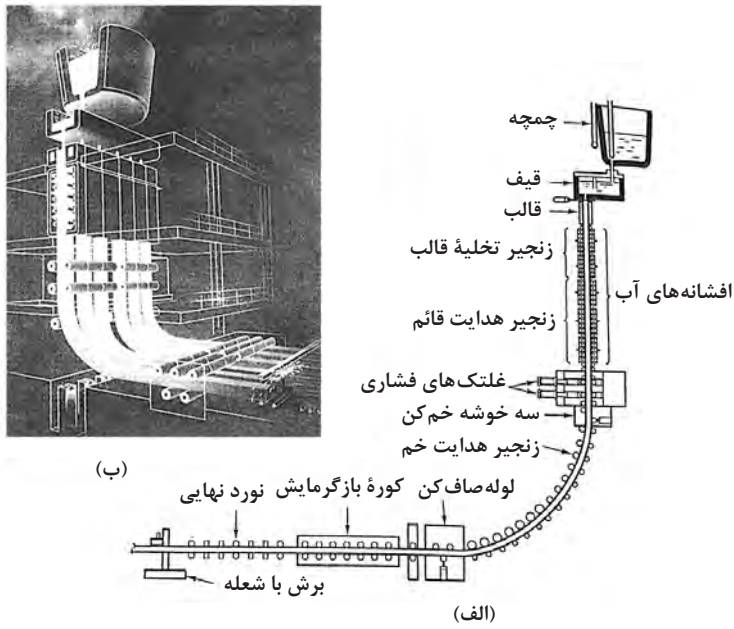
پیش از انجماد فولاد، می‌خواهیم آلودگی‌ها را تا اندازهٔ ممکن کاهش دهیم. فولاد مذاب از کورهٔ ذوب به درون ظروف ویژه‌ای به نام چمچه (پاتیل) ریخته می‌شود. با اینکه در گذشته از این وسیله فقط برای حمل و نقل مذاب و ظرفی برای ریختن استفاده می‌شده است، امروزه چمچه به‌عنوان مکانی برای انجام فرایندهای اضافی روی فولاد درآمده است. اصطلاح متالورژی چمچه‌ای به انواع فرایندهایی گفته می‌شود که برای پالایش نهایی و تنظیم دقیق ترکیب شیمیایی و دمای مذاب طراحی می‌شوند. در اینجا می‌توان مواد آلیاژی را به مذاب افزود، کربن را باز هم بیشتر احیا کرد، گازهای حل شده را کاهش داده یا کاملاً جدا ساخت و اقداماتی برای کنترل اندازهٔ دانه، محدود کردن مقدار آخال‌ها، احیای گوگرد و کنترل شکل هرگونه سولفید موجود در ماده انجام داد. هم زدن، گاززدایی، گرم کردن مجدد، تزریق آلیاژهای پودری و رشته‌های هسته‌دار برای افزایش درجهٔ پاکیزگی و کنترل دقیق‌تر ترکیب شیمیایی و خواص فولاد انجام می‌شوند.

سپس مذاب فراور شده طی فرایند ریختن از زیر، از چمچه به قالب شمش یا واحد ریخته‌گری پیوسته منتقل می‌شود. ریخته‌گری معمولاً از طریق فرایند ریختن از کف مانند شکل زیر انجام می‌گیرد. هنگامی‌که فلز از قعر چمچه خارج می‌شود، سرباره و مواد شناور به عملیات بعدی منتقل نمی‌شود و محصول پاکیزه‌تر است.



شمای چمچهٔ کف‌ریز

فرایندهای ریخته‌گری پیوسته برای غلبه بر مشکلات مربوط به شمش، تشکیل لوله، حبس سرباره و تغییرات ساختاری در طول قطعه به‌کار می‌آیند. یکی از روش‌های متداول ریخته‌گری پیوسته در شکل زیر نشان داده شده است. در این روش، فلز مذاب از چمچه به قیف و سپس به قالب (معمولاً مسی) بدون کف و خنک‌شونده با آب جریان پیدا می‌کند. عمل تبرید به گونه‌ای کنترل می‌شود که قسمت خارجی پیش از آنکه فلز در قالب راه یابد منجمد می‌شود. سپس ماده توسط پاشیدن مستقیم آب خنک می‌گردد تا از انجماد کامل اطمینان حاصل شود قطعهٔ جامد را می‌توان به طول‌های دلخواه برید یا چون قطعه هنوز گرم است، آن را خم کرد، و به‌صورت افقی در کورهٔ کوچک گرمایش مجدد قرار داد و یا مستقیماً نورد کرد.

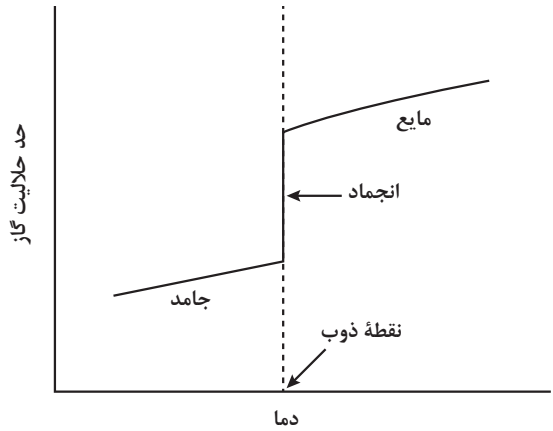


الف) شمای فرایند ریخته‌گری پیوسته برای تولید شمش میله و تختال ب) ریخته‌گری پیوستهٔ قائم چند ردیفه

گاززدایی و اکسیژن‌زدایی

در نتیجهٔ فرایند فولادسازی مقادیر چشمگیری اکسیژن در فلز مذاب حل می‌شود در حین سرد شدن و انجماد بعدی، سطح حلالیت، تا حد زیادی کاهش می‌یابد (شکل صفحه بعد) و اکسیژن و گازهای دیگر از جامد دفع می‌شوند. غالباً اکسیژن دفع شده به کربن اتمی متصل شده و گاز منوکسیدکربن تولید می‌کند. فرار از مایع امکان‌پذیر است، اما معمولاً حباب‌ها به دام می‌افتند و در نتیجه ساختاری متخلخل به وجود

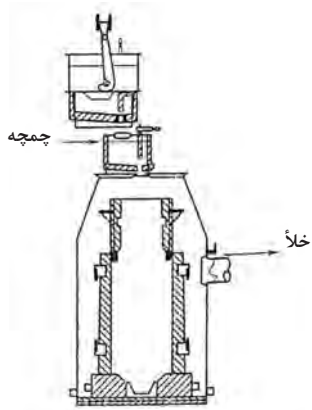
می‌آید، و تخلخل حاصل از وجود گاز یا حباب به شکل منافذ کوچک و مجزا و یا حفره‌های بزرگ است. با وجود اینکه اغلب منافذ داخلی در حین فرایندهای شکل دادن گرم بعدی، به یکدیگر جوش می‌خورند (اگر تغییر شکل کافی باشد)؛ بعضی از فضاها کاملاً پر نمی‌شوند و تعدادی دیگر ممکن است به هم جوش نخورند و ترک‌ها و عیوب داخلی ممکن است در محصول نهایی باقی بمانند.



حلالیت گاز در فلز برحسب تابعی از درجه حرارت که در حین انجماد کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

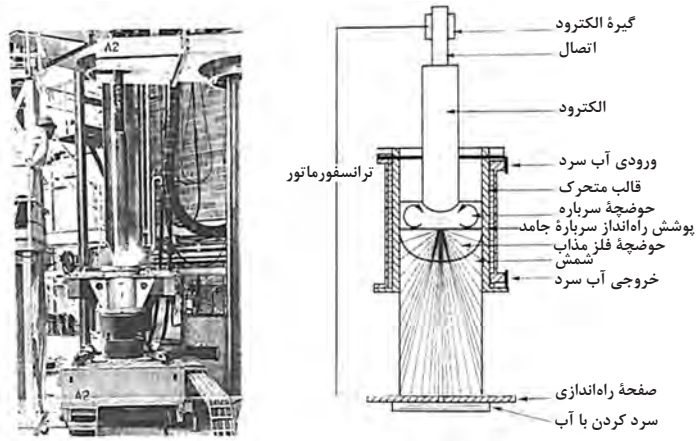
در غالب موارد با اکسیژن‌زدایی پیش از انجماد یا کسب اطمینان از عدم ورود مجدد اکسیژن به درون ماده، از بروز مشکل تخلخل جلوگیری به عمل می‌آید. فلزاتی چون آلومینیم، فرومنگنز، یا فروسیلیسیم در چمچمه به فولاد اضافه می‌شود تا ماده میل ترکیبی بیشتری با اکسیژن نسبت به کربن پیدا کند. اکسیژن دفع شده به بالا با این اکسیژن‌زداها واکنش داده و به اکسیدهای جامد فلزی تبدیل و در سرتاسر ساختار جامد پخش می‌شود.

درحالی‌که افزودن اکسیژن‌زداها به نحو مؤثری اکسیژن را جذب می‌کنند، وجود مقدار ناچیزی از گازهای حل شدهٔ دیگر (مانند هیدروژن و نیتروژن) می‌تواند آثار زیان‌آوری بر عملکرد فولادها داشته باشد. این امر به ویژه در مورد فولادهای آلیاژی حایز اهمیت فراوان است، زیرا چندین عنصر اصلی آلیاژی مانند وانادیم و کرم، میل به حلالیت این گازها را بالا می‌برند. فرایندهای گاززدایی متنوعی برای کاهش همگی گازهای حل شده ابداع شده‌اند. در شکل ۱۸ یک روش گاززدایی در خلأ برای تولید شمش‌های گاززدایی شده نشان داده شده است. قالب شمش در محفظهٔ خلأ قرار می‌گیرد و جریان فلز در حین ریختن از خلأ عبور می‌کند. با ایجاد سطح آزاد زیاد در حین ریختن، خلأ قادر به خارج کردن مقدار زیادی از گازهای حل شده است.



روش گاززدایی فولاد به‌وسیله ریختن از طریق خلأ

به‌عنوان جانشین برای گاززدایی در خلأ از فرایند ذوب مجدد الکترود منصرف‌شدنی استفاده می‌شود. در اینجا الکترود فلزی از پیش جامد شده جایگزین چمچمهٔ فلز گداخته می‌شود. هنگامی‌که این الکترود دوباره با قوس الکتریکی ذوب می‌گردد، قطرات ذوب شده از داخل خلأ می‌گذرند و ایجاد این مساحت فوق‌العاده زیاد، راه مؤثری برای دفع گاز است. هنگامی‌که عمل ذوب با قوس الکتریکی صورت گیرد، فرایند ذوب مجدد به‌وسیلهٔ قوس در خلأ (VAR) نامیده می‌شود و اگر حرارت القایی جانشین قوس الکتریکی شود، فرایند ذوب در خلأ به کمک القا (VIM) خوانده می‌شود. هر دو فرایند در دفع گازهای حل شده بسیار مؤثرند اما در این فرایندها ناخالصی‌های غیرفلزی دفع نمی‌شوند.
در صورت به‌کارگیری فرایند ذوب مجدد به کمک سرباره (ESR) فلز کاملاً تمیز و عاری از گاز خواهد بود. (شکل زیر)



(الف) (ب)

الف) تولید شمش به کمک فرایند ذوب مجدد به کمک سرباره، ب) نمایش شمایی از این فرایند که الکترودهای شروع‌کننده، قوس ذوب و شمش انجماد مجدد یافته را نشان می‌دهد.

الکترود جامد توسط جریان برق مجدداً ذوب و ریخته می‌شود، درحالی‌که سطح فلز مذاب به‌وسیلهٔ پوشش سربارهٔ مذاب پوشیده شده است، ناخالصی‌های غیرفلزی شناور مانده و جمع‌آوری می‌شوند و از قطعهٔ جامد با کیفیت بسیار بالا جدا می‌گردند. از آنجا که مادهٔ مذاب زیر پوشش سربارهٔ مذاب قرار دارد خلأ مورد نیاز نیست و انجماد تدریجی امکان فرار کردن گاز دفع شده را فراهم می‌سازد. این فرایند مشابه فرایند جوشکاری الکتریکی سرباره در مقیاس بزرگی است.

فولاد کربنی ساده

فولاد تجارتی از نظر تئوری آلیاژی از آهن و کربن است، اما در واقع حاوی منگنز، فسفر، گوگرد و سیلیسیم به میزان چشمگیر و قابل اندازه‌گیری است. هنگامی‌که چهار عنصر یاد شده به میزان معمولی در فولاد موجود باشند و هیچ حداقل مقداری برای عناصر دیگر مشخص نشده است فولاد کربنی ساده نامیده می‌شود. استحکام این فولادها در درجهٔ اول تابع مقدار کربن است و با افزایش میزان کربن استحکام افزایش می‌یابد (جدول ۱۸). متأسفانه نرمی، چقرمگی و قابلیت جوشکاری فولاد کربنی ساده با افزایش محتوای کربن کاهش می‌یابد و قابلیت سخت‌شوندگی آن نیز بسیار پایین است. به علاوه فولادهای کربنی ساده در دماهای بالا و پایین دارای خواص نامطلوب (به ترتیب از دست دادن استحکام و شکنندگی) هستند و در بیشتر محیط‌ها خوردگی در آنها رخ می‌دهد.

جدول ۱۸ــ تأثیر کربن بر استحکام فولادهای کربنی سادهٔ تابکاری شده

نوع فولاد	محتوای کربن (درصد)	مگاپاسکال	حداقل استحکام کششی (هزار پوند بر اینچ مربع)
۱۰۲۰	۰/۲	۲۱	۶۰
۱۰۳۰	۰/۳	۴۴۸	۶۵
۱۰۴۰	۰/۴	۵۱۷	۷۵
۱۰۵۰	۰/۵	۶۲	۹۰

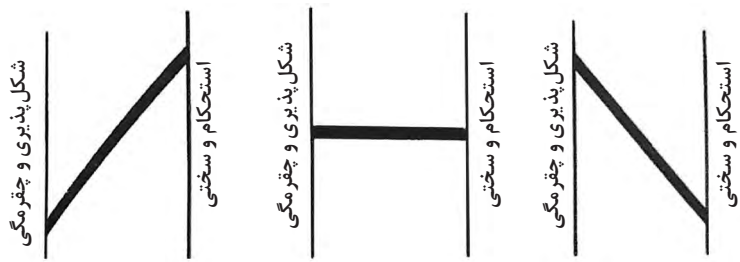
ارقام از مشخصه A۳۷۲ مؤسسهٔ ASTM

به‌طور کلی فولادهای کربنی ساده بر اساس مقدار کربنشان به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱ فولادهای کم‌کربن که حاوی کمتر از ۰/۲ درصد کربن هستند و دارای قابلیت شکل‌پذیری (با کار سرد می‌توان استحکام‌شان را بالا برد)، و جوشکاری مناسب هستند. ساختار آنها غالباً فریتی و پرلیتیست و معمولاً پس از نوعی فرایند شکل‌دهی گرم یا سرد استفاده می‌شوند.

۲ فولادهای میان کربن حاوی ۰/۲ تا ۰/۵ درصد کربن هستند و در صورت تبرید سریع در آب، یا آب نمک به شرط آنکه ابعاد مقطع کوچک باشد به شکل مارتنزیتی یا باینیتی درمی‌آیند. مناسب‌ترین تعادل خواص در این سطح از کربن حاصل می‌شود و ترکیب مقاومت زیاد در مقابل خستگی و چقرمگی مادهٔ کم کربن همراه با استحکام و سختی فولادهایی با محتوای کربن بالاتر به نحو مطلوبی در این دسته فولادها وجود دارد. این نوع فولاد در بازار بسیار متداول است و کاربردهای مکانیکی فراوان پیدا کرده است.

۳ فولادهای پرکربن حاوی بیش از ۰/۵ درصد کربن هستند. چقرمگی و شکل‌پذیری این نوع فولادها بسیارپایین ولی مقاومت در برابر سایش‌شان بسیار بالاست این نوع فولادها در اثر تبرید سریع به مارتنزیت تبدیل می‌شوند، اما قابلیت سخت‌شوندگی‌شان همچنان پایین است در شرایط حدی، ترک تبرید مسئله‌ساز است. در شکل زیر خواص متعارف فولادهای کم‌کربن، میان‌کربن و پرکربن به‌صورت تعادل خواص‌شان آمده است.



الف) فولاد کم‌کربن ب) فولاد میان‌کربن پ) فولاد پرکربن

مقایسهٔ فولادهای کم‌کربن، میان‌کربن و پرکربن بر مبنای تعادل خواصشان: الف) فولادهای کم‌کربن شکل‌پذیری مقاومت به شکست عالی دارند، اما استحکامشان پایین است؛ ب) فولادهای میان‌کربن خواص متعادلی دارند؛ پ) فولادهای پرکربن استحکام و سختی بالا و در عوض شکل‌پذیری و چقرمگی پایین دارند.

در مقایسه با دیگر مواد مهندسی، فولادهای کربنی استحکام و سخت‌یابی بالا همراه با چقرمگی قابل قبول دارند. متأسفانه این فولادها زنگ می‌زنند و معمولاً به نوعی سطح محافظ مانند رنگ، روی اندودکاری یا نوع دیگری از پوشش نیاز دارند. فولادهای کربنی ساده، ارزان‌ترین نوع فولاد هستند و در بسیاری از کاربردها می‌توانند به‌عنوان گزینهٔ اول مطرح باشند. غالبا محدودیت‌هایی در کاربردشان وجود دارد. در مواردی که به ماده مرغوب‌تری نیاز است، کیفیت فولاد را با افزودن یک یا چند عنصر آلیاژی بالا می‌برند.

جلسه نهم موضوع: مفهوم فولاد آلیاژی

هدف: توصیف فولاد آلیاژی و کاربردهای آن

مفاهیم

عنصر آلیاژی به عنصری گویند که به عمد و برای افزایش خواص مکانیکی یا شیمیایی فلز به آن اضافه می‌شود. فولادهای آلیاژی دارای کاربردهای مختلفی می‌باشند که عنصر آلیاژی تعیین‌کننده نوع کاربرد خواهد بود.

روش تدریس

در جدول شماره ۸ کتاب درسی عناصر آلیاژی متداول در فولاد فهرست شده است. اعداد بیان شده در جدول مرز آلیاژی بودن یا نبودن هر عنصر آلیاژی را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال اگر میزان کرم یک فولاد ۰/۱۵٪ وزنی باشد، این مقدار کرم عنصر آلیاژی نیست و فولاد به واسطه این میزان کرم آلیاژ محسوب نمی‌شود. ولی اگر مقدار کرم مثلاً به ۰/۷٪ وزنی برسد فولاد آلیاژی کرم‌دار محسوب می‌شود.

این مسئله را یادآور شوید که عناصر در مقادیر ناچیز هم بر فولاد اثرگذار هستند. لیکن اگر اثر آنها سبب شود کاربرد فولاد تغییر یابد عنصر آلیاژی محسوب می‌شوند. عناصر آلیاژی اگر کمتر از مقادیر ذکر شده در جدول باشد به‌عنوان عنصر همراه شناخته می‌شوند. در جدول ۷ کتاب درسی اثر آلیاژی در فولادها بررسی شده است. در جدول ۱۹ کاربردها و تأثیرات عناصر آلیاژی در فولادها برای استفاده در کلاس بیان شده است.

جدول ۱۹ــ کاربرد و تأثیر عناصر آلیاژی در فولادها

عنصر	تأثیر بر خواص فولاد	کاربرد
Mn	افزایش استحکام و چقرمگی به دلیل ریزدانه کردن فولاد جلوگیری از تَرک گرم به واسطه جذب گوگرد افزایش سختی‌پذیری فولاد	اصلی‌ترین عنصر افزاینده استحکام در فولادهای ساختمانی غیرآلیاژی است. مثلاً یکی از تفاوت‌های St۳۷ با St۵۲ در مقدار بالاتر منگنز در St۵۲ می‌باشد.
Si و Cu	افزایش مقاومت به اکسیداسیون در فولادهای کم کربن و ساختمانی افزایش فریت در فولادهای پرکربن (فقط برای سیلیسیم)	در کاربردهای فولاد در دمای بالا در جایی که اقتصاد اجازه استفاده از فولادهای پر آلیاژی را نمی‌دهد. معمولاً به فولادهای ساده کربنی مقداری سیلیسیم یا مس اضافه می‌کنند تا در دمای بالا که رنگ یا پوشش سطح آسیب می‌بیند و فولاد اجبارا بدون پوشش استفاده می‌شود سرعت اکسید شدن سطح فولاد آهسته شود. مانند اگزوز توربین‌ها ـ داکت‌های انتقال غبار ـ لوله‌های انتقال غبار

Cr	افزایش مقاومت به خوردگی بالای ۱۲ درصد افزایش مقاومت به اکسیداسیون در فولادهای کم کربن و ساختمانی افزایش استحکام در فولادهای ماشین‌سازی به دلیل ایجاد کاربیدهای ظریف افزایش شدید سختی به دلیل تشکیل کاربیدهای درشت در فولادهای ابزار	فولادهای زنگ نزن ـ بویلرها ـ سوپر هیترها ـ مبدل‌های حرارتی دما بالا ـ برج‌های تقطیر ـ تجهیزات صنایع غذایی و دارویی
Ni	کمک به ریز دانگی فولاد و افزایش چقرمگی و استحکام بهبود مقاومت به خوردگی فولاد	در فولادهای حمال بار مانند شفت‌های انتقال قدرت یا چرخ دنده‌های عظیم و نظایر آن به‌عنوان عنصر آلیاژی فولاد استفاده می‌شود. در فولادهای زنگ نزن به‌عنوان عنصر افزاینده مقاومت به خوردگی به کروم اضافه می‌شود. صنایع شیمیایی و دارویی عمده‌ترین مصرف‌کنندگان فولادهای زنگ‌نزن نیکل‌دار هستند.
Mo	افزایش چقرمگی با ریز کردن دانه افزایش مقاومت به خزش با ایجاد کاربیدهای دیرگداز افزایش مقاومت به خوردگی حفره‌ای در حضور یون کلر	کلیه فولادهای فوق مستحکم و چقرمه دارای مولیبدن نیز می‌باشند. مانند جنگ افزارهای نظامی و شفت‌های انتقال قدرت عظیم در فولادهای دما بالا ۴۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان تأمین‌کننده مقاومت به خزش مصرف می‌شوند. در فولادهای زنگ‌نزن در آب شور یا آب تصفیه شده مانند آب شهری کار می‌کنند و آب کلردار بر روی سطح باقی می‌ماند و مصرف می‌شود. مانند سینک ظرفشویی ـ لوله‌ها و مخازن صنایع غذایی ـ پمپ‌های آب دریا
V	ایجاد ریزدانگی و افزایش چقرمگی ایجاد مقاومت به خزش	مشابه Mo
W	ایجاد کاربیدهای دیرگداز WC و W_2C	قطعات سایش دما بالا مانند مته‌ها و تیغه‌ها که برای برش و سوراخ‌کاری فلزات استفاده می‌شوند و حین کار دمایشان بالا می‌رود
S	به دلیل ایجاد آخال MnS ساختار فولاد به دلیل غیریکنواخت کردن ساختار میکروسکوپی طول براده‌های فلزی کاهش می‌یابد.	زمانی که به اجبار برای ایجاد رزوه از فرایند رزوه‌تراشی استفاده می‌شود نیاز است براده‌ها ظریف شوند تا آسیبی به سطح پیچ وارد نشود.

دانش افزایی

فولادهای آلیاژی

تعیین مرز بین فولاد کربنی ساده و فولاد آلیاژی تا اندازه‌ای به دلخواه است. هر دو نوع حاوی کربن، منگنز و غالباً سیلیسیم هستند. برخی اوقات مس و بُرُن نیز به این دو گروه اضافه می‌شود. فولادهایی که حاوی بیش از ۱/۶۵درصد منگنز، ۰/۶ درصد سیلیسیم، یا ۰/۶ درصد مس هستند، معمولاً فولادهای آلیاژی نامیده می‌شوند. به علاوه اگر مقدار حداقل یا مشخصی از دیگر عناصر آلیاژی ذکر شده باشد، فولاد آلیاژیست. متداول‌ترین عناصر آلیاژی عبارت‌اند از کرم، نیکل، مولیبدن، وانادیم، تنگستن، کبالت، بُرُن، مس و همچنین منگنز، فسفر، سیلیسیم و گوگرد به میزان بیشتر از مقادیر عادی. اگر مجموع مواد آلیاژی کمتر از ۸ درصد باشد فولاد کم آلیاژ خوانده می‌شود. فولادهای حاوی بیش از ۸ درصد عناصر آلیاژی، فولادهای پر آلیاژ هستند.

غالباً عناصر آلیاژی به مقدار کم (کمتر از ۵ درصد) برای بالا بردن استحکام یا قابلیت سخت‌شوندگی، یا در مقیاس‌های بیشتر (غالباً تا ۲۰ درصد) به منظور ایجاد خواص ویژه‌ای چون مقاومت در برابر خوردگی یا پایداری در دماهای بالا یا پایین در فولاد به آن اضافه می‌شوند.

برای از بین بردن اکسیژن محلول در فولاد می‌توان عناصر خاصی را هنگام فرایند فولادسازی به آن اضافه کرد. معمولاً از عناصری مانند منگنز، سیلیسیم و آلومینیم برای این منظور استفاده می‌شود. منگنز، سیلیسیم، نیکل و مس، با تشکیل محلول‌های جامد در فریت موجب افزایش استحکام فولاد می‌شوند. کرم، وانادیم، مولیبدن، تنگستن و دیگر عناصر با تشکیل کاربیدهای فاز دوم مجزا استحکام را بالا می‌برند. نیکل و مس به مقدار کم موجب افزایش مقاومت در برابر خوردگی می‌شوند. نیکل چقرمگی و مقاومت به ضربه را افزایش می‌دهد و مولیبدن به جلوگیری از ترد شدن کمک می‌کند. زیرکنیم، سریم و کلسیم نیز از طریق کنترل شکل آخال‌ها، چقرمگی را افزایش می‌دهند. قابلیت ماشین‌کاری با تشکیل سولفیدهای منگنز یا افزودن سرب، بیسموت، سلنیم یا تلوریم بالا می‌رود. علاوه بر اینها با افزودن مواد دیگر می‌توان اندازهٔ دانه‌های فریت یا آستنیت را کنترل کرد.

انتخاب یک فولاد آلیاژی هنوز با مشخص کردن مقدار کربن مناسب آغاز می‌شود. تأثیرکربن روی استحکام فولادهای آلیاژی تبریدی و بازپخت شده در جدول۲۰ مشاهده می‌شود. در مجموع، فولاد ۴۱۳۰ در حدود ۱/۲ درصد عناصر آلیاژی دارد، در حالی که فولادهای ۴۳۴۰ و ۸۹۳۰ به ترتیب حاوی ۳ درصد و ۱/۳ درصد عناصر آلیاژی‌هستند. ولی حداقل استحکام کششی هر سه به یک اندازه است.اساساً استحکام و قابلیت سخت‌شوندگی به مقدار کربن وابسته‌اند.

جدول ۲۰ــ اثر کربن بر استحکام فولادهای آلیاژی تبریدی و بازپخت شده

نوع فولاد	میزان کربن (درصد)	حداکثر استحکام کششی	
		ksi	MPa
۴۱۳۰	۰/۳	۱۵۰	۱۰۳۰
۴۳۳۰	۰/۳	۱۵۰	۱۰۳۰
۸۶۳۰	۰/۳	۱۵۰	۱۰۳۰
۴۱۴۰	۰/۴	۱۸۰	۱۲۴۱
۴۳۴۰	۰/۴	۱۸۰	۱۲۴۱

نقش اصلی عناصر آلیاژی در فولادهای آلیاژی ساختمانی بالا بردن قابلیت سخت‌شوندگی آنهاست اما اثرات دیگری مانند بهبود چقرمگی یا قابلیت ماشین‌کاری امکان‌پذیر است. متداول‌ترین عناصر مورد استفاده به ترتیب کاهش میزان تأثیرشان منگنز، مولیبدن، کرم، سیلیسیم و نیکل هستند. برن عامل فوق‌العاده قوی افزایش قابلیت سخت‌شوندگیست. افزودن فقط چند هزارم درصد این عنصر برای ایجاد سخت‌شوندگی چشمگیر در فولاد کربنی کافیست، ولی تأثیر آن با افزایش مقدار کربن رو به کاهش می‌گذارد. از آنجا که افزودن برن باعث تشکیل کاربید یا تقویت فریت نمی‌شود، استفاده از آن به‌جای دیگر عناصر افزایش‌دهندهٔ قابلیت سخت‌شوندگی، برای بهبود قابلیت ماشینکاری و ویژگی‌های شکل دادن سرد ارجحیت دارد.

افزودن وانادیم به مقدار کم نیز بسیار مؤثر است، اما شدت تأثیرش در مقادیر بیشتر کاهش می‌یابد.

در جدول ۲۱ خلاصه‌ای از اثرات اساسی عناصر آلیاژی متداول روی فولاد ارائه شده است. دانش عملی گنجانده شده در این جدول به مهندس طراح کمک می‌نماید تا آلیاژی با ویژگی‌های لازم را برگزیند. البته عناصر آلیاژی به‌صورت مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرند، بنابراین تعداد انواع فولادهای آلیاژی تجارتی بسیار زیاد است. خوشبختانه برای ساده‌سازی این مشکل، سیستم دسته‌بندی ویژه‌ای ارائه شده و مقبولیت مناسبی در شاخه‌های گوناگون صنعت پیدا کرده است.

جدول۲۱ـ اثرات مهم عناصر آلیاژی روی فولاد

عنصر	درصد	ویژگی اصلی
آلومینیم	۰/۹۵ ـ۱/۳۰	عناصر آلیاژی در فولادهای نیتریدشونده
بُرُن	۰/۰۰۱ ـ ۰/۰۰۳	عامل مهم در بالا بردن قابلیت سخت‌شوندگی
بیسموت	ـ	بهبود قابلیت ماشین‌کاری
تنگستن	ـ	سختی در دمای زیاد
تیتانیم	ـ	تثبیت‌کنندهٔ کربن در ذرات خنثی
		کاهش سختی مارتنزیتی در فولادهای کرم‌دار
سرب	ـ	بهبود قابلیت ماشین‌کاری
سیلیسیم	۰/۲ـ۰/۷	افزایندهٔ استحکام
	۲	فولاد فنر
	درصدهای زیاد	بهبود خواص مغناطیسی
کرم	۰/۵ ـ۲	افزاینده قابلیت سخت‌شوندگی
	۴ـ۱۸	مقاوم در برابر خوردگی
گوگرد	۰/۰۸ ـ ۰/۱۵	خواص خوش‌تراشی
مس	۰/۱ ـ۰/۴	مقاوم در برابر خوردگی
منگنز	۰/۲۵ ـ۰/۴۰	با گوگرد ترکیب شده و از تردی فلز جلوگیری می‌کند.
	۱	با کاهش نقاط تبدیل و کند کردن فرایند تبدیل موجب افزایش سخت‌شوندگی می‌شود.
مولیبدن	۰/۲ـ۵	کاربیدهای پایدار، از رشد دانه جلوگیری می‌کند.
نیکل	۲ ـ ۵	چقرمه‌کننده
	۱۲ـ۲۰	مقاوم در برابر خوردگی
وانادیم	۰/۱۵	کاربیدهای پایدار، افزایندهٔ استحکام بدون کاهش نرمی، کمک به ایجاد ساختار ریزدانه

سیستم دسته‌بندی SAE ـ ASI

متداول‌ترین روش دسته‌بندی فولادهای آلیاژی سیستم تقسیم‌بندی AISI است. این سیستم که در آن فولادها بر اساس ساختار و ترکیب شیمیایی تقسیم می‌شوند، نخستین بار توسط انجمن مهندسان اتومبیل (SAE) برای استاندارد نمودن فولادهای مورد استفاده در صنعت اتومبیل‌سازی، مطرح شد. در سال‌های بعد انستیتو آهن و فولاد آمریکا (AISI) سیستم را تکمیل کرد تا در سیستم جهانی شماره‌گذاری برای شمول تمام مواد مهندسی قرار گیرد. فولادهای کربنی ساده و آلیاژی هر یک توسط یک عدد چهار رقمی مشخص می‌شوند. نخستین رقم نشانگر عنصر آلیاژی و دومین رقم نشانگر زیرگروه سیستم اصلی آلیاژیست. معنی دو رقم اول به‌صورت خلاصه شده و فهرست‌وار در جدول ۲۲ آمده است. دو رقم آخر بیانگر مقدار تقریبی کربن برحسب صدم درصد است. مثلاً فولاد ۱۰۸۰ فولاد کربنی سادهٔ حاوی ۰/۸ درصد کربن است و یا فولاد ۴۳۴۰ فولاد آلیاژی Cr و Mo دارای ۰/۴ درصد کربن است. به دلیل دسته‌بندی رقمی، این دو فولاد به ترتیب ده ـ هشتاد و چهل و سه ـ چهل خوانده می‌شوند.

حروف نیز می‌توانند در این نمایش وجود داشته باشند. حرف پیشوند مشخص‌کنندهٔ نوع فرایند تولید فولاد، مثلاً کورهٔ الکتریکی (E) است. حرف B بین رقم دوم و سوم بدین معناست که فلز پایه توسط برن تکمیل شده است. حرف L در این محل به معنای بهبود قابلیت ماشین‌کاری فولاد با افزودن سرب است.

فولادهای AISI سری H نیز توسط حرف پسوند H به این دسته‌بندی افزوده می‌شوند. این دسته در مواردی که قابلیت سخت‌شوندگی از درجهٔ اول اهمیت برخوردار می‌باشد، به‌کار می‌آیند. در این مورد خواص شیمیایی کمتر مورد تأکید هستند اما فولاد باید از استاندارد سخت‌شوندگی پیروی کند. برای این نوع خاص فولاد مقادیر سختی در فواصل مشخص از سر قطعه در آزمایش جمینی تبرید شده باید در محدودهٔ پیش‌بینی شده قرار گیرد.

دیگر سیستم‌های دسته‌بندی مانند سیستم انجمن آزمایش و مواد آمریکا (ASTM) و سیستم فدرال ایالات متحده (MIL) بر کاربردهای ویژه پایه‌ریزی شده‌اند. معیارهای استاندارد بیشتر براساس ویژگی‌های فیزیکی ـ مکانیکی هستند، تا ترکیب شیمیایی فلز. غالباً فولادهای کم‌کربن سازه‌ای توسط استاندارد ASTM مشخص می‌شوند.

جدول۲۲ـ نام‌گذاری استاندارد فولاد طبق قرارداد AISI ـ SAE

شماره AISI	نوع	درصد عناصر آلیاژی					
		منگنز	نیکل	کرم	مولیبدن	وانادیم	عناصر دیگر
۱XXX	کربن‌دار						
۱۰XX	کربن‌دار ساده						
۱۱XX	خوش‌تراش						
۱۲XX	خوش‌تراش						
۱۵XX	پرمنگنز						
۱۳XX	پرمنگنز	۱/۶ـ۱/۹					
۲XXX	فولادهای نیکل‌دار		۳/۵ـ۵/۰				
۳XXX	نیکل ـ کرم		۱/۰ـ۳/۵	۰/۵ـ۱/۷۵			
۴XXX	مولیبدن						
۴۰XX	Mo			۰/۱۵ـ۰/۳۰			
۴۱XX	Mo,Cr			۱/۶۵ ـ۲/۰۰	۰/۴ـ۰/۹	۰/۲ـ۰/۳	
۴۳XX	Mo,Cr,Ni	۱/۶۵ـ۲/۰۰	۰/۴ـ۰/۹	۰/۲ـ۰/۳			
۴۴XX	Mo	ـ	۰/۳۵ ـ۰/۶				
۴۶XX	Mo,Ni (کم)			۰/۷۰ـ۲/۰۰		۰/۱۵ـ۰/۳	
۴۷XX	Mo,Cr,Ni	۰/۹۰ـ۱/۲۰	۰/۳۵ـ۰/۵۵	۰/۱۵ـ۰/۳			
۴۸XX	Mo,Ni (زیاد)	۳/۲۵ـ۳/۷۵		۰/۲ـ۰/۳			
۵XXX	کرم						
۵۰XX			۰/۲۰ـ۰/۶۰				
۵۱XX			۰/۷۰ـ۱/۱۵				
۶XXX	کرم ـ وانادیم						
۶۱XXX			۰/۵۰ـ۱/۱۰		۰/۱۰ـ۰/۱۵		
۸XXX	Ni,Cr,Mo						
۸۱XXX			۰/۲۰ـ۰/۴۰	۰/۳۰ـ۰/۵۵	۰/۰۸ ـ۰/۱۵		
۸۶XX		۰/۴۰ـ۰/۶۰	۰/۱۵ـ۰/۲۵				
۸۷XX		۰/۴۰ـ۰/۷۰	۰/۴۰ـ۰/۹۰	۰/۲۰ـ۰/۳۰			
۸۸XX		۰/۴۰ـ۰/۷۰	۰/۴۰ـ۰/۶۰	۰/۳۰ـ۰/۴۰			
۹XXX	عناصر دیگر						
۹۲XX	پرسیلیسیم						۱/۲۰ـ۲/۲۰ سیلیسیم
۹۳XX	Ni,Cr,Mo	۳/۰۰ـ۳/۵۰	۱/۰۰ـ۱/۴۰	۰/۰۸ ـ۰/۱۵			
۹۴XX	Ni,Cr,Mo	۰/۳۰ـ۰/۶۰	۰/۳۰ـ۰/۵۰	۰/۰۸ ـ۰/۱۵			

انتخاب فولادهای آلیاژی

همان‌گونه که در بحث‌های گذشته مشاهده شد، دو یا چند عنصر آلیاژی می‌توانند اثرات مشابهی در فولاد به‌وجود آورند. بنابراین ممکن است فولادهایی با ترکیب شیمیایی کاملاً متفاوت دارای خواص مکانیکی یکسان باشند. اهمیت این مسئله هنگامی بیشتر مشخص می‌شود که توجه شود که عناصر آلیاژی ممکن است بسیار گران‌قیمت بوده یا به دلیل محدودیت‌های اضطراری و یا سیاسی به سادگی در دسترس نباشند، در غالب موارد مشخصات را بالاتر از حد مورد نیاز تعیین می‌کنند تا به فرض وقوع بی‌دقتی در تولید و عملیات حرارتی، موفقیت نهایی تضمین شود. البته انتخاب درست برای هر کار ارزان‌ترین فولادیست که بتواند طی عملیات یکنواخت و قابل تکرار تولید خواص مطلوب را ارائه دهد. غالباً تحصیل خواص مطلوب مستلزم بهره‌گیری از امتیازات کلیدی عناصر آلیاژیست.

برای انتخاب فولادهای آلیاژی مناسب، توجه به کاربرد و نحوهٔ تولید حایز اهمیت است. برای افزایش استحکام یک محصول مشخص می‌توان مقدار کربن آن را افزایش داد. در کاربردهای متفاوت شامل مونتاژ یا جوش‌کاری، بهترین راه، پایین نگه داشتن میزان کربن و استفاده از مقدار متعادل عناصر آلیاژی برای حصول استحکام مطلوب است. تعیین بهترین ریزساختار برای تأمین خواص لازم استحکام را می‌توان از طریق آلیاژسازی، کارسرد، عملیات حرارتی و همچنین ترکیب آنها به‌دست آورد، تعیین روش تولید قطعه (ریخته‌گری، ماشین‌کاری، شکل‌دهی فلز و غیره...)، و در نهایت انتخاب فولادی با بهترین محتوای کربن و خواص سخت‌شوندگی برای رسیدن به هدف مطلوب است.

فولادهای ساختمانی کم آلیاژ محکم

فولادهای آلیاژی به دو دستهٔ عمومی تقسیم می‌شوند: ۱ـ فولادهای آلیاژی سازه‌ای که خواص مطلوب آنها به نحوهٔ عملیات حرارتی بستگی دارد و آلیاژها معمولاً با توجه به تأثیرشان بر روی قابلیت سخت‌شوندگی انتخاب می‌شوند و ۲ـ فولادهای کم آلیاژ محکم (HSLA) یا نوع بسیار کم آلیاژ که خواص مکانیکی مطلوب در آنها در وضعیت عادی یا نورد تابع ترکیب شیمیایی آنهاست.

دامنهٔ خواص مورد نیاز برای این کاربرد استحکام تسلیم بالا، قابلیت جوشکاری خوب و مقاومت به خوردگی قابل قبول است. البته شکل‌پذیری و قابلیت سخت شدنشان محدود است. افزایش استحکام همراه با مقاومت در برابر تشکیل مارتنزیت در ناحیهٔ جوش، نتیجهٔ کنترل مقدار کربن، منگنز و سیلیسیم و افزایش مقدار کمی وانادیم، نیوبیم و تیتانیم یا دیگر عناصر آلیاژیست. غالباً حدود ۰/۲ درصد مس برای بهبود مقاومت در برابر خوردگی به فولاد افزوده می‌شوند.

فولادهای ساختمانی کم‌آلیاژ محکم به خاطر استحکام تسلیم بالایشان ۲۰ تا ۳۰

درصد صرفه‌جویی در وزن را بدون هرگونه کاهش استحکام یا ایمنی به وجود می‌آورند. فولادهای ساختمانی کم آلیاژ محکم به‌صورت نورد شده یا جوش خورده هم‌اکنون در خودروها، قطارها، پل‌ها و ساختمان‌ها به‌کار می‌روند. به خاطر کم آلیاژ بودن و حجم وسیع کاربردشان معمولاً قیمت آنها فقط کمی بیشتر از فولادهای معمول کربنی ساده است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی انواع متداول‌تر این فولادها در جدول ۲۳ آمده است.

جدول۲۳ـ ترکیبات و خواص استحکامی متعارف چند گروه فولاد ساختمانی کم آلیاژ با استحکام بالا

گروه	ترکیب شیمیایی، درصد				تسلیم		کشش		ازدیاد طول نمونهٔ ۲
	C	Mn	Cb	V	MPa	ksi	MPa	ksi	اینچی (٪)
کلسیم یا وانادیم	۰/۲۰	۱/۲۵	۰/۳۰	۰/۰۰۱	۳۷۹	۵۵	۴۸۳	۷۰	۲۰
وانادیم ـ کم منگنز	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۱۰	۰/۰۲	۲۷۶	۴۰	۴۱۴	۶۰	۳۵
منگنز ـ مس	۰/۲۵	۱/۲۰	۰/۳۰		۳۴۵	۵۰	۵۱۷	۷۵	۲۰
منگنز ـ وانادیم ـ مس	۰/۲۲	۱/۲۵	۰/۳۰	۰/۰۲	۳۴۵	۵۰	۴۸۳	۷۰	۲۲

همهٔ این آلیاژها حاوی ۰/۰۴ درصد فسفر، ۰/۰۵ درصد گوگرد و ۰/۲۰ درصد مس هستند.

فولادهای بسیار کم آلیاژ در محصولات فراورش شده

هم از لحاظ عملکرد و هم از نظر قیمت فولادهای بسیار کم آلیاژ (ریز آلیاژ) جایگاهی بین فولادهای کربنی ساده و فولادهای آلیاژی دارند و به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان جایگزین فولادهای عملیات حرارتی شده در تولید قطعات کوچک و اندازهٔ متوسط استفاده می‌شوند. این فولادها حاوی مقادیر کمی (۰/۰۵تا ۰/۱۵ درصد) عناصر آلیاژی شامل نیوبیم، وانادیم، تیتانیم، زیرکنیم، برن، عناصر نادر زمینی، یا مخلوطی از این مواد هستند. اثر عمدهٔ عناصر آلیاژی پالایش دانه‌ها و یا ایجاد استحکام رسوبیست. استحکام تسلیم بین ۵۰۰ تا ۷۵۰ مگاپاسکال (۷۰ تا ۱۱۰ هزار پوند بر اینچ مربع) بدون عملیات حرارتی به‌دست می‌آید. با کاهش میزان کربن قابلیت جوش‌پذیری حفظ می‌شود و حتی بهبود نیز می‌یابد و هدف از تولید این ماده در اصل کسب بیشترین استحکام یا کمترین درصد کربن، همراه با بهترین درجهٔ جوش‌پذیری، قابلیت سخت‌شوندگی و شکل‌پذیریست. در مقایسه با فولادهای تبریدی و بازپخت شده، عموماً شکل‌پذیری و چقرمگی‌شان پایین‌تر است.

فولادهای بسیار کم آلیاژ شکل یافتهٔ سرد نیاز به‌کار سرد کمتری برای کسب استحکام مطلوب دارند. و به همین دلیل شکل‌پذیری (نرمی) جامانده در آنها بیشتر است. قطعاتی که طی فرایندهای شکل دادن گرم مانند آهنگری تولید می‌شوند. معمولاً در حالت تبرید در هوا قابل استفاده‌اند. درصورتی‌که دما و آهنگ سرد شدنشان به‌خوبی کنترل شود خواص مکانیکی آنها مشابه با مواد تبرید و باز پخت شده است به دلیل سختی یکنواخت‌ترشان و این واقعیت که قابلیت ماشینکاری ساختار فریتی ـ پرلیتی آنها بسیار بهتر از ساختار فریت ـ کاربیدی فولادهای تبرید و باز پخت شده است غالبا قابلیت ماشین‌کاری بهبود می‌یابد. عمر خستگی و مقاومت به سایش نیز از مواد مشابه عملیات حرارتی شده بهتر است.

فولادهای بسیار کم آلیاژ در مواردی خواص کافی دارند. از لحاظ هزینه‌ها غالباً مقرون به صرفه‌اند. صرفه‌جویی در انرژی مصرفی قابل توجه است. راست کردن یا تنش‌زدایی پس از انجام عملیات حرارتی ضروری نیست و مشکل ترک برداشتن در اثر تبرید حذف می‌شود. به دلیل افزایش استحکام ماده، ابعاد و وزن قطعهٔ تمام شده کاهش می‌یابد. بدین ترتیب هزینهٔ قطعهٔ آهنگری تمام شده حدود ۵ تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

اگر رسیدن به خواص بهینهٔ این مواد مدنظر باشد، اقدامات احتیاطی را باید لحاظ نمود. در قسمت‌هایی از عملیات که درجهٔ حرارت بالاست، ماده باید چنان گرم شود که تمام آلیاژ به‌صورت محلول درآید. محصول باید پس از شکل گرفتن با هوا تا دمای ۶۰۰ـ۵۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۱۱۰۰ـ۱۰۰۰ درجه فارنهایت) خنک و سپس در ظرف تبرید پرداخته شود. به علاوه فولادهای بسیار کم آلیاژ قابلیت سخت شدن در تمام جسم قطعه را طی تبرید با هوا دارند، بنابراین در این محصولات غالباً استحکام کمتر و چقرمگی بیشتر قسمت‌های داخلی که ویژگی مواد تبرید و بازپخت شده است، در این آلیاژها دیده نمی‌شود.

ورقه‌های فولادی سخت‌شونده در اثر پختن

ورقه‌های سخت شونده در اثر پختن در صنایع ورقکاری خودرو نقش چشمگیری پیدا کرده است. این فولادهای کم کربن به‌صورتی فراوری می‌شوند که در شرایط نگهداری طبیعی در برابر کهنه شدن مقاوم باشند اما در حین تغییر شکل کهنه شوند. گرمای بعدی در حین پختن با رنگ، عملیات کهنه کردن را تکمیل می‌کند و ۳۵ تا ۷۰ مگاپاسکال (۵ تا ۱۰ هزار پوند بر اینچ مربع) به استحکام تسلیم افزوده می‌شود و به حدود ۲۷۵ مگاپاسکال (۴۰ هزار پوند بر اینچ مربع) می‌رسد. از آنجا که افزایش استحکام پس از شکل دادن اتفاق می‌افتد، ماده قابلیت شکل‌پذیری خوب و مقاومت زیادی در برابر فرورفتگی و خراش در محصول نهایی دارد. به علاوه پختن باعث کاهش وزن (یا صرفه‌جویی در وزن)، بدون از بین رفتن سایر خواص ورقهٔ فولادی می‌شود. این خواص شامل نقطه جوش‌پذیری، جذب انرژی، قیمت پایین و بازیابی کامل می‌باشد.

فولادهای پیشرفته با استحکام بالا (AHSS)

از سال ۲۰۰۰ با جایگزین شدن فولادهای پیشرفته با استحکام بالا (AHSS) به‌جای فولادهای کم کربن و HSLA، تحول چشمگیری در صنایع اتومبیل سازی واقع شد. در فولادهای AHSS فریت فاز اصلی است که دارای مقادیر متفاوتی از فازهای مارتنزیت، بینایت و آستنیت باقی‌مانده نیز هستند و از استحکام بالایی در کنار چقرمگی قابل توجهی بهره می‌برند، درحالی‌که مواد استحکام بالای پیشین نظیر فولادهای HSLA همیشه دچار مشکل کم بودن قابلیت شکل‌پذیری بودند، فولادهای AHSS امکان مهرش یا شکل‌دهی هیدرولیکی را برای تولید اکثر قطعات پیچیده به‌دست می‌دهند. در این حالت در اغلب موارد می‌توان قطعات را به‌صورت یک تکه ساخت و به این روش هزینه‌ها و زمان مربوط به مونتاژ را حذف کرد و از جانب دیگر استحکام بالاتر این مواد مقاومت خستگی و آمادگی در برابر تصادم را افزایش می‌دهد و هم‌زمان امکان کاهش وزن را نیز فراهم می‌آورد.

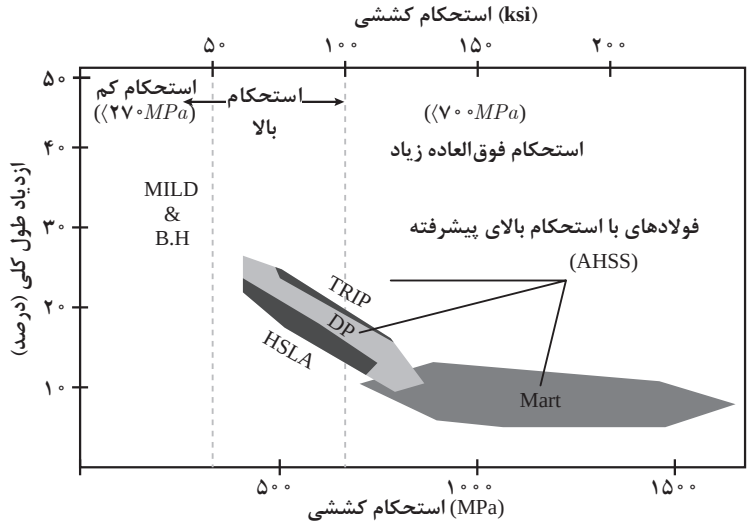
فولادهای دو فازی با استفاده از تبرید در دماهای بالاتر از A_1 ولی زیر A_3 تهیه می‌شوند تا ساختار فریت و مارتنزیت پرکربن در فولادهایی که از بقیهٔ جهات همانند فولادهای کم کربن و میان کربن هستند، ایجاد شود. امروزه فولاد کم کربن یا میان کربن ریزساختاری مختلط از فریت نرم و ضعیف به همراه مارتنزیت پرکربن محکم با سختی بالا دارد.

این فولادها از نظر استحکام با مواد کم آلیاژ محکم قابل مقایسه‌اند. و در عین حال، بدون کاهش کیفیت جوش‌پذیری، قابلیت شکل دادن بهتری دارند. نرخ کار سختی بالا و ازدیاد طول عالی منجر به استحکام کششی نهایی بالا به همراه استحکام تسلیم ابتدایی کم می‌گردد. حساسیت بالا به آهنگ کرنش به این معناست که هرچه فولاد سریع‌تر تغییر شکل داده شود، انرژی بیشتری جذب می‌کند. این ویژگی برای تولید شاسی و بدنهٔ اتومبیل بسیار مطلوب است. درحالی‌که فولادهای دو فازی دارای ساختاری از فریت و مارتنزیت هستند، فولادهای موم سانی تحریک شده توسط استحاله (TRIP) شامل فریت و مخلوطی از مارتنزیت، بینایت و آستنیت نگه داشته شده هستند. از آنجا که آستنیت به تدریج و با تغییر شکل فولاد به مارتنزیت تبدیل می‌شود، نرخ‌های بالای کار سختی فولادهای TRIP که تا کرنش‌های بالا باقی می‌مانند، مزیت بسیار قابل توجهی را در عملیات‌هایی نظیر شکل‌دهی کششی و کشش عمیق به‌دست می‌دهند به‌نوبهٔ خود استحاله به مارتنزیت و نرخ بالای کار سختی می‌تواند در تأمین قابلیت جذب انرژی عالی در هنگام تصادف بسیار سودمند و مؤثر باشد.

فولادهای مجموعه فاز (CP) و مارتنزیتی (Mart) می‌توانند حتی دارای استحکام‌های بالاتری همراه با ظرفیت مناسب و مفید برای تغییر شکل و جذب انرژی باشند. فولادهای CP که دارای ریز ساختاری از فریت و کسر حجمی فازهای سخت (مارتنزیت و بینایت) هستند، با اضافه شدن کاربیدها یا نیتریدهای نیوبیم، تیتانیم و

یا وانادیم به استحکام بالا هم می‌رسند. فولادهای مارتنزیتی تقریباً به‌طور کامل از مارتنزیت بوده و بعضاً دارای استحکام کششی تا حد ۱۷۰۰ مگاپاسکال (۲۴۵ هزار پوند بر اینچ مربع) هستند.

شکل زیر استحکام و شکل‌پذیری (ازدیاد طول) نسبی فولادهای متداول از جمله فولادهای آرام و فولادهای سختی‌پذیر، فولادهای پراستحکام کم آلیاژ (HSLA) و فولادهای جدیدتر پراستحکام پیشرفته (AHSS) را نشان می‌دهد. فولادهای کربن ـ منگنز می‌تواند پلی بین فاصلهٔ فولادهای آرام و سختی‌پذیر با فولادهای HSLA باشد. همچنین برخی از شاخصه‌های متمایز مفید بین فولادهای کم استحکام (استحکام نهایی زیر ۲۷۰ مگاپاسکال یا ۴۰ هزار پوند بر اینچ)، فولادهای پراستحکام و فولادهای فوق مستحکم (استحکام کششی نهایی بیش از ۷۰۰ مگاپاسکال یا ۱۰۰ هزار پوند بر اینچ مربع) در شکل ۲۱ آمده است.



استحکام نسبی و شکل پذیری فولادهای معمولی، کم آلیاژ با استحکام بالا و فولادهای پیشرفته با استحکام بالا : دو فازی DP: مارتنزیت، Mart:سخت شونده در اثر پختن، BH

فولادهای خوش تراش

کاربرد روزافزون ماشین‌کاری با سرعت‌های بالا (به ویژه با ماشین‌های ابزار خودکار) تأثیر فراوانی بر توسعه و مصرف انواع فولادهای خوش تراش گذاشته است. این مواد به راحتی ماشین‌کاری می‌شوند و هنگام بریدن براده‌های کوچکی تولید می‌کنند. براده‌های کوچک‌تر طول تماس بین براده و ابزار برش را کم می‌کنند و در نتیجه اصطکاک و به دنبال آن حرارت تولید شده بر روی ابزار برش کاهش می‌یابد. به علاوه

تشکیل براده‌های کوچک موجب کاهش احتمال پیچ خوردگی آنها بر روی ماشین می‌شود که به تسریع عملیات برداشتن‌شان کمک می‌کند. در حالی که فولادهای خوش تراش ممکن است ۱۵ تا ۲۰ درصد گران‌تر از فولادهای معمولی باشند، این هزینه اضافی به آسانی از طریق سرعت‌های تراش بالاتر، عمق‌های تراش بیشتر و عمر طولانی‌تر ابزار جبران می‌شود.

فولادهای خوش تراش اساساً فولادهای کربنی هستند که توسط عناصر آلیاژی برای بهبود قابلیت ماشین‌کاری اصلاح شده‌اند. گوگرد، سرب، بیسموت، سلنیم، تلوریم و فسفر به همراه گوگرد این خاصیت را در فولاد ایجاد می‌کنند. گوگرد با منگنز ترکیب شده و به سولفید منگنز نرم مبدل می‌شود. این ترکیبات به نوبهٔ خود به‌صورت ناپیوستگی‌هایی در ساختمان ماده ظاهر می‌شوند و علت شکستن براده‌ها هستند. به علاوه، این ماده خاصیت خود روان‌سازی دارد و از چسبیدن تراشه روی ابزار جلوگیری می‌کند و شکل تراش را بهبود می‌دهد. ذرات حل نشدنی سرب. نیز دارای ویژگی مشابهی هستند.

اخیراً فولادهای خوش تراش بیسموتی جانشین فولادهای خوش تراش قبلی شده‌اند. بیسموت در مقایسه با سرب عامل ماشین‌کاری مناسب‌تری‌است. بیسموت از نظر زیست‌محیطی قابل قبول‌تر است، تمایل کمتری به تشکیل برادهٔ پیوسته از خود دارد و در آهن توزیع می‌شود زیرا چگالی آن تقریباً با چگالی آهن برابر است. قابلیت ماشین‌کاری به‌این دلیل بهبود می‌یابد که گرمای تولید شده در فرایند برش لایهٔ نازکی از بیسموت مایع به وجود می‌آورد که تنها در بخشی از یک میلیونیم ثانیه دوام می‌آورد. عمر ابزار تراش به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد و ماده همچنان جوش‌پذیر است. در عین حال، ایجاد خاصیت مطلوب خوش تراش بودن در انواع فولادها بدون از دست دادن خواص دیگر مقدور نیست. شکل‌پذیری و ضربه‌پذیری آنها تا حدودی نسبت به فولادهای اصلاح نشده کاهش می‌یابد. اتصال‌های لحیم‌کاری سخت شده با آلیاژهای پایهٔ مس هنگامی‌که برای اتصال فولادهای خوش تراش بیسموت دار به‌کار می‌رود، شکننده هستند. مواد افزودنی با ماشین‌کاری، استحکام اتصال‌های انقباضی را کاهش می‌دهند. در صورتی که میزان این کاهش‌ها چشمگیر باشد، روش‌های دیگری برای بهبود قابلیت ماشین‌کاری استفاده می‌شود. به عنوان نمونه قابلیت ماشین‌کاری فولاد را می‌توان با انجام کار سرد افزایش داد. بر اثر افزایش استحکام و سختی فلز، قابلیت شکل‌پذیری کاهش می‌یابد و ماشین‌کاری بعدی براده‌هایی ایجاد می‌کند که به راحتی جدا و به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌شوند.

ورقه‌های فولادی پوشش‌دار

تولید ورقه‌های فلزی به روش‌های سنتی شامل تولید قطعات از فولاد لخت (بدون پوشش) و سپس پرداخت آنها به‌صورت یک به یک است. در این سیستم فرایندهای پرداخت سطح می‌تواند گران قیمت‌ترین و وقت‌گیرترین مرحلهٔ تولید باشد، زیرا شامل حمل‌ونقل، دست‌کاری، عمل آوردن و خشک‌کردن و همچنین رعایت شرایط مختلف EPA (محیطی) OSHA (ایمنی و سلامت) است.

راه دیگر، خرید مادهٔ ورق‌های پوشش داده شده هنگام نورد است که به‌صورت نوار بلند و پیوسته‌ای می‌باشد که توسط تولیدکنندهٔ فولاد روکش شده است. تمیزکاری، پیش عملیات، پوشش‌دهی و پختن را می‌توان به‌صورت پیوسته انجام داد، پوشش‌های مختلفی را می‌توان بر شمرد، از جمله طیف کامل فلزات روکش دادنی به روش آب‌کاری یا فروبردنی (شامل آلومینیم، روی و کرم) وینیل‌ها، رنگ‌ها و مواد دیگر. بسیاری از این ورقه‌ها طوری ترکیب‌بندی می‌شوند که قابلیت تحمل عملیات سخت بعدی شکل دادن یا خمش را داشته باشند. این ورقه‌های پیوسته را می‌توان برای بهبود شکل ظاهری‌شان رنگ کرد یا نقش زد. در حین تولید و جابه‌جایی باید دقت کافی برای حفاظت کامل پوشش از هرگونه آسیب به عمل آید زیرا غالباً هزینهٔ اضافی بسیار کمتر از هزینهٔ پرداخت قطعات به‌صورت تک به تک است.

فولاد برای مصارف مغناطیسی و الکتریکی

مواد مغناطیسی نرم را می‌توان به کمک میدان‌های مغناطیسی نسبتاً ضعیف، مغناطیسی کرد؛ ولی پس از برداشتن میدان تقریباً تمامی مغناطیس خود را از دست می‌دهند. این مواد به مقیاس وسیعی در فراورده‌هایی مانند ترانسفورمرها، سلونوییدها، موتورها و ژنراتورها به‌کار می‌روند. متداول‌ترین مواد مغناطیسی نرم شامل آهن (خلوص زیاد)، فولادهای کم کربن، فولادهای برقی آهن ـ سیلیسیم، آلیاژهای فرو مغناطیسی بی‌شکل، آلیاژهای آهن ـ نیکل و فریت‌های نرم (مواد سرامیکی) هستند.

اخیراً فلزات بی‌شکل چشم‌انداز جالب توجهی در زمینهٔ خواص الکتریکی ـ مغناطیسی نشان داده‌اند. از آنجایی که این نوع ماده فاقد دانه و مرز دانه است: (۱) میدان‌های مغناطیسی آزادانه در پاسخ به میدان‌های خارجی حرکت می‌کنند، (۲) خواص در کلیهٔ جهات یکسان هستند و (۳) مقاومت در برابر خوردگی قابل توجه است. استحکام مغناطیسی زیاد و افت پس‌ماند کم امکان تولید آهن رباهای کوچک‌تر و سبک‌تر را به وجود می‌آورند.

هنگامی که این ماده جایگزین فولاد سیلیسیم‌دار در هستهٔ ترانسفورمر می‌شود، افت هسته به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

برای داشتن مغناطیس دائمی، ماده باید پس از حذف میدان اعمالی نیز مغناطیس باقی بماند. در حالی که مغناطیس‌های دائمی مواد سرامیکی یا آلیاژهای فلزی

پیچیده هستند، می‌توان فولادهای آلیاژی کبالت و با حداکثر ۳۶ درصد کبالت را در جایی که چگالی مغناطیسی بالا مورد نیاز باشد، در تجهیزات الکتریکی به‌کار برد.

فولادهای مارتنزیتی پیر شونده

هنگامی‌که فولاد با استحکام خیلی بالا مورد نیاز باشد، یک جایگزین قابل توجه انواع مختلف فولادهای مارتنزیتی کهنه شونده است. این آلیاژها بین ۱۵ تا ۲۵ درصد نیکل به علاوهٔ مقادیر قابل توجهی کبالت، مولیبدن و تیتانیم دارند که به فولاد بسیار کم کربن افزوده شده است.

این نوع فولاد را می‌توان در دماهای بالا ماشین‌کاری کرد و یا در شرایط تبریدی در هوا تحت کار سرد قرار داد و سپس تا استحکام تسلیم بیش از ۱۷۲۵ مگاپاسکال (۲۵۰ هزار پوند بر اینچ مربع) به همراه افزایش طول باقی‌ماندهٔ مناسب پیرسازی نمود.

آلیاژهای مارتنزیتی کهنه شونده در جاهایی که استحکام بسیار بالا و چقرمگی خوب مهم باشد، کاربرد دارند. اگر پس از جوش‌کاری، حل‌کردن و کهنه‌کردن کامل صورت گیرد می‌توانند جوش‌کاری شوند. همان‌گونه که از مقادیر زیاد افزوده‌های آلیاژی (بیش از ۳۰ درصد) و عملیات حرارتی چند مرحله‌ای انتظار می‌رود، فولادهای مارتنزیتی کهنه شونده بسیارگران هستند و باید فقط وقتی که خواص ممتازی مورد نیاز است، به‌کار روند.

فولاد برای کاربردهای دمای بالا

با یک حساب سرانگشتی، فولادهای کربنی ساده را نباید در دماهای بالاتر از ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۵۰۰ درجهٔ فارنهایت) به‌کار برد. فولادهای آلیاژی معمولی حد بالای کاربرد را به ۳۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۶۵۰ درجه فارنهایت) رسانده‌اند. پیش‌رفت مداوم در صنایع موشک و هواپیمای جت نیاز به فلزاتی را که خواص استحکامی مناسب، مقاومت در برابر خوردگی و به ویژه مقاومت خزشی در درجه حرارت‌های بالاتر از ۵۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) داشته باشند، روزافزون کرده است.

آلیاژهای آهنی مورد مصرف در دمای بالا، مواد کم کربن با محتوای کربن کمتر از ۰/۱ درصد هستند. تنش پارگی هزار ساعتهٔ این مواد در دمای حداکثرشان بسیار پایین و در حدود ۵۰ مگاپاسکال (۷ هزار پوند بر اینچ مربع) است. با اینکه آهن عنصر اصلی آلیاژهای مورد مصرف در دمای زیاد است، اما هنگامی‌که مقدار آن از ۵۰ درصد کمتر باشد، نمی‌توان آن آلیاژ را در دستهٔ فلزات آهنی قرار داد. استحکام زیاد در دماهای بالا، مستلزم استفاده از مواد غیر آهنی گران قیمت‌تر است.

فولادهای ابزار

فولادهای ابزار آلیاژهای آهنی پرکربن با استحکام بالایی هستند که با افزودنی‌های آلیاژی ترکیب شیمیایی‌شان تعادل مطلوب بین چقرمگی و مقاومت به سایش را با عملیات حرارتی مناسب به وجود آورده است. چند سیستم دسته‌بندی برای فولادهای ابزار ارائه شده‌اند که برخی برحسب ترکیب شیمیایی و برخی دیگر برحسب روش سخت شوندگی و خواص مکانیکی اصلی پایه‌ریزی شده‌اند. در سیستم دسته‌بندی AISI روش تبرید، کاربردهای عمده، ویژگی اصلی، با کاربرد صنعتی اصلی با حروف مشخص می‌شوند. در جدول ۲۴ هفت خانوادهٔ اصلی فولادهای ابزار و معیارهای AISI مربوطه ارائه شده‌اند، درون هر خانواده، آلیاژها به‌صورت عددی مرتب شده‌اند تا سیستم به‌صورت حرفی ـ عددی کامل شود.

جدول ۲۴ـ انواع اساسی فولادهای ابزار و ترازهای معادل AISI - SAE

نوع	تراز	ویژگی‌های عمده
۱ـ سخت‌شونده در آب	W	
۲ـ کار سرد	O	سخت‌شونده در روغن
	A	آلیاژ میانه، سخت‌شونده در آب
	D	پرکربن ـ پرکرم
۳ـ مقاوم در مقابل ضربه	S	
۴ـ تندبر	T	با پایهٔ تنگستن
	M	با پایهٔ مولیبدن
۵ـ کارگرم	H	$H_{۱}$ تا $H_{۱۹}$ با پایهٔ کرم
		$H_{۲۰}$ تا $H_{۳۹}$ با پایهٔ تنگستن
		$H_{۴۰}$ تا $H_{۵۹}$ با پایهٔ مولیبدن
۶ـ قالب پلاستیک	P	
۷ـ کاربرد ویژه	L	کم آلیاژ
	F	کربن ـ تنگستن

فولادهای ابزار سخت‌شونده با آب (تراز W) فولادهایی ساده با کربن بالا هستند. این نوع فولادها ارزان‌ترین نوع فولاد هستند و برای انواع قطعاتی که غالباً کوچک‌اند و تحت کار سنگین و یا دمای زیاد قرار ندارند، مورد استفاده واقع می‌شوند. از آنجا که استحکام و سختی، هر دو تابع محتوای کربن هستند، با تغییر در ترکیب شیمیایی این مواد می‌توان طیف وسیعی از خواص را به دست آورد. این فولادها در اثر تبرید در آب سخت می‌شوند و به دلیل پایین بودن قابلیت سخت شوندگی، در صورتی که سختی در تمام مقطع موردنظر باشد، تنها می‌توان در شکل‌های با مقاطع نسبتاً نازک از آنها استفاده کرد. این مواد، خصوصاً در سختی‌های بالاتر نسبتاً ترد هستند.

کاربردهای متعارف فولاد کربن‌دار ساده برحسب مقدار کربن به شرح زیر است:

۰/۶۰ تا ۰/۷۵درصد کربن: قطعات ماشین، قلم برش، پیچ و قطعات مشابه که باید دارای سختی متوسط و چقرمگی و مقاومت به ضربهٔ قابل توجه باشند.

۰/۷۵ تا ۰/۹۰ درصد کربن: حدیده‌های آهنگری، چکش و پتک.

۰/۹۰ تا ۱/۱ درصد کربن: ابزارهای عمومی که باید دارای خواص مقاومت در مقابل سایش و چقرمگی خوب باشند مانند مته، ابزارهای برش، تیغه‌های قیچی و دیگر لبه‌های برندهٔ قطعات ضخیم.

۱/۱ تا ۱/۳ درصد کربن: مته‌های کوچک، ابزارهای ماشین تراش، تیغ و دیگر قطعات برندهٔ قطعات نازک که در آنها سختی فوق‌العاده مورد نیاز است ولی چقرمگی زیاد چندان اهمیتی ندارد.

در مواردی که چقرمگی بهتر مورد نیاز باشد، معمولاً مقادیر مختصری منگنز، سیلیسیم و مولیبدن به فولاد اضافه می‌شود. افزودن حدود ۰/۲ درصد وانادیم برای تشکیل کاربیدهای سخت و پایدار که موجب می‌شود در حین عملیات حرارتی دانه‌ها ریز بمانند، مفید است. یکی از نقاط ضعف فولادهای ابزار کربنی از دست رفتن سختی آنها در دماهای بالاست. اگر این ابزارها به مدت طولانی در معرض دماهای بالاتر از ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۳۰۰ درجه فارنهایت) باشند، تا حد نامطلوبی نرم می‌شوند. در مواردی که لازم باشد قطعات بزرگ‌تر سخت شوند، یا تغییر شکل حین عملیات حرارتی به حداقل برسد، معمولاً فولادهای ابزار سردکار پیشنهاد می‌شوند. فولادهای سخت‌شونده در روغن (تراز O) یا سخت‌شونده در هوا (تراز A) به دلیل افزوده‌های آلیاژی و قابلیت سخت‌شوندگی بیشترشان نیاز به تبرید چندان سریع ندارند و در نتیجه دقت ابعادشان بهتر حفظ می‌شود و تمایل به ترک برداشتن کاهش می‌یابد.

فولادهای ابزار پرکرم با حرف (D) مشخص می‌شوند و بین ۱۰ تا ۱۸ درصد کرم دارند. این آلیاژها سخت‌شونده در هوا نیز هستند و مقاومت به سایش عالی در سخت‌شوندگی عمیق دارند. قالب‌های آهنگری، ریخته‌گری حدیده‌ای و کشیدن معمولاً از فولادهای ابزار پرکرم ساخته می‌شوند. چون این آلیاژها، عنصر آلیاژی لازم برای مقاومت به نرم شدگی در دمای بالا را ندارند، لذا نباید از آنها در دماهای بیش از

۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۵۰۰ درجه فارنهایت) به مدت زیاد استفاده نمود.
فولادهای ابزار مقاوم در مقابل ضربه (مشخصهٔ S) برای هر دو کاربرد ضربه‌ای گرم و سرد در نظر گرفته شده‌اند. کم بودن مقدار کربن (حدود ۰/۵ درصد) تأمین‌کنندهٔ چقرمگیست، و افزودن عناصر آلیاژی کاربید ساز دیرسایی، قابلیت سخت‌شوندگی و ویژگی‌های کار گرم را تأمین می‌کند. کاربرد این فولادها در ابزارهای هوایی، قلم‌تراش، منگنه و تیغه‌های برش است.
فولادهای ابزار تندبر در درجهٔ اول برای ابزارهای تراش فلزات و کاربردهای دیگری که مستلزم حفظ سختی تا دمای سرخ و بالاتر از آن (۱۴۰۰ درجه فارنهایت یا ۷۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد) است، به‌کار می‌روند. یک نوع متداول فولاد تندبر تنگستن‌دار آلیاژ T_1 است که حاوی ۰/۷ درصد کربن، ۱۸ درصد تنگستن، ۴ درصد کرم و ۱ درصد وانادیم است. این آلیاژ ترکیب متعادلی از دو خاصیت مقاومت در مقابل ضربه و مقاومت به سایش را دارد و برای کاربردهای متعددی از برش در دماهای بالا به‌کار می‌رود. فولادهای تندبر مولیبدن‌دار (مشخصهٔ M) برای کاستن مصرف تنگستن و کرم مورد نیاز برای ایجاد خواص برش تند به بازار آمده‌اند.
فولادهای ابزار گرم کار (مشخصهٔ H) برای کار در دمای بالا به مدت طولانی طراحی شده‌اند. در کلیهٔ انواع این فولادها از عناصر افزودنی کاربیدساز استفاده می‌شود. انواع H_1 تا H_{19} آلیاژهای با پایهٔ کرم، حاوی حدود ۰/۵ درصد کرم هستند. انواع H_{20} تا H_{30} پایهٔ تنگستن دارند و دارای ۹ تا ۱۸ درصد تنگستن همراه با ۳ تا ۴ درصد کرم هستند. انواع H_{40} تا H_{59} آلیاژهای با پایهٔ مولیبدن هستند. انواع کرم دار ارزان‌تر از آلیاژهای مولیبدن یا تنگستن‌دار می‌باشند. دیگر فولادهای ابزار شامل انواع زیر هستند:
(۱) فولادهای قالب پلاستیک (مشخصهٔ P) صرفاً برای رفع نیاز قالب‌گیری آلیاژهای ریختنی روی و تزریق پلاستیک طراحی شده‌اند؛ (۲) فولادهای ابزار خاص کم آلیاژ (مشخصهٔ L) مانند نوع L_6 از چقرمگی فوق‌العاده‌ای برخوردارند و (۳) فولادهای ابزار خاص نوع کربن ـ تنگستن‌دار (مشخصهٔF) که در آب سخت می‌شوند اما مقاومت به سایش بسیار کمتری نسبت به فولادهای ابزار کربنی ساده دارند.

فولادها و چدن‌های آلیاژی

تأثیر عناصر آلیاژی، بدون توجه به فرایند مورد استفاده برای رسیدن به شکل نهایی یکسان است. اگر قرار باشد شکل نهایی با ریخته‌گری تهیه شود، بعضی آلیاژها می‌توانند ویژگی‌های خاص فرایند مانند سیالیت و خواص قطعهٔ ریختگی را افزایش دهند. اگر ماده کمتر از ۲ درصد کربن داشته باشد، فولاد ریختنی خوانده می‌شود و اگر مقدار کربن از ۲ درصد بیشتر باشد چدن نام دارد.
چدن‌های آلیاژی غالباً به همان صورت ریخته شده به‌کار می‌روند و تنها برای تنش‌زدایی یا تابکاری عملیات حرارتی می‌شوند. برای این کاربردها عناصر آلیاژی

برحسب توانایی‌شان در تغییر خواص از طریق: (۱) تغییر شکل گرافیت یا سمنتیت (۲) اصلاح شکل ساختاری فاز پرکربن، (۳) تقویت زمینه و (۴) افزایش مقاومت در برابر سایش با تشکیل کاربیدهای عناصر آلیاژی به کار گرفته می‌شوند. مثلاً نیکل به تشکیل گرافیت کمک می‌کند؛ گرافیت حاصل معمولاً ریزدانه است. از طرف دیگر کرم تشکیل گرافیت را به تعویق می‌اندازد و به پایداری سمنتیت کمک می‌کند. بدین سبب غالباً نیکل و کرم توأماً به نسبت دو تا سه بخش نیکل به یک بخش کرم، به چدن افزوده می‌شوند. بین ۰/۵ تا ۱ درصد مولیبدن معمولاً برای استحکام اضافی و تشکیل کاربیدهای آلیاژی به چدن خاکستری اضافه می‌شود. به علاوه از مولیبدن برای کنترل اندازهٔ ورقه‌های گرافیت نیز استفاده می‌کنند.

چدن‌های پر آلیاژ برای ایجاد مقاومت زیاد در برابر خوردگی به ویژه در دماهای بالا طراحی شده‌اند. در این خانواده چدن خاکستری آستنیتی، متداول‌ترین چدن است که حاوی ۱۴ درصد نیکل، ۵ درصد مس و ۲/۵ درصد کرم می‌باشد. مقاومت به خوردگی این چدن در مقابل انواع اسیدها و قلیاها در محدودهٔ دمایی تا سقف ۸۰۰درجه سانتی‌گراد (۱۵۰۰ درجه فارنهایت) مناسب است.

چدن‌های آلیاژی و فولادهای ریختگی معمولاً با نام‌گذاری عددی ASTM شناخته می‌شوند که در آن مواد به خواص مکانیکی و کاربرد مورد انتظار از آنها مرتبط می‌شوند. جامعهٔ مهندسین خودرو نیز مشخصه‌هایی برای فولادهای ریختگی مورد استفاده در صنعت خودرو دارد.

معمولاً فولادهای ریختگی در جایی به‌کار می‌روند که چدن در آنجا مناسب نباشد. در مقایسه با چدن‌ها، فولادهای ریختگی از سخت‌پایی، چقرمگی و نرمی بیشتری در بازهٔ دمایی کاری برخوردارند و به راحتی جوش‌کاری می‌شوند. آنها معمولاً برای تولید سازهٔ نهایی تبرید و بازپخت شده مورد عملیات حرارتی قرار می‌گیرند، و افزودنی‌های آلیاژی نیز برای ایجاد سختی‌پذیری مطلوب و توازن خواص انتخاب می‌شوند. البته افزایش خواص با هزینه همراه است زیرا فولادهای ریختگی دمای ذوب بالاتر (یعنی انرژی بیشتر برای ذوب و نسوزهای گران قیمت‌تری مورد نیاز است)، سیالیت کمتر (که منجر به افزایش احتمال پر نشدن قالب می‌گردد) و انقباض بیشتری (چون گرافیت در حین انجماد تشکیل نمی‌گردد) دارند. به سایت کاربردهای دیگر از مزایای استحکام سازه‌ای ماده و توانایی‌اش در تحمل فشار، مقاومت به ضربه و تحمل دماهای بالا و مقاومت به سایش استفاده می‌کنند.

جلسه دهم موضوع: مفهوم فولاد زنگ نزن

هدف: توصیف فولاد زنگ نزن و کاربردهای آن

مفاهیم

فولاد زنگ نزن به فولادهایی با مقدار عناصر آلیاژی بالا گفته می‌شود که توانایی مقاومت به خوردگی در اتمسفرهای خورنده و دماهای بالا را داشته باشند. فولادهای ضد زنگ معمولی حاوی آهن و کربن به علاوه حداقل ۱۲ درصد کرم هستند که عامل اصلی مقاومت به خوردگی آنهاست.

آلیاژهای فولاد زنگ نزن به علت داشتن مقاومت بالا نسبت به‌خوردگی عالی یکی از پر کاربردترین مواد در مهندسی است. اضافه‌کردن نیکل به فولادهای زنگ‌نزن مقاومت به خوردگی را در محیط‌های خنثی یا اکسیدکننده ضعیف افزایش می‌بخشد اما قیمت آنها را نیز افزایش می‌دهد. همچنین مقدار کافی نیکل قابلیت انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری فولادها را افزایش می‌دهد. افزایش مولیبدن به فولادهای زنگ‌نزن مقاومت به خوردگی را در حضور یون‌های کلر افزایش می‌دهد، حال آنکه افزودن آلومینیم مقاومت به پوسته شدن را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد.

فولادهای زنگ نزن براساس ساختار متالورژیکی به‌صورت زیر تقسیم می‌شوند:

۱. فولاد زنگ نزن فریتی
۲. فولاد زنگ نزن مارتنزیتی
۳. فولاد زنگ نزن آستنیتی
۴. فولاد زنگ نزن آستنیتی ـ فریتی (دوفازی)
۵. فولاد زنگ نزن رسوب سختی

استیل‌های سری ۳۰۰

رایج‌ترین نوع فولاد ضدزنگ استیل‌های سری ۳۰۰ هستند که خود به انواع مختلفی مثل ۳۰۳، ۳۰۴، ۳۰۵، ۳۱۶، ۳۲۱ و ۳۴۷ تقسیم می‌شوند و در بین آنها استیل ۳۰۴ که یک فولاد آستنیتی است با اختلاف قابل توجهی از بقیه پرکاربردتر و رایج‌تر است. استیل ۳۰۴ و تعداد دیگری از استیل‌های این سری مثل ۳۰۲، ۳۰۳، ۳۰۴، ۳۰۵، ۳۸۴ شامل ۱۸ درصد کروم و ۸ درصد نیکل هستند و به همین دلیل به نام استیل ۸ـ۱۸ هم شناخته می‌شوند. البته نام استیل ۸ـ۱۸ اشاره به نوع خاصی از استیل ندارد چون فقط درصد دو آلیاژ نیکل و کرم را نشان می‌دهد. علاوه بر این کربن این استیل‌ها کمتر از ۰/۰۸ درصد است و خاصیت آهنربایی ندارند.

استیل ۳۱۶ پس از استیل ۳۰۴ دومین استیل رایج در بین استیل‌های آستنیتی است. این استیل که به «استیل ضدزنگ گرید دریایی» هم معروف است و معمولاً شامل ۱۶ درصد کروم، ۱۰ درصد نیکل و ۲ درصد مولیبدن است و به همین دلیل به استیل

۱۰ـ۱۸ هم معروف است. در محیط‌هایی که نیازمند مقاومت به خوردگی بیشتر از گرید ۳۰۴ هستند از گرید ۳۱۶ استفاده می‌شود. این گرید همانند ۳۰۴ آستنیتی و نگیر است، و با عملیات حرارتی قابل سخت‌شدن نیست. عنصر کربن حداکثر ۰/۰۸ درصد باید باشد و نیکل مقداری بیشتر از ۳۰۴ است. تفاوت شاخص میان ۳۰۴ و ۳۱۶ عنصر مولیبدن است که حداکثر ۳٪ به ۳۱۶ افزوده می‌شود.

روش تدریس

علاوه بر مطالب کتاب درسی مفاهیم فوق را نیز در کلاس مطرح نموده و کاربردهای دیگری از فولادهای زنگ نزن مطابق جدول ۲۵ علاوه بر جدول موجود در کتاب درسی مطرح نمایید.

جدول۲۵ـ برخی از کاربردهای فولاد زنگ نزن

کد فولاد زنگ نزن	کاربرد	تصویر
۳۰۴/۳۰۴L ۳۱۶/۳۱۶L	نمای ساختمان‌ها درمعماری	
S۸۲۰۱۳	کف یخچال در وسایل نقلیه دارای یخچال	
۳۰۴/۳۰۴L	بدنه خودرو	

۳۰۴/۳۰۴L ۳۱۶/۳۱۶L	خشک‌کن صنعتی	
۳۰۴/۳۰۴L	مبلمان شهری	
۳۰۴/۳۰۴L	یخچال، ماشین لباس‌شویی، ماشین ظرف‌شویی	

دانش افزایی

فولادهای زنگ نزن

فولادهای کم‌کربن حاوی ۴ تا ۶ درصد کرم مقاومت خوبی در محیط‌های خورندهٔ صنایع شیمیایی دارند. خاصیت مقاومت در مقابل خوردگی در اثر تشکیل لایهٔ کاملاً چسبندهٔ اکسید کرم روی سطح فلز به وجود می‌آید. هرگاه زیبایی ظاهر و مقاومت در برابر خوردگی مهم‌ترین خواسته‌ها باشند، باید از ترکیبات اکسید کرم قوی‌تری استفاده شود که حداقل ۱۲ درصد کرم اتمی داشته باشند (اما نه کاربیدهای کرم و نه دیگر ترکیب‌های آن، کرم لازم برای انجام واکنش با اکسیژن را ندارند.) این لایهٔ مقاوم به خوردگی چسبنده و چقرمه با ضخامت فقط ۱ تا ۲ نانومتر در صورت آسیب‌دیدن خود را ترمیم می‌کند، به شرط آنکه اکسیژن در محیط وجود داشته

باشد، حتی به مقدار اندک. این دسته به نام فولادهای زنگ نزن حقیقی موسوم‌اند.
چندین سیستم مختلف برای دسته‌بندی این آلیاژها طراحی و ارائه شده‌اند. انستیتو آهن و فولاد آمریکا (AISI) فلزات را برحسب ترکیب شیمیایی دسته‌بندی کرده و آنها را با کمک یک عدد سه رقمی (که بیانگر دستهٔ اصلی و آلیاژ ویژه در آن دسته است) مشخص می‌کند. لیکن این آلیاژها برحسب خانواده‌های ریزساختاری‌شان تقسیم می‌شوند، زیرا شبکهٔ بلورین، تعیین‌کنندهٔ خواص مهندسی آنهاست. در جدول ۲۶ تقسیم‌بندی AISI برای فولادهای زنگ نزن و ارتباط آن با خانوادهٔ ریزساختاری ارائه شده است.

جدول ۲۶ــ تقسیم‌بندی AISI برای فولادهای زنگ نزن

کد سه رقمی	ریز ساختار
۲۰۰ و ۳۰۰	آستنیتی
۴۰۰	فریتی یا مارتنزیتی
۵۰۰	مارتنزیتی

کرم، عامل پایدارکنندهٔ فریت است، بدین صورت که افزودن آن موجب افزایش دمای پایداری ساختار فریتی می‌شود. اگر کرم به مقدار کافی به آهن افزوده شده و میزان کربن پایین نگاه داشته شود، می‌توان آلیاژ با ساختار فریتی در دماهای زیر دمای انجماد داشت. این آلیاژها به نام فولادهای زنگ نزن فریتی موسوم‌اند. نرمی و شکل‌پذیری آنها ضعیف است، اما به‌خوبی جوش‌پذیر هستند. در ناحیهٔ جوش مارتنزیت تشکیل نمی‌شود زیرا امکان تشکیل آستنیت با ساختار مکعبی با وجوه مرکز دار (FCC) برای تبدیل به مارتنزیت در حین تبرید وجود ندارد. این آلیاژها را نمی‌توان عملیات حرارتی نمود و نرمی کم‌شان میزان استحکام‌دهی با کارسرد را محدود می‌کند. منشأ اصلی استحکام بخشی، ساختار مکعبی مرکز پر (BCC) به همراه اثرات استحکام بخشی محلول جامد است. به دلیل ویژگی فلزات BCC فولاد زنگ‌نزن فریتی با کاهش دما، انتقال نرمی به تردی از خود نشان می‌دهد. از آنجا که آلیاژهای فریتی ارزان‌ترین نوع فولادهای زنگ نزن هستند باید ابتدا آنها را مورد توجه قرار داد. اگر استحکام زیادتری مورد نیاز باشد، فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی انتخاب مناسبی هستند. برای این نوع آلیاژها کربن افزوده شده و کرم تا حدی کاهش می‌یابد که ماده بتواند در دمای بالا آستنیتی و در دمای پایین فریتی باشد. همان‌طور که در فولادهای استاندارد بیان شد، کربن در آستنیت با ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار حل و سپس بار دیگر سرد و به ساختار مارتنزیتی مرکزدار تبدیل

می‌شود. آلیاژهایی با مقادیر مختلف کربن تا ۱/۲ درصد وجود دارند که دارای انواع سختی‌ها و استحکام‌ها می‌باشند. فقط باید احتیاط کرد که میزان کرم در محلول بیش از ۱۲ درصد نگاه داشته شود، کربن و کرم در اثر تبرید آهسته، واکنش انجام می‌دهند و به کاربیدهای کرم مبدل می‌شوند. در این صورت کرم برای تشکیل لایهٔ محافظ اکسید در دسترس نخواهد بود. بنابراین فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی تنها در حالت مارتنزیتی (که کرم به شکل اتمی در محلول حبس می‌شود) زنگ نزن هستند ولی ممکن است در برابر زنگ قرمز هنگامی‌که برای ماشین‌کاری یا تولید، تابکاری یا طبیعی‌سازی می‌شوند، آسیب‌پذیر باشند. قیمت فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی به دلیل انجام عملیات حرارتی اضافی (شامل آستنیتی کردن، تبرید، تنش‌زدایی و باز پخت) حدود ۱/۵ برابر آلیاژهای فریتیست. این فولادها مقاومت به خوردگی کم‌تری نسبت به انواع دیگر داشته و هنگامی به‌کار می‌روند که استحکام و سختی خواص غالب مورد نظر باشند.

نیکل عامل پایداری آستنیت است و در صورت وجود کرم و نیکل به میزان کافی فولاد زنگ نزن در دمای اتاق دارای آستنیت پایدار خواهد بود. بهای این آلیاژها که به نام فولادهای زنگ نزن آستنیتی موسومند، حدود ۲ تا ۳ برابر آلیاژهای فریتیست و دلیل آن گرانی عناصر آلیاژی کرم و نیکل است. برخی اوقات از منگنز و نیتروژن به عنوان عامل پایداری آستنیت استفاده می‌شود و بدین ترتیب فولاد زنگ نزن آستنیتی با کیفیت و قیمت پایین‌تر به‌دست می‌آید (سری ۲۰۰ AISI).

فولادهای آستنیتی به دلیل غیرمغناطیس بودنشان به راحتی قابل تشخیص‌اند (فولادهای زنگ نزن فریتی و مارتنزیتی جذب آهن‌ربا می‌شوند) و تقریباً در کلیهٔ محیط‌ها به جز اسیدکلریدریک و دیگر اسیدهای‌هالوژنه و نمک‌هایشان، کامل؛ در برابر خوردگی مقاوم‌اند. به علاوه در اثر پرداخت، مانند آینه صیقلی می‌شوند و ظاهر مناسبی دارند. شکل‌پذیری آنها فوق‌العاده است (ویژگی ساختار بلورین مکعب با وجوه مرکزدار)، در اثر کارسرد به خوبی سخت می‌شوند. پاسخ فولاد ۳۰۴ (یا با نام دیگر فولاد ۱۸ـ۸ به دلیل وجود ۱۸ درصد کرم و ۸ درصد نیکل) به مقادیر کارسرد کم به قرار زیر است:

استحکام تسلیم	استحکام کششی	افزایش طول نمونهٔ تبرید با آب نورد سرد شده (۱۵ درصد)
(ksi) MPa	(ksi) MPa	۲ اینچی (درصد)
(۳۸) ۲۶۰	(۹۰) ۶۲۰	۶۸
(۱۱۷) ۸۰۵	(۱۴۰) ۹۶۵	۱۱

غالباً این مواد در حالت تبرید شده با آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. تبرید با آب موجب می‌شود که آلیاژها در حالت محلول جامد باقی بمانند. هیچ‌گونه تغییر فازی در حین تبرید صورت نمی‌گیرد زیرا فاز آستنیت در بازهٔ دمای مربوطه پایدار است. فولادهای زنگ نزن آستنیتی بهترین ترکیب مقاومت به خوردگی و چقرمگی را در بین انواع فولاد زنگ نزن از خود نشان می‌دهند.

فولادهای زنگ نزن آستنیتی موادی‌گران قیمت‌اند و نباید در مواردی که فولادهای ارزان‌تر فریتی و مارتنزیتی برای کاربرد موردنظر مناسب هستند و یا مواردی که فولاد زنگ‌نزن حقیقی مورد نیاز نباشد، به‌کار گرفته شوند. شکل زیر فهرست چند آلیاژ از این سه دستهٔ اصلی تقسیم‌بندی و ویژگی‌های اصلی آنها را نشان می‌دهد. جدول ۲۷ انواع اصلی فولاد زنگ نزن و سازوکارهای اساسی استحکام بخشی در آنها را نشان می‌دهد.

آلیاژهای رایج و خواص عمدهٔ سه نوع مهم از فولادهای زنگ نزن

چهارمین دسته، و طبقهٔ خاصی از فولادهای زنگ نزن، فولادهای سخت شوندهٔ رسوبی هستند. این نوع آلیاژها اساساً مارتنزیتی یا آستنیتی هستند و با افزودن عناصر آلیاژی که موجب سخت شدن زمانی آلیاژ در دمای نسبتاً کم باشند، اصلاح می‌شوند. با افزودن سخت‌شدن زمانی به ساز و کارهای موجود، استحکام تسلیم آلیاژ به حدود ۱۷۹۰ مگا پاسکال (۲۶۰ هزار پوند بر اینچ مربع) و استحکام کششی آن به ۱۸۲۵ مگا پاسکال (۲۶۵ هزار پوند بر اینچ مربع) همراه با ۲ درصد افزایش طول می‌رسد. البته آلیاژهای سخت شوندهٔ رسوبی به دلیل عناصر آلیاژی اضافی و فراورش بیشتر از گران قیمت‌ترین انواع فولادهای زنگ نزن به شمار می‌آیند و تنها در مواردی بسیار ضروری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

اگرچه چهار دستهٔ اشاره شده در بالا چارچوب فولادهای زنگ نزن را تشکیل می‌دهند، اما انواع دیگری نیز وجود دارند. فولادهای زنگ نزن دو جزیی بین ۱۸ تا ۲۵ درصد کرم و ۴ تا ۷ درصد نیکل و تا ۴ درصد مولیبدن دارند و در دمای کار گرم با آب تبرید می‌شوند تا ریزساختاری که شامل تقریباً نیمی‌فریت و نیمی‌آستنیت است، تولید شود. این ساختار مختلط استحکام تسلیم بالاتر و مقاومت بیشتری در برابر ترک برداشتن در اثر خوردگی و فشار در مقایسه با هر دو دستهٔ تمام آستنیتی و تمام فریتی دارد.

فولادهای زنگ نزن معمولی به علت سخت شدن در اثر کار مکانیکی و تمایل به مقاومت در برابر برش، برای ماشین‌کاری مناسب نیستند. آلیاژهای خوش تراش مخصوصی در هر دسته (خانواده) به وجود آمده‌اند که مقادیر اضافه‌تری گوگرد و سلنیم دارند که قابلیت ماشین‌کاری‌شان تقریباً مانند فولادهای میان کربن است. مشکلات متعدد منحصر به فردی در مورد خانوادهٔ فولادهای زنگ نزن وجود دارد. از آنجا که اکسید محافظ، مقاومت به خوردگی خوبی ایجاد می‌کند، این خاصیت در صورت پایین آمدن میزان کرم در محلول به زیر ۱۲ درصد از بین می‌رود.

جدول۲۷ــ مهم‌ترین سازوکار استحکام بخشی برای انواع فولادهای زنگ نزن

نوع فولاد زنگ نزن	مهم‌ترین سازوکار استحکام بخشی
فریتی	استحکام دهی محلول جامد
مارتنزیتی	استحکام دهی تبدیل فازی (مارتنزیت)
آستنیتی	کار سرد استحکام دهی تغییرشکل

کاهش مقدار کرم آزاد، تشکیل کاربیدهای کرم در مرز دانه‌ها (حساس شدن) در دماهای بالاست.

راه‌های مختلفی برای جلوگیری از این پدیده ایجاد شده است. یک راه این است که

میزان کربن در فولاد زنگ نزن حتی‌الامکان پایین نگاه داشته شود (معمولاً کمتر از ۰/۱ درصد) راه دیگر جذب کربن به وسیلهٔ مقدار کمی از عناصر تست تیتانیم یا نیوبیم است که در مقایسه با کرم، میل ترکیبی بیشتری با کربن دارند. همچنین تبرید سریع در بازهٔ دمایی ۴۸۰ تا ۸۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۹۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه فارنهایت) که محدودهٔ دمای تشکیل کاربید است نیز موجب تأخیر در تشکیل کاربیدها می‌شود.
مشکل دیگر در رابطه با فولادهای زنگ نزن پرکرم، ترد شدن پس از ماندن به مدت زمان طولانی در دمای زیاد است. فاز زیگما با ساختاری ترد در دماهای بالا بر روی مرزدانه‌ها تشکیل می‌شود. آنها را می‌پوشاند و در نتیجه مسیر ترک تردی را در سرتاسر فلز به وجود می‌آورد. بدین سبب فولادهای زنگ نزن مورد استفاده در دمای زیاد دائماً از نظر تشکیل فاز زیگما مورد کنترل و بررسی قرار می‌گیرند.

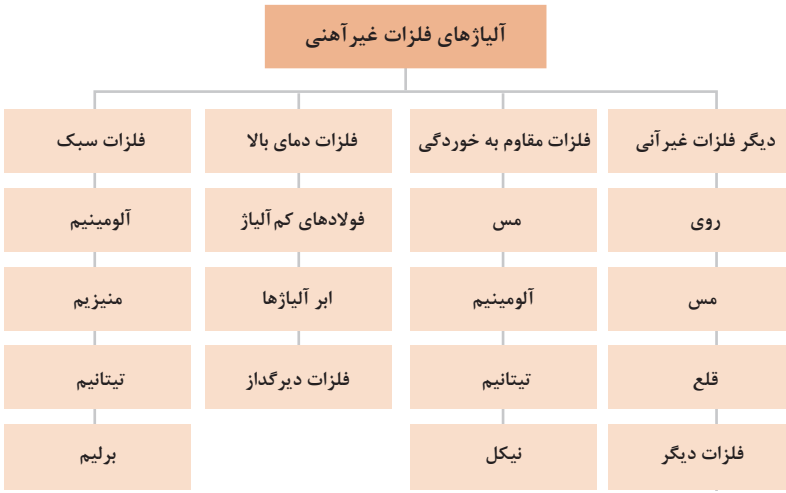
جلسه یازدهم موضوع: معرفی آلومینیم و آلیاژهای آن

هدف: نام‌گذاری آلیاژهای آلومینیم و کاربردهای آنها

دانش افزایی

فلزات غیرآهنی

آشنایی: فلزات و آلیاژهای غیرآهنی نقش مهم و روز افزونی در فناوری پیشرفته ایفا می‌کنند. آنها به دلیل تعداد، انواع و نیز ویژگی‌های طبیعی گوناگونی که خاص هر نوعشان است، می‌توانند در گسترهٔ بسیار وسیعی پاسخ‌گوی انواع نیازهای مهندسان طراح باشند. فلزات غیرآهنی با وجود آنکه گران قیمت‌تر از فولاد هستند، در برخی موارد دارای خواص یا ترکیبی از خواص منحصر به فردی هستند که در هیچ یک از فلزات و آلیاژهای آهنی به چشم نمی‌خورد، از جمله:
۱ مقاومت در برابر خوردگی ۲ راحتی تولید ۳ هدایت الکتریکی و حرارتی زیاد ۴ سبک وزنی ۵ استحکام در دماهای بالا ۶ رنگ
تقریباً همهٔ آلیاژهای غیرآهنی دارای حداقل دو ویژگی از فهرست فوق و برخی از آنها نیز دربرگیرندهٔ تمام این خواص هستند. در بسیاری از موارد، ترکیب متناسبی از این خاصیت‌ها مورد نیاز است. هر سال به‌طور میانگین هر آمریکایی نیاز به ۶۵ پوند آلومینیم، ۲۱ پوند مس، ۱۲ پوند سرب، ۱۱ پوند روی و ۲۵ پوند انواع دیگر فلزات غیرآهنی دارد. شکل نمودار صفحه بعد برخی از فلزات غیرآهنی را برحسب خواص مفید مهندسی‌شان دسته‌بندی کرده است و جدول ۲۸، افزایش نقش فلزات غیرآهنی در یک خودرو خانوادهٔ معمولی را نشان می‌دهد، جدول ۲۸.



فلزات و آلیاژهای متداول غیرآهنی طبقه‌بندی شده بر اساس خواص

جدول ۲۸ـ میزان مواد مختلف در یک خودروی معمولی خانوادگی بر حسب پوند

ماده	۱۹۷۸	۱۹۹۰	۲۰۰۲
آلومینیم	۱۱۲/۵	۱۵۸/۵	۲۷۹/۵
پلاستیک‌ها	۱۸۰	۲۲۹	۲۵۵
پودر فلز	۱۵/۵	۲۴	۴۰/۵
چدن	۵۱۲	۴۵۴	۳۲۸
روی	۳۱	۱۸/۵	۸/۵
فولاد	۲۱۰۳	۱۶۸۲/۵	۱۷۵۷
فولاد زنگ نزن	۲۶	۳۴	۵۶/۵
مس	۳۷	۴۸/۵	۵۰
منیزیم	۱	۳	۹/۵
مواد دیگر	۵۵۱/۵	۴۸۸/۵	۵۷۳
جمع	۳۵۶۹/۵	۳۱۴۰/۵	۳۳۵۷/۵

به‌طور کلی استحکام آلیاژهای غیرآهنی کمتر از فولاد است. به علاوه ضریب کشسانی‌شان به میزان قابل توجهی کمتر است و هر جا که صلابت (سخت‌پایی) ماده موردنظر باشد، آلیاژهای آهنی ممتازند. سهولت ساخت این دسته از فلزات غالباً مورد توجه قرار می‌گیرد. قابلیت ریخته‌گری آلیاژهای با نقطهٔ ذوب پایین در انواع قالب‌های ماسه‌ای، دائمی و حدیده‌ای زیاد است. بسیاری از آلیاژها دارای ویژگی شکل‌پذیری زیاد و تنش تسلیم پایین، یعنی ترکیب ایده‌آل برای کارسرد هستند. غالب آلیاژهای غیرآهنی دارای قابلیت ماشین‌کاری مناسب نیز می‌باشند. در بسیاری از موارد صرفه‌جویی در تولید بر هزینهٔ مواد غیرآهنی غلبه کرده و استفاده از این مواد را به جای فولاد مقرون به صرفه‌تر می‌سازد. از دیدگاه تولید، جوش‌پذیری آلیاژهای غیرآهنی قدری کمتر از فولاد است. البته در اثر پیشرفت‌های اخیر امکان تولید جوش‌های قابل قبول در تمامی فلزات غیرآهنی به وجود آمده است.

دانش افزایی

آلومینیم و آلیاژهای آن

با آنکه آلومینیم تنها حدود ۱۲۰ سال به عنوان یک فلز تجارتی مورد استفاده قرار گرفته ولی پس از فولاد بیشترین مقدار تولید را دارد و بدون شک مهم‌ترین فلز غیرآهنی می‌باشد. اهمیت این فلز در کلیهٔ مسائل اقتصادی جهان مطرح است و در مصارفی چون حمل‌ونقل، سازه، مصارف برقی، ظروف، لوازم مصرفی و تجهیزات مکانیکی کاربرد فراوان پیدا کرده است. همگی با کاربردهایی مانند ظروف پخت و پز، قاب در و پنجره و قوطی‌های نوشیدنی آلومینیم آشنا هستیم. آلومینیم دارای چند ویژگی منحصر به فرد و قابل توجه در میان فلزات مهندسی است. کارپذیری، سبک وزنی، مقاومت در برابر خوردگی و هدایت حرارتی و الکتریکی انعکاس نور و تقریباً عدم محدودیت شکل قطعات نهایی جرم ویژهٔ آلومینیم ۲/۷ است (در مقایسه با عدد ۷/۸۵ برای فولاد) و بنابراین وزن آلومینیم حدود یک سوم وزن فولاد به ازای حجم یکسان آن است. مقایسه‌های قیمتی معمولاً بر مبنای قیمت هر کیلوگرم ماده است که در این صورت آلومینیم چهار تا پنج برابر گران‌تر از فولاد کربنی خواهد بود. اما در بعضی کاربردها مقایسهٔ قیمتی مناسب‌تری بر مبنای واحد حجم وجود دارد و از آنجا که هر کیلوگرم آلومینیم سه برابر هر کیلوگرم فولاد حجم دارد، تفاوت قیمت بسیار کمتر می‌شود.

آلومینیم را می‌توان بارها بدون کاهش کیفیت بازیافت نمود. بازیافت ۹۵ درصد انرژی لازم برای تولید آلومینیم از کانهٔ آن را صرفه‌جویی می‌کند. از دههٔ ۸۰ میلادی، بازیابی کلی آلومینیم بیش از ۵۰ درصد بوده است. قوطی‌های آلومینیمی بیش از

هر نوع دیگر قوطی در آمریکای شمالی بازیافت می‌شوند و بیش از ۸۵ درصد تمام آلومینیم مورد استفاده در خودرو در پایان چرخهٔ عمر مفیدش بازیابی می‌گردد.
احتمالاً مهم‌ترین نقطهٔ ضعف آلومینیم از دیدگاه مهندسی پایین بودن نسبی ضریب کشسانی آن است، که مقدارش تقریباً یک سوم ضریب کشسانی فولاد می‌باشد. در دو طرح مشابه با بارگذاری یکسان میزان خیز قطعهٔ آلومینیمی سه برابر قطعهٔ فولادی است. از آنجا که ضریب کشسانی با آلیاژکردن و عملیات حرارتی تغییر چندانی نمی‌کند، معمولاً لازم است که سفتی سازه در طراحی با عملیاتی مانند چین دادن یا برجسته کردن، تأمین شود. این عملیات به راحتی صورت می‌گیرند، زیرا آلومینیم برای انواع فرایندهای ساخت کاملاً آماده است.

آلومینیم خالص تجارتی

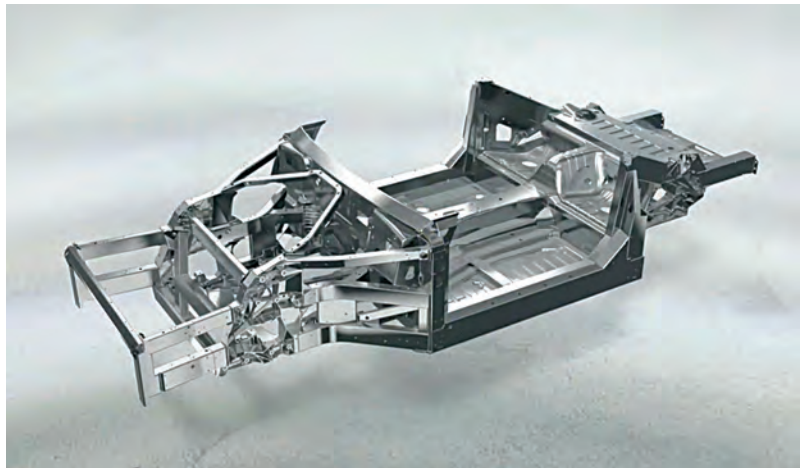
آلومینیم خالص شکل‌پذیر نرم است ولی استحکام آن نسبتاً کم می‌باشد. استحکام آلومینیم تابکاری شده حدود یک پنجم استحکام فولاد ساختمانی نورد گرم شده است. از این قرار آلومینیم خالص تجارتی در درجهٔ اول براساس خواص فیزیکی (نه خواص مکانیکی)اش مورد استفاده قرار می‌گیرد.
آلومینیم نوع‌هادی الکتریکی اهمیت فراوانی دارد و در بسیاری از موارد مانند خطوط انتقال جریان جانشین مس شده است. این مواد که غالباً با حروف EC نمایش داده می‌شوند، حاوی حداقل ۹۹/۴۵ درصد آلومینیم هستند. هدایت الکتریکی آنها به ازای اندازهٔ یکسان سیم حدود ۱۲ درصد هدایت الکتریکی مس، و به ازای وزن یکسان حدود ۲۰۰درصد هدایت الکتریکی مس است.

کاربردهای مکانیکی آلومینیم

آلومینیم غالباً در مصارف غیر الکتریکی به‌صورت آلیاژ استفاده می‌شود. استحکام این آلیاژها به مراتب بیشتر از آلومینیم است و در عین حال دارای مزایای سبک وزنی، هدایت الکتریکی و مقاومت در برابر خوردگی نیز هستند. با اینکه اغلب آنها ضعیف‌تر از فولادند، در مواردی خواص کششی برخی آلیاژها (به جز شکل‌پذیری) بهتر از فولادهای کم آلیاژ ساختمانی با استحکام بالا (HSLA) است. از آنجا که آلیاژها می‌توانند تا سی برابر محکم‌تر از آلومینیم خالص باشند، طراحان ابتدا طرح خود را بهینه کرده و سپس ماده‌ای با خواص مطلوب تهیه می‌کنند. برخی آلیاژهای مشخص برای ریخته‌گری طراحی شده‌اند و برخی دیگر برای محصولات کارشده مناسب‌اند.
بیشتر آلیاژهای آلومینیم از نظر نسبت استحکام به وزن از فولاد مناسب‌تر، اما از نظر سایش، خزش، و خستگی ضعیف‌تر از آن هستند. از آنجا که آلیاژهای آلومینیم غالباً حد تحمل پایینی دارند، معمولاً در اثر خستگی حتی در تنش‌های کم دچار شکست می‌شوند. به‌دلیل نقطهٔ ذوب پایین، آلیاژهای آلومینیم با بالا رفتن دما به سرعت

استحکام خود را از دست می‌دهند و نباید آنها را برای کاربردهایی در دماهای بالاتر از ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۳۰۰ درجه فارنهایت) در نظر گرفت. البته در دماهای زیر صفر، آلومینیم عملاً محکم‌تر از دمای اتاق و بدون کاهش شکل‌پذیری است. هر دو نوع سایش چسبنده و ساینده می‌توانند برای آلیاژهای آلومینیم فوق‌العاده آسیب زننده باشند.

انتخاب فولاد یا آلومینیم برای مورد مصرف مشخص معمولاً به هزینه بستگی دارد. البته در بسیاری از موارد مزایایی چون سبک وزنی و یا مقاومت در برابر خوردگی هزینهٔ نگهداری کم و هدایت الکتریکی و حرارتی بالا مشکل هزینهٔ اضافی را جبران می‌کنند. با انگیزهٔ تولید خودروهای سبک‌تر با مصرف سوخت کمتر، کسر وزنی آلومینیم مورد هدف در کاربردهای حمل‌ونقل از ۱۹/۴ درصد در سال ۱۹۹۲ به ۳۱/۸درصد در سال ۲۰۰۲ رسیده است. استفاده از آلومینیم در خودرو دو برابر و در وسایل ورزشی سه برابر شده است. آلومینیم در قاب‌ها، موتور خودروها، چندراهه‌ها و چرخ‌ها به‌کار گرفته می‌شود. یک قاب سه بعدی آلومینیمی (شکل این صفحه و صفحهٔ بعد) برای فورد GT سال ۲۰۰۵ و کورت Z۰۶ سال ۲۰۰۶ می‌تواند وزن کلی سازه را کاهش، بازیابی را افزایش و تعداد قطعات لازم برای سازهٔ اولیهٔ بدنه را کاهش دهد. قاب فضایی تمام آلومینیمی کوروت Z۰۶ مدل ۲۰۰۶ به کاهش ۳۰ درصدی وزن نسبت به طراحی تمام فولادی مدل پیشین انجامید. در سال ۲۰۰۱، درصد آلومینیم نسبت به پلاستیک در خودرو پیشی گرفت و اکنون تنها پس از فولاد و چدن در ردهٔ دوم است. امروزه یک خودروی متوسط آمریکایی بیش از ۱۲۵ کیلوگرم (۲۸۰ پوند) آلومینیم دارد.



قاب آلومینیمی‌برای فورد GT سال ۲۰۰۵

قاب آلومینیمی کورت Z۰۶ سال ۲۰۰۶

مقاومت آلومینیم و آلیاژهای آن در برابر خوردگی

آلومینیم خالص بسیار فعال است و بلافاصله پس از قرار گرفتن در معرض هوا یک پوشش چسبنده و فشردهٔ اکسید روی آن تشکیل می‌شود. لایهٔ اکسید نسبت به بسیاری از محیط‌ها مقاوم است و مانند سدی مقاوم در برابر خوردگی از فلز زیر پوشش خود محافظت می‌کند. بنابراین مقاومت فلز در برابر خوردگی، همانند فولادهای زنگ نزن ویژگی اکسید سطحی است. در صورت افزودن عناصر آلیاژی به آلومینیم تشکیل اکسید به تعویق می‌افتد، لذا غالباً مقاومت آلیاژهای آلومینیم در برابر خوردگی کمتر از آلومینیم خالص است.

پوشش اکسیدی روی سطح آلیاژهای آلومینیم موجب بروز مشکلاتی در جوش‌کاری آن نیز می‌شود. برای آنکه جوش مقاوم و با استحکام باشد، پوشش اکسیدی باید پیش از جوش‌کاری پاک شود. آلومینیم در فرایندهای جوش ذوبی به سرعت اکسید می‌شود و به‌این دلیل استفاده از گداز آورهای ویژه یا گازهای بی اثر محافظ ضروری است. با اینکه جوش‌کاری آلومینیم دشوارتر از جوش‌کاری فولاد است، فناوری‌های جدید ابداع شده امکان ایجاد جوش‌هایی با کیفیت بالا و مقرون به صرفه را ایجاد کرده‌اند.

سیستم طبقه‌بندی

آلومینیم براساس روش ساخت به دو گروه اصلی آلیاژهای ریختنی و غیرریختنی تقسیم می‌شوند. آلیاژهای کار شده که با تغییر شکل موم‌سان شکل داده می‌شوند و به صورتی طراحی شده‌اند که ویژگی‌های جالبی از جمله استحکام، شکل‌پذیری بالا، مقاومت خوب در برابر شکست و سخت‌شدن کرنشی خوب دارند. از طرف دیگر،

ویژگی‌های جالب آلیاژهای ریختنی شامل نقطهٔ ذوب پایین، روانی بالا و ساختار خواص مناسب است. آشکار است که این ویژگی‌ها کاملاً متفاوت هستند و آلیاژهایی که برای این خاصیت‌ها طراحی شده‌اند هم متفاوت‌اند. در نتیجه، سیستم‌های طبقه‌بندی جداگانه‌ای برای آلیاژهای ریختنی و کارشدهٔ آلومینیم وجود دارد.

آلیاژهای کارشدهٔ آلومینیم

آلیاژهای کارشدهٔ آلومینیم عموماً با استفاده از سیستم استاندارد چهار رقمی آلومینیم مشخص می‌شوند. نخستین رقم نمایانگر عنصر یا عناصر اصلی آلیاژی به شرح جدول ۲۹ است.

جدول ۲۹ ــ سیستم استاندارد چهار رقمی نام‌گذاری آلیاژهای کار شده آلومینیم

عنصر آلیاژی اصلی	
آلومینیم، ۹۹/۰۰٪ و بالاتر	۱xxx
مس	۲xxx
منگنز	۳xxx
سیلیسیم	۴xxx
منیزیم	۵xxx
منیزیم و سیلیسیم	۶xxx
روی	۷xxx
عنصر دیگر	۸xxx

رقم دوم معمولاً صفر است. ارقام غیر صفر بعضی تغییرات آلیاژ پایه را نشان می‌دهند. دو رقم آخر صرفاً نمایانگر هر آلیاژ خاص در هر خانواده است. مثلاً ۲۰۲۴ به معنی آلیاژ شمارهٔ ۲۴ در گروه ۲XXX است. که گروه آلیاژهای مس ـ آلومینیم می‌باشد.
برای سری ۱XXX سه رقم آخر درجهٔ خلوص آلومینیم را نشان می‌دهند.
چهار رقم اول نشانهٔ یک آلیاژ آلومینیم کار شده ترکیب شیمیایی آلیاژ را مشخص می‌کنند. اطلاعات اضافی در مورد وضع آلیاژ با استفاده از سیستم زیر توسط شاخص بازپخت (پسوند حرفی ـ رقمی) معلوم می‌شود:
F: بدون انجام عملیات بعدی

H: سخت‌کردن کرنشی
H_1: سخت‌کردن کرنشی با انجام کار تا رسیدن به ابعاد مطلوب؛ رقم دوم (۱ تا ۹) درجهٔ سختی را مشخص می‌کند. ۸ به معنای کاملاً سخت تجارتی و ۹ به معنای فوق سخت است.
H_2: سخت‌کردن کرنشی با کار سرد و به دنبال آن تابکاری جزیی،
H: سخت‌کردن کرنشی و پایدار کردن
O: تابکاری
T: انجام عملیات حرارتی
T_1: سرد کردن از حالت کار گرم و پیر کردن طبیعی
T_2: سرد کردن از حالت کار گرم، کار سرد، پیر کردن طبیعی
T_3: عملیات حرارتی همراه با حل کردن، کار سرد و پیرکردن طبیعی
T_4: سرد کردن از حالت کار گرم و پیر کردن مصنوعی
T_6: عملیات حرارتی همراه با حل‌کردن و پایدار کردن
T_8: عملیات حرارتی همراه با حل‌کردن کار سرد و پیر کردن مصنوعی
T_9: عملیات حرارتی همراه با حل‌کردن، پیر کردن مصنوعی و کار سرد
T_{10}: سرد کردن از حالت کار گرم، کار سرد، و پیر کردن مصنوعی
W: تنها عملیات حرارتی حل کردن

آلیاژهای کار شده غالباً به دو دستهٔ اصلی تقسیم می‌شوند. آنهایی که استحکام را از طریق محلول جامد و کارسرد به دست می‌آورند و آنهایی که با عملیات حرارتی(پیرسازی) استحکام بخشی می‌شوند. جدول ۳۰ برخی از آلیاژهای کارشدهٔ متداول در هر خانواده را فهرست می‌کند. همان‌گونه که در جدول ۳۰ ملاحظه می‌شود آلیاژهای سخت شونده در اثر کار (نه با سخت‌کردن زمانی) در سری‌های ۱xxx (آلومینیم خام)، ۲xxx (آلومینیم ـ منگنز) و ۵xxx (آلومینیم ـ منیزیم) جای دارند. مقایسهٔ شرایط تابکاری و (پسوند O) و کار سرد شده (پسوند H) مقدار استحکام بخشی قابل حصول از طریق سخت‌شدن کرنشی را می‌رساند.

آلیاژهای سخت شوندهٔ رسوبی بیشتر در دسته‌های ۲xxx، ۶xxx و ۷xxxیافت می‌شوند. با مقایسهٔ خواص در حالت عملیات حرارتی شده و آلیاژهای سخت‌شدهٔ کرنشی، مشاهده می‌شود که عملیات حرارتی به نحو بارزی استحکام بالاتری را به دست می‌دهد. آلیاژ ۲۰۱۷ یا دورالومین اصلی، احتمالاً قدیمی‌ترین آلیاژ آلومینیم پیر سخت شونده است. ویژگی جالب آلیاژهای سری ۲xxx در این است که شکل‌پذیری‌شان در حین عملیات حرارتی استحکام بخشی چندان کاهش نمی‌یابد استحکام برخی آلیاژهای سری ۷xxx مساوی یا بیشتر از فولادهای ساختمانی با استحکام بالاست. در عین حال شکل‌پذیری آنها کمتر از فولاد و تولیدشان نیز دشوارتر از آلیاژهای ۲xxx است. آلیاژهای ۷xxx مصارف فراوانی در هواپیماسازی

نیز پیدا کرده‌اند. آلیاژهای پیرسخت شونده نباید در شرایط سخت‌شدن زمانی خود در دماهای بالاتر از ۱۷۵ درجهٔ سانتی‌گراد (۳۵۰درجه فارنهایت) به‌کار روند.
مقاومت آلیاژهای سخت‌شونده در اثر عملیات حرارتی در برابر خوردگی به دلیل وجود ساختار دو فازی کمتر از آلومینیم خالص یا آلیاژهای کارسخت شوندهٔ تک فازی است. بنابراین در مواردی که استحکام و مقاومت در برابر خوردگی در درجهٔ اول اهمیت هستند، آلومینیم کار شده به‌صورت ورق پوشش شده با آلومینیم خالص تولید می‌شود. برای این منظور قشر نازکی از آلومینیم مقاوم در برابر خوردگی (در حین نورد) به یک یا هر دو سطح آلیاژ با استحکام چسبانده می‌شود و سپس مادهٔ حاصله به‌صورت مرکب مورد عملیات بعدی قرار می‌گیرد.
انجام فرایندهایی چون حدیده‌کاری و آهنگری بر روی آلیاژهای آلومینیم نسبتاً آسان است و امروزه قطعات زیادی از آلومینیم به روش‌های فوق ساخته می‌شوند، زیرا برای کاهش استحکام این مواد دمای متعادل و متوسطی مورد نیاز است. عملیاتی چون کشیدن عمیق و سایر فرایندهای شکل دادن ورق به راحتی انجام‌پذیر هستند. به‌طور کلی شکل‌پذیری زیاد و استحکام تسلیم پایین امکان استفادهٔ مناسب از این آلیاژها را در کلیهٔ فرایندهای شکل دادن به وجود می‌آورند. با انجام عملیات نسبتاً ساده می‌توان خورنده‌ای مناسب و شکل‌های پیچیده‌ای از این قطعات را تولید کرد.
قابلیت ماشین‌کاری آلیاژهای مختلف آلومینیم بسیار متفاوت است و اگر ماشین‌کاری زیاد مورد نیاز باشد ابزارها و روش‌های مخصوص ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. آلیاژهای خوش تراش مانند ۲۰۱۱ برای تولید با ماشین‌های پیچ تراش ساخته شده‌اند. این آلیاژها در سرعت‌های بسیار زیاد قابل ماشین‌کاری‌اند و در بسیاری از موارد جانشین همتای برنجی خود شده‌اند.
آندیزه‌کردن رنگی وسیله‌ای ارزان و جالب توجه در پرداخت سطح فراهم می‌آورد. یک لایهٔ ضخیم اکسید آلومینیم بر روی سطح تشکیل و سپس رنگ دانه‌ها بر روی سطح متخلخل قرار گرفته و با غوطه‌وری در آب داغ درزبندی می‌شوند. نتیجه پرداخت فلزی رنگین است که معمولاً بر روی محصولاتی مانند بدنهٔ دوچرخه‌ها و چوب سافت بال دیده می‌شود.

جدول ۳۰ـ برخی از آلیاژهای کارشدهٔ متداول در هر خانواده از آلیاژهای آلومینیم

آلیاژ(a)	ترکیب شیمیایی(درصد) آلومینیم ـ باقی‌مانده					شکل نمونهٔ آزمایش(b)	استحکام کششی		استحکام تسلیم (C)		ازدیاد طول نمونهٔ ۲ اینچی(٪)	سختی برینل	کاربردها و ویژگی‌ها
	Cu	Si	Mn	Mg	دیگر		ksi	MPa	ksi	MPa			
						آلیاژهای سخت‌شوندهٔ رسوبی بدون قابلیت عملیات حرارتی							
۱۱۰۰ـO	۰/۱۲				۹۹AL	الف	۱۳	۹۰	۵	۳۴	۳۵	۲۳	آلومینیم تجارتی، مناسب برای شکل‌دادن
۱۱۰۰ـH۱۴						الف	۱۶	۱۱۰	۱۴	۹۷	۹	۳۲	مقاومت در مقابل خوردگی، مقاومت تسلیم کم
۱۱۰ـH۱۸						الف	۲۴	۱۶۵	۲۱	۱۴۵	۵	۴۴	لوله و ورق، وسایل آشپزخانه
۳۰۰۳ـO	۰/۱۲					الف	۱۶	۱۱۰	۶	۴۱	۳۰	۲۸	مثل ۱۱۰۰
۳۰۰۳ـH۱۴						الف	۲۲	۱۵۲	۲۱	۱۴۵	۸	۴۰	کمی محکم تر و با شکل‌پذیری کمتر
۳۰۰۳ـH۱۸						الف	۲۹	۲۰۰	۲۷	۱۸۶	۴	۵۵	وسایل آشپزخانه، ورق
۵۰۵۲ـO			۲/۵	۰/۲۵Cr		الف	۲۸	۱۹۳	۱۳	۹۰	۲۵	۴۵	محکم‌ترین آلیاژ قابل سخت‌شدن کرنشی
۵۰۵۲ـH۳۲						الف	۳۳	۲۲۸	۲۸	۱۹۳	۱۲	۶۰	مقاومت تسلیم و حد تحمل زیاد
۵۰۵۲ـH۳۶						الف	۴۰	۲۷۶	۳۵	۲۴۱	۸	۷۳	فراورده‌های ورق
						آلیاژهای سخت‌شوندهٔ رسوبی با قابلیت عملیات حرارتی							
۲۰۱۷ـO	۴/۰	۰/۵	۰/۷	۰/۶		الف	۲۶	۱۷۹	۱۰	۶۹	۲۰	۴۵	دور آلومین، آلیاژ محکم
۲۰۱۷ـT۴						الف	۶۲	۴۲۸	۴۰	۲۷۶	۲۰	۱۰۵	قابل سخت‌شدن به وسیلهٔ تبرید و کهنه‌کردن
۲۰۲۴ـO	۴/۴		۰/۶	۱/۵		الف	۲۷	۱۸۶	۱۱	۷۶	۲۰	۴۲	محکم‌تر از آلیاژ ۲۰۱۷
۲۰۲۴ـT۴						الف	۶۴	۴۴۱	۴۵	۲۹۰	۱۹	۱۲۰	مورد مصرف در ساخت هواپیما
۲۰۱۴ـO	۴/۴	۰/۸	۰/۸	۰/۵		ب	۲۷	۱۸۶	۱۴	۹۷	۱۲	۴۵	آلیاژ محکم برای حدیده‌کاری
۲۰۱۴ـT۶						ب	۶۵	۴۴۸	۵۵	۳۷۹	۱۰	۱۲۵	آلیاژ محکم برای آهنگری
۲۰۱۴ـT۶						الف	۷۰	۴۸۳	۶۰	۴۱۳	۸		نقطهٔ تسلیم بالاتر از آلیاژ ۲۰۲۴ پوشش شده

جدول ۳۰ ـ برخی از آلیاژهای کارشدهٔ متداول در هر خانواده از آلیاژهای آلومینیم

آلیاژ(a)	ترکیب شیمیایی(درصد) آلومینیم ـ باقی‌مانده					شکل نمونهٔ آزمایش(b)	استحکام کششی		استحکام تسلیم (C)		ازدیاد طول نمونهٔ ۲	سختی	کاربردها و ویژگی‌ها
	Cu	Si	Mn	Mg	دیگر		ksi	MPa	ksi	MPa	اینچی(٪)	برینل	
Alclad													
۲۰۱۴_T۶	۴/۵	۱/۰	۰/۸	۰/۴		الف	۶۳	۴۳۴	۵۶	۳۸۶	۷		دارای پوشش مناسب برای عملیات حرارتی (d)
۷۰۷۵_O	۱/۶		۰/۲	۲/۵	۰/۳Cr	الف	۳۳	۲۲۸	۱۵	۱۰۳	۱۷	۶۰	محکم‌ترین آلیاژ
۷۰۷۵_T۶					۵/۶Zn	الف	۷۶	۵۲۴	۶۷	۴۶۲	۱۱	۱۵۰	شکل‌پذیری کمتر از آلیاژ ۲۰۲۴
Alclad													
۷۰۷۵_T۶						الف	۷۶	۵۲۴	۶۷	۴۶۲	۱۱		محکم‌ترین آلیاژ پوشش شده
۷۰۷۵_T۶						ب	۸۰	۵۵۲	۷۰	۴۸۳	۶		محکم‌ترین آلیاژ برای حدیده‌کاری
۶۰۶۱_T۶	۰/۲۸	۰/۶		۱/۰	۰/۲Cr	ب	۴۲	۲۹۰	۴۰	۲۷۶	۱۲	۹۵	غیرقابل سخت‌شدن زمانی در حرارت اتاق
۶۰۶۳_T۶		۰/۴		۰/۷		ت	۳۵	۲۴۱	۳۱	۲۱۴	۱۲	۸۰	مناسب برای شکل‌دادن؛ مقاوم در مقابل خوردگی
۶۱۵۱_T۶		۰/۹		۰/۶	۰/۲۵Cr	پ	۴۸	۳۳۱	۴۳	۲۹۷	۱۷	۹۰	مناسب برای آهنگری‌های خیلی ظریف
۲۰۲۵_T۶	۴/۵	۰/۸	۰/۸			پ	۵۵	۳۷۹	۴۰	۲۷۶	۱۰	۱۰۰	مناسب برای آهنگری؛ ارزان
۲۰۱۸_T۶	۴			۰/۷	۲Ni	پ	۵۵	۳۷۹	۴۰	۲۷۶	۱۰	۱۰۰	استحکام در حرارت‌های زیاد؛ پیستون آهن‌گری شده
۴۰۳۲_T۶	۰/۹	۱۲/۲		۱/۱	۰/۹Ni	پ	۵۵	۳۷۹	۴۶	۳۱۷	۹	۱۱۵	پیستون آهنگری شدهٔ هواپیما
۲۰۱۱_T۳	۵/۵			۰/۵B	۰/۵Pb	ت	۵۵	۳۷۹	۴۳	۲۹۷	۱۵	۹۵	خوش تراش، فراورده‌های ماشین‌های پیچ تراشی

(A) O: تابکاری شده، T: تبرید و پیرشده، H: نورد سرد تا بازپخت شدید.

(b) الف) ورقهٔ $\frac{1}{16}$ اینچی، ب) شکل‌های حدیده‌کاری شدهٔ $\frac{1}{2}$ اینچی، پ: آهنگری، ت) میلهٔ $\frac{1}{2}$ اینچی حدیده کاری شده.

(c) استحکام تسلیم ۰/۲ درصد کرنش.

(d) آلیاژ روکش: ۰/۵ Mn و ۰/۱ Si، iMg

آلیاژهای ریختنی آلومینیم

با اینکه آلومینیم خالص به دلیل پایین بودن نقطهٔ ذوب برای انجام عملیات ریخته‌گری مناسب به‌نظر می‌رسد، اما به ندرت ریخته‌گری می‌شود. انقباض زیاد (حدود ۷ درصد) و در نتیجه حساسیت نسبت به ترک برداشتن ترک‌گرم موجب بروز مشکلات قابل توجه و افزایش قراضه می‌شود. در عین حال با افزودن مقدار کمی از عناصر آلیاژی می‌توان مشخصات ریخته‌گری را اصلاح کرد و استحکام را نیز افزایش داد. آلیاژهای آلومینیم به مقدار قابل توجهی به روش‌های مختلف ریخته می‌شوند. بسیاری از آلیاژهای رایج دارای مقدار کافی سیلیسیم برای تولید واکنش اوتکتیک هستند که ماده‌ای با نقطهٔ ذوب پایین و استحکام ریختگی بالاست. سیلیسیم سیالیت فلز را افزایش می‌دهد، و در نتیجه ریخته‌گری شکل‌های پیچیده و مقاطع نازک را آسان‌تر می‌سازد. لیکن سیلیسیم زیاد موجب تولید مادهٔ ساینده‌ای می‌شود که ماشین‌کاری آن دشوار است. مس، روی و منیزیم دیگر افزوده‌های رایج آلیاژی هستند که باعث تشکیل رسوب‌های کهنگی (پیر سختی) هم می‌شوند.

در جدول ۳۱ چند آلیاژ آلومینیم ریختنی تجارتی به همراه سیستم علامت‌گذاری انجمن آلومینیم ارائه شده است. نخستین رقم بیانگر گروه آلیاژی به صورت جدول زیر است.

فقط اعداد به صورت ۳xxx ارقام دوم و سوم مشخص‌کنندهٔ یک آلیاژ به خصوص و یا درجهٔ خلوص آلومینیم و رقم آخر که به وسیلهٔ ممیز از ارقام دیگر جدا می‌شود، بیانگر شکل محصول (مثلاً ریختگی یا شمش) است. مشخصهٔ اصلاح آلیاژ اولیه به‌صورت حرف و قبل از ارقام دیگر نوشته می‌شود.

جدول ۳۱ـ آلیاژهای مهم ریختنی آلومینیم و سیستم علامت‌گذاری آنها

عنصر آلیاژی اصلی	
آلومینیم، ۹۹/۰۰٪ و بالاتر	1XX.X
مس	2XX.X
منگنز	3XX.X
سیلیسیم	4XX.X
منیزیم	5XX.X
منیزیم و سیلیسیم	6XX.X
روی	7XX.X
عنصر دیگر	8XX.X

و آلومینیم آلیاژهای ریختنی آلومینیم از هر دو دیدگاه خواص و تولید طراحی می‌شوند. در مواردی که استحکام بالا مورد نیاز نیست، خواص پس از ریخته‌گری کافی خواهد بود. آلیاژهایی ریختگی با استحکام زیاد نیازمند عملیات حرارتی بعدی هستند. قطعات ریخته شده در ماسه کمترین محدودیت فرایند را دارند. آلیاژهای آلومینیم ریختنی در قالب دائمی برای داشتن ثابت‌های کمتر انبساط حرارتی یا انقباض طراحی می‌شوند، زیرا قالب از تغییرات ابعادی حین سرد شدن جلوگیری می‌کند.

بسیاری از آلیاژهای ریخته‌گری حدیده‌ای برای استحکام ریختگی بدون عملیات حرارتی و با استفاده از شرایط تبرید سریع ریخته‌گری حدیده‌ای طراحی می‌شوند که باعث ایجاد ساختار ریز دانهٔ اوتکتیک ظریف می‌شود. آلیاژهای تولید شده در قالب‌های دائمی و ریخته‌گری حدیده‌ای دارای استحکام کششی بیش از ۲۷۵مگاپاسکال (۴۰هزار پوند بر اینچ مربع) هستند. در جدول ۳۲ ترکیب و خواص برخی از آلیاژهای ریختنی آلومینیم را مشاهده می‌کنید.

جدول ۳۲ـ ترکیب و خواص برخی از آلیاژهای ریختنی آلومینیم

شناسه آلیاژ	فرایند	درصد عناصر عمده (بیش از ۱ درصد)						بازپخت	استحکام کششی		ازدیاد طول نمونهٔ ۲ اینچی (٪)	کاربردها و ویژگی‌ها
		Cu	Si	Mg	Zn	Fe	دیگر		ksi	MPa		
(a)	(b)											
۲۰۸	S	۴/۰	۳/۰		۱/۰	۱/۲		F	۱۹	۱۳۱	۱/۵	کاربردهای عمومی ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای، قابل عملیات حرارتی
۲۴۲	S,P	۴/۰		۱/۶		۱/۰	۲/۰Mo	T۶۱	۴۰	۲۷۶	–	مقاوم در دمای بالا
۲۹۵	S	۴/۵	۱/۰			۱/۰		T۶	۳۲	۲۲۱	۳/۰	ریخته گری ساده، قابل عملیات حرارتی
۲۹۶	P	۴/۵	۲/۵			۱/۲		T۶	۳۵	۲۴۱	۲/۰	مانند ۲۹۵ اما با قالب دائمی
۳۰۸	P	۴/۵	۵/۵		۱/۰	۱/۰		F	۲۴	۱۶۶	–	کاربردهای عمومی قالب دائمی
۳۱۹	S,P	۳/۵	۶/۰		۱/۰	۱/۰		T۶	۳۱	۲۱۴	۱/۵	مشخصات ریخته‌گری بهتر
۳۵۴	P	۱/۸	۹/۰					–	–	–	–	محکم، هواپیماسازی
۳۵۵	S,P	۱/۳	۵/۰					T۶	۳۲	۲۲۱	۲/۰	محکم و قابلیت آب‌بندی
C۳۳۵	S,P	۱/۳	۵/۰					T۶۱	۴۰	۲۷۶	۳/۰	محکم‌تر و شکل‌پذیرتر از ۳۳۵
۳۵۶	S,P		۷/۰					T۶	۳۰	۲۰۷	۳/۰	قابلیت ریخته‌گری بسیار خوب و استحکام در برابر ضربه
A۳۵۶	S,P		۷/۰					T۶۱	۳۷	۲۵۵	۵/۰	محکم‌تر و بسیار شکل‌پذیرتر از ۳۵۶
۳۵۷	S,P		۷/۰					T۶	۴۵	۳۱۰	۳/۰	نسبت استحکام ـ وزن زیاد
۳۵۹	S,P		۹/۰					–	–	–	–	محکم، هواپیماسازی
۳۶۰	D		۹/۵			۲/۰		F	۴۴[d]	۳۰۳	۲/۵[d]	مقاومت در برابر خوردگی و استحکام خوب
۳۶۰	D		۹/۵			۲/۰		F	۴۶[d]	۳۱۷	۳/۵[d]	مشابه ۳۶۰
A۳۸۰	D	۳/۵	۸/۵		۳/۰	۲/۰		F	۴۶[d]	۳۱۷[d]	۲/۵	استحکام و سختی بالا

ادامه جدول ۳۲

شناسه آلیاژ	فرایند	درصد عناصر عمده (بیش از ۱ درصد)						بازپخت	استحکام کششی		ازدیاد طول نمونهٔ ۲اینچی	کاربردها و ویژگی‌ها
		Cu	Si	Mg	Zn	Fe	دیگر		ksi	MPa		
(a)	(b)											
A۳۸۰	D	۳/۵	۸/۵		۳/۰	۱/۳		F	۴۷[d]	۳۲۴	۳/۵[d]	مشابه ۳۸۰
۳۸۳	D	۱/۵	۱۰/۵		۳/۰	۱/۳		F	۴۵[d]	۳۱۰	۳/۵[d]	استحکام و سختی بالا
۳۸۴	D	۳/۷۵	۱۱/۳		۱/۰	۱/۳		F	۴۸[d]	۳۳۱	۲/۵	استحکام و سختی بالا
۴۱۳	D	۱/۰	۱۲/۰			۲/۰		F	۴۳[d]	۲۹۰	۲/۵[d]	کاربردهای عمومی، قابلیت ریخته‌گری خوب
A۴۱۳	D	۱/۰	۱۲/۰	F	۱/۳		۴۲[d]	۲۹۰	۳/۵[d]			مشابه ۴۱۳
۴۴۳	D	۵/۲۵			۲/۰	F	۳۳[d]	۲۲۸	۹/۰[d]			کاربردهای عمومی، قابلیت ریخته‌گری خوب
B۴۴۳	S,P	۵/۲۵			۲/۰	F	۱۷	۱۱۷	۳/۰			آلیاژهای ریختگی برای کاربردهای عمومی
۵۱۴	S			۴۰/				F	۲۲	۱۵۲	۶/۰	مقاومت در برابر خوردگی بسیار بالا
۵۱۸	D		۸۰۰	۱/۸	F	۴۵[d]	۳۱۰	۵/۰[d]				مقاومت در برابر خوردگی، استحکام و چقرمگی مناسب
۵۲۰	S			۱۰/۰				T۴	۴۲	۲۹۰	۱۲/۰	استحکام زیاد و شکل‌پذیری مناسب
۵۳۵	S			۶/۹		F	۳۵	۲۴۱	۹/۰			مقاومت در برابر خوردگی و قابلیت ماشین‌کاری مناسب
۷۱۲	S			۵/۸		F	۳۴	۲۳۴	۴/۰			خواص مناسب بدون عملیات حرارتی
۷۱۳	S,P			۷/۵	۱/۱	F	۳۲	۲۲۱	۳/۰			مشابه ۷۱۲
۷۷۱	S			۷/۰		T۶	۴۲	۲۹۰	۵/۰			قطعات هواپیما و رایانه
۸۵۰	S,P	۱/۰				T۵	۶/۳Sn ۱/۰Ni	T۵	۱۶	۱۱۰	۵/۰	آلیاژ یاتاقان

(a) انجمن آلومینیم (b) S= ریخته‌گری در ماسه؛ P= قالب دائمی و D= ریخته‌گری حدیده‌ای. (c) حداقل مقدار مگر آنکه اشاره شده باشد. (d) مقادیر معمول

آلیاژهای آلومینیم ـ لیتیم

لیتیم سبک‌ترین فلز است و در جست‌وجو برای یافتن آلیاژهای آلومینیم با خواص استحکامی بالاتر، سخت پایی (سفتی) بیشتر و وزن کمتر، آلیاژهای آلومینیم ـ لیتیم به‌عنوان مادهٔ مطلوب برای کاربردهای مهندسی هوا ـ فضا ظهور کرده‌اند. افزودن هر یک درصد لیتیم (تا مرز ۴ درصد) موجب کاهش وزن به میزان ۳ درصد و افزایش سخت پایی به میزان ۶ درصد می‌شود. تاکنون آلیاژهایی با ۸ تا ۱۰ درصد چگالی کمتر، ۱۵ تا ۲۰ درصد سخت پایی بیشتر و استحکامی برابر با استحکام آلیاژهای موجود و مقاومت مناسب در برابر پیش‌رفت ترک خستگی ساخته شده‌اند. اما چقرمگی شکست، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر تنش خوردگی آنها معمولاً ضعیف‌تر از آلیاژهای مرسوم است.

در سال‌های اخیر، آلیاژهای آلومینیم مرسوم ۸۰ درصد وزن هواپیماهای تجاری را تشکیل می‌دهند. حتی درصد کمی کاهش وزن می‌تواند قابل توجه باشد. بهبود استحکام و سخت پایی می‌تواند کاهش وزن را تسهیل نماید. کاهش مصرف سوخت بر عمر هواپیما می‌تواند هرگونه هزینهٔ اضافی را جبران کند.

کف آلومینیم (اسفنج آلومینیمی)

ماده‌ای را که با نام «کف پایداری شدهٔ آلومینیم» شناخته می‌شود می‌توان از طریق اختلاط ذرات سرامیکی با آلومینیم مذاب و دمش گاز در این مخلوط تولید کرد. حباب‌ها در حین انجماد باقی می‌مانند و ساختاری حاصل می‌گردد که شبیه استیروفوم فلزیست. پس از تولید اولیهٔ این ماده در سال ۲۰۰۰ برای کاربردهای خودرو، هوافضا و نظامی، اکنون کاربردهای دیگری در معماری و طراحی پیدا کرده است. نسبت استحکام به وزن آن قابل ملاحظه است و جذب انرژی عالی از خود نشان می‌دهد. پیل‌های سوختی خودروهای مسابقه با کف آلومینیم پوشانده شده و کف پرکننده بین جلو و اتاقک راننده قرار می‌گیرد. سازه‌های لوله‌ای را می‌توان با کف پر نمود تا استحکام و جذب انرژی افزایش یابد و مقاومت به شکست فراهم گردد. کاربردهای دیگری نیز بر عایق حرارتی بودن عالی، جذب ارتعاش و صدا که از تعداد زیاد بسته‌های هوای گیر افتاده ناشی می‌شود تکیه دارند.

جلسه دوازدهم موضوع: معرفی مس و آلیاژهای آن

هدف: نام‌گذاری آلیاژهای مس و کاربردهای آنها

دانش افزایی

مس و آلیاژهای آن

خواص و مشخصات کلی: مس یکی از مهم‌ترین فلزات مهندسی‌است و بیش از ۱۰۰۰ سال است که مورد استفادهٔ بشر قرار گرفته است. مس به‌عنوان ستون فقرات صنعت برق محسوب می‌شود. به‌علاوه، عنصر اصلی در چند آلیاژ فوق‌العاده مهم مهندسی مانند برنج‌ها و برنزها نیز به‌شمار می‌آید. در مقایسه با سایر مواد مهندسی، مس و آلیاژهای آن سه ویژگی مهم زیر را دارا هستند. (۱) هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، (۲) استحکام مفید با شکل‌پذیری زیاد، و (۳) مقاومت در برابر خوردگی در مقابل اکثر محیط‌ها. مسلماً هدایت عالی دلیل کاربرد آن در صنایع برقی است و در حدود $\frac{۱}{۳}$ مس تولید شده به مصارف الکتریکی می‌رسد، مانند جابه‌جاگر (کموتاتور)هایی که در شکل ۲ نشان داده شده است. دیگر حوزه‌های وسیع کاربرد عبارت‌اند از لوله‌کشی، گرمایش و تهویهٔ مطبوع.

مس خالص در حالت تابکاری شده دارای استحکام کششی حدود ۲۰۰ مگاپاسکال (۳۰ هزار پوند بر اینچ مربع) و افزایش طول تقریبی ۹۰ درصد است. در عین حال در اثر انجام کار سرد استحکام کششی فلز تا ۴۵۰ مگاپاسکال (۹۵ هزار پوند بر اینچ‌مربع) افزایش یافته، و افزایش طول آن تا حد ۵ درصد کاهش می‌یابد. مس به دلیل پایین بودن نسبی استحکام و بالا بودن شکل‌پذیری‌اش، مناسب‌ترین فلز برای شکل دادن است. به‌علاوه، اثرات سخت شوندگی در اثر کار سرد به‌راحتی قابل حذف است، زیرا دمای تبلور مجدد مس کمتر از ۵۰۰ درجه فارنهایت (۲۳۰ درجهٔ سانتی‌گراد) است. گسترهٔ عملیات ساخت، شامل ریخته‌گری، ماشین‌کاری و جوشکاری روی مس و آلیاژهای مس به‌راحتی انجام می‌شود.

متأسفانه مس سنگین‌تر از آهن است. علی‌رغم استحکام بالا، نسبت استحکام به وزن برای آلیاژهای مس معمولاً کمتر از آلیاژهای ضعیف‌تر آلومینیم و منیزیم است. به‌علاوه، مشکلات چندی به هنگام استفاده از مس در دماهای بالا به‌وجود می‌آید. آلیاژهای مس با گرم کردن در دمای ورای ۲۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۴۰۰ درجه فارنهایت) نرم می‌شوند و اگر مس برای مدت طولانی در دمای بالا در حالت تنش قرار گیرد، شکست درون بلوری در تنشی در حدود نصف میزان استحکامش در دمای اتاق رخ می‌دهد. با وجود اینکه مس و آلیاژهای آن مقاومت خوبی نسبت به سایش چسبندگی دارند اما از لحاظ ویژگی‌های سایشی در اثر ذرات ساینده ضعیف هستند.

مس و آلیاژهای مس مصارف الکتریکی فراوانی دارند مانند کاربرد آنها در کموتاتورهای الکتریکی

البته خواص مس در دمای پایین کاملاً قابل توجه است. استحکام با کاهش دما افزایش می‌یابد و ماده ترد نمی‌شود و در نتیجه حتی در شرایط دمای خیلی پایین (دمای نیتروژن مایع) نیز نرمی قابل توجهی را حفظ می‌کند. هدایت نیز با پایین آمدن دما بالا می‌رود. مس و آلیاژهای مس به خوبی تحت تأثیر روش‌های استحکام بخشی قرار می‌گیرند به‌طوری که قوی‌ترین آلیاژهای آن ۱۵ تا ۲۰ برابر از ضعیف‌ترین آنها مستحکم‌ترند. به دلیل بازهٔ وسیع خواص می‌توان اغلب آن را در نیازهای طراحی جفت‌وجور کرد. سخت‌پایی کش‌سان آن بین ۵۰ تا ۶۰ درصد فولاد است. ویژگی‌های دیگر آن عبارت‌اند از: غیر مغناطیسی بودن، غیر آتش‌گیر بودن و عدم تعفن زیستی (جلوگیری از رشد، ارگانیسم‌های دریایی)، همچنین بازهٔ وسیع رنگ از جمله زرد، قرمز، قهوه‌ای و نقره‌ای.

مس خالص تجارتی

اگر مس تصفیه شده حاوی ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ درصد اکسیژن (ناخالصی اصلی در مس) باشد مس چقرمهٔ الکترولیتی نام دارد غالباً این فلز به‌عنوان مبنای آلیاژهای مس و یا در مصارف برقی مانند سیم و کابل، در مواردی که بالاترین هدایت الکتریکی مورد نیاز نیست، به‌کار می‌رود. با تصفیهٔ بیشتر مس از طریق کاهش مقدار اکسیژن، مس بدون اکسیژن با هدایت الکتریکی بالا (OFFIC) تولید می‌شود. مس‌های هادی ترازهای بهتر امروزی قابلیت هدایت ۱۰۲ درصد استاندارد IACS را دارند که بیانگر پیشرفت‌های متالورژیکی حاصل از سال ۱۹۱۳ است که استاندارد مس تابکاری شدهٔ بین‌المللی (IACS) تدوین شده و هدایت مس خالص صد در صد IACS تعیین شد.

آلیاژهای پایهٔ مس

مس به‌عنوان یک فلز خالص، به جز در مصارف الکتریکی کاربرد گسترده‌ای در محصولات فراوری شده ندارد و حتی در اینجا نیز افزوده‌های آلیاژی مانند نقره آرسنیک، کادمیم و زیرکنیم برای افزایش خواص مختلف بدون لطمهٔ قابل توجه به هدایت آن به‌کار می‌روند. مس در بیشتر موارد فلز پایه برای بعضی از آلیاژهاست، که به آنها شکل‌پذیری، مقاومت در برابر خوردگی و هدایت گرمایی و الکتریکی می‌دهد. انواع متنوع خواص مکانیکی در گستره‌ای از مس خالص که نرم و شکل‌پذیر است تا آلیاژهایی که خواص آنها در حد فولادهای تبرید و باز پخت شده‌اند، مشاهده می‌شود. آلیاژهای پایهٔ مس عموماً توسط اعداد استاندارد مؤسسهٔ توسعهٔ مس (CDA) مشخص می‌شوند. جدول ۳۳ جزئیات این سیستم را که توسط انجمن آمریکایی آزمایش و مواد (ASTM) انجمن مهندسان اتومبیل (SAE) و دولت ایالت متحده استفاده می‌شود، آلیاژهای با شمارهٔ ۱۰۰ تا ۱۹۹ دارای کمتر از ۲ درصد مواد آلیاژی هستند. اعداد ۲۰۰ تا ۷۹۹ آلیاژهای کار شده‌اند. (عبارت کار شده به معنای شکل یافته یا ساخته شده در حالت جامد است.) خواص کلیدی مادهٔ کار شده به‌طور کلی به شکل‌پذیری آن مربوط است. آلیاژهای ریختگی در حالت مایع شکل داده می‌شوند که در این حالت مشخصه‌های مورد علاقه دمای ذوب کم، سیالیت بالا و استحکام ریختگی مناسب است. اعداد از ۸۰۰ تا ۹۰۰ همگی آلیاژهای ریختنی هستند. هنگامی که این اعداد به اعداد سیستم یکسان شده برای فلزات و آلیاژها تبدیل شوند، اعداد سه رقمی دو صفر در سمت راستشان به اعداد پنج رقمی تغییر پیدا می‌کنند و حرف C که در ابتدا اضافه می‌شود، نشانهٔ پایهٔ مس است.

آلیاژهای مس ـ روی

بی‌شک روی، متداول‌ترین عنصر آلیاژی مس است. آلیاژهای مس و روی به‌طور کلی به نام برنج مشهورند. در صورتی که مقدار روی برنج از ۳۹ درصد تجاوز نکند، محلول جامد تک فاز است. این آلیاژها غالباً به نام برنج‌های آلفا موسومند، زیرا ساختار آنها با فاز آلفا مشخص می‌شود. نرمی و شکل‌پذیری از خواص این آلیاژهاست که با افزایش مقدار روی تا حدود ۳۹ درصد افزایش می‌یابند. به دلیل شکل‌پذیری خوب ساختار مکعب مرکزدار، برنج آلفا را می‌توان با کارسرد سخت کرد. برنج‌ها با انواع درجهٔ سختی به صورت تجارتی در بازار یافت می‌شوند. برنج پوکه که آلیاژی حاوی ۷۰ درصد مس و ۳۰ درصد روی است، بهترین ترکیب کلی استحکام و تردی را دارد و برای عملیات ورقه‌سازی مانند کشیدن عمیق کاملاً مناسب است.

بیشتر کاربردهای برنج، مربوط به خواص هدایت الکتریکی و حرارتی همراه با استحکام مهندسی خوب آن است. گسترهٔ وسیع رنگ‌ها شامل قرمز، نارنجی، زرد، نقره‌ای و سفید را که می‌توان با افزایش عنصر آلیاژی سوم به‌دست آورد، در کاربردهای تزئینی

مورد توجه قرار می‌گیرد. قابلیت آبکاری برنج فوق‌العاده خوب است و به‌عنوان مبنای قطعات تزئینی با کرم یا پوشش‌های مشابه محسوب می‌شود. ویژگی منحصر به فرد برنج آلفا این است که بدون هیچ‌گونه عملیات اضافی (به جز پاک کردن) می‌تواند به لاستیک بچسبد و آن را در خود ولگانیزه کند. در نتیجه برنج مصارف زیادی در محصولات مکانیکی پلاستیکی پیدا کرده است.

جدول ۳۳ـ استانداردهای مس و آلیاژهای آن (سیستم CDA)

آلیاژهای غیر ریختنی		آلیاژهای ریختنی	
۱۰۰ـ۱۵۵	مس‌های تجارتی	۸۳۳ـ۸۳۸	برنج‌های قرمز و قرمز سرب‌دار
۱۶۲ـ۱۹۹	آلیاژهای پرمس	۸۴۲ـ۸۴۸	برنج‌های نیمه قرمز و نیمه قرمز سرب‌دار
۲۰۰ـ۲۹۹	آلیاژهای مس ـ روی (برنج‌ها)	۸۵۲ـ۸۵۸	برنج‌های زرد و زرد سرب‌دار
۳۰۰ـ۳۹۹	آلیاژهای مس ـ روی ـ سرب	۸۶۱ـ۸۶۸	برنزهای منگنز و منگنزی سرب‌دار
	(برنج‌های سرب‌دار)	۸۷۲ـ۸۷۹	برنزهای سیلیسیم‌دار و برنج‌های سیلیسیم‌دار
۴۰۰ـ۴۹۹	آلیاژهای مس ـ روی ـ قلع (برنج‌های قلع)	۹۰۲ـ۹۱۷	برنزهای قلع‌دار
۵۰۰ـ۵۲۹	آلیاژهای مس ـ قلع (برنزهای فسفر)	۹۲۲ـ۹۲۹	برنزهای قلع‌دار و سرب‌دار
۵۳۲ـ۵۴۸	آلیاژهای مس ـ قلع ـ سرب	۹۳۲ـ۹۴۹	برنزهای قلع ـ نیکل
	(برنزهای فسفر و سرب‌دار)	۹۴۷ـ۹۴۹	برنزهای قلع ـ نیکل
۶۰۰ـ۶۴۲	آلیاژهای مس‌ـآلومینیم (برنزهای آلومینیم)	۹۵۲ـ۹۵۸	برنزهای آلومینیم
۶۶۷ـ۶۹۹	آلیاژهای مس ـ روی		
۷۰۰ـ۷۲۵	آلیاژهای مس ـ نیکل	۹۷۳ـ۹۷۸	برنزهای نیکلی سرب‌دار
۷۳۲ـ۷۹۹	آلیاژهای مس ـ نیکل ـ روی (ورشوها)		

مقاومت غالب برنج‌ها در برابر خوردگی مناسب است. افزودن مقدار کمی قلع به آلیاژ حاوی صفر تا ۴۰ درصد روی مقاومت آن را در برابر آب دریا به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. با افزودن قلع، برنج پوکه به برنج دریاداری، و فلز مونتر به برنج دریایی مبدل می‌شود. البته هنگامی که برنج‌هایی با مقدار روی ۲۰ تا ۳۶ درصد در محلول اسیدی یا نمک قرار می‌گیرند، تحت تأثیر خوردگی ویژه‌ای به نام روی‌زدایی واقع می‌شوند. مشکل دیگر در مورد برنج‌هایی با بیش از ۱۵ درصد روی، ترک خوردگی فصلی یا ترک‌خوردگی در اثر خوردگی تحت تنش است. وجود تنش و محیط خورنده عوامل اصلی این پدیده به‌شمار می‌آیند. (تنش‌های پس ماند و رطوبت جوی نیز ممکن است برای این کار کافی باشند.) در نتیجه، غالب برنج‌ها پیش از آنکه مورد مصرف قرار گیرند تحت فرایند تنش‌زدایی واقع می‌شوند تا تنش‌های پس ماند تولید شده در اثر کار سرد قبل از قرار گرفتن در شرایط کار از بین بروند.

در مواردی مانند قطعهٔ خام مورد مصرف در ماشین پیچ تراش خودکار که قابلیت ماشین‌کاری بالا مورد نیاز است، افزودن ۲ تا ۳ درصد سرب به برنج موجب تولید براده‌های کوچک می‌شود. آلیاژهای ریختنی برنج برای تولید اتصالات لوله‌کشی شیرهای فشار پایین و انواع لوازم تزئینی به‌کار می‌روند. آلیاژ حاوی ۵۰ تا ۵۵ درصد مس و ۴۵ تا ۵۰ درصد روی به‌عنوان فلز پرکننده در زردجوشکاری (لحیم‌کاری سخت) مورد استفاده قرار می‌گیرند. این آلیاژ عامل مهمی برای اتصال فولاد، چدن، برنج و مس به‌شمار می‌آید و اتصال به‌وجود آمده از نظر استحکام مشابه با اتصال جوش است.

جدول ۳۴ چند آلیاژ متداول مس ـ روی را به همراه ترکیب شیمیایی، خواص و مصارف متعارف آنها نشان می‌دهد.

آلیاژهای مس ـ قلع

از آنجا که قلع گران‌تر از روی است، آلیاژهای مس و قلع که عموماً به نام برنز قلع موسومند، معمولاً هنگامی که خواص ویژه‌ای از خود نشان می‌دهند، به‌کار گرفته می‌شوند. واژهٔ برنز کمی نارسا به‌نظر می‌رسد، زیرا در مورد تمام آلیاژهای مسی که افزودنی اصلی آنها نه روی و نه نیکل است، به‌کار می‌رود. برای روشن‌تر شدن موضوع، افزودهٔ آلیاژی اصلی همراه نام برنز می‌آید.

برنزهای قلع حقیقی حاوی کمتر از ۱۲ درصد قلع هستند (با افزودن قلع تا حدود ۲۰ درصد استحکام آلیاژ افزایش می‌یابد و اگر مقدار قلع بیشتر از آن باشد، آلیاژ ترد می‌شود). استحکام، چقرمگی، دیرسایی و مقاومت در برابر خوردگی مشخصات اصلی آلیاژهای مس ـ قلع است. این آلیاژها در مصارفی چون یاتاقان‌ها، چرخ‌دهنده‌ها و اتصالاتی که تحت تأثیر بار فشاری زیاد قرار دارند به‌کار می‌روند. آلیاژ مس ـ قلع مورد استفاده در یاتاقان معمولاً حاوی ۱۰ درصد سرب است.

برنز فسفردار معمول ترین برنز غیرریختنی و معمولاً حاوی ۱ تا ۱۱ درصد قلع است آلیاژ ۵۲۱ (CDA) نمونهٔ بارز این دسته است و حاوی ۸ درصد قلع می‌باشد. ورقهٔ سخت این آلیاژ دارای استحکام کششی ۷۶۰ مگاپاسکال (۱۱۰ هزار پوند بر اینچ مربع) و افزایش طول ۳ درصد است، در حالی که استحکام کششی و افزایش طول ورقهٔ نرم به ترتیب ۳۸۰ مگاپاسکال (۵۵ هزار پوند بر اینچ مربع) و ۶۵ درصد می‌باشد. از این آلیاژ در پمپ‌ها، چرخ‌دنده‌ها، فنرها و یاتاقان‌ها استفاده می‌شود.

جدول ۳۴ـ ترکیب شیمیایی، خواص و مصارف چند آلیاژ متداول مس ـ روی

عدد CDA	نام تجارتی	ترکیب، درصد				حالت	استحکام کششی		افزایش طول نمونه ۲ اینچی درصد	کاربرد متعارف
		مس	روی	قلع	سرب	منگنز	MPa	Ksi		
۲۷۰	برنج زرد	۶۵	۳۵				۳۱۷	۴۶	۶۴	
						سخت	۵۲۴	۷۶	۷	فنرها، پیچ
۲۶۰	برنج پوکه	۷۰	۳۰				۳۶۵	۵۳	۵۴	
						سخت	۵۲۴	۷۶	۷	لوله
						فنر	۶۳۴	۹۲	۳	لوله‌های داخل رادیاتور
										فرایند شکل دادن سرد
۳۶۰	برنج پیچ	۶۱/۵	۳۵/۵		۳	نرم	۳۲۴	۴۷	۶۰	قطعات پیچ و مهرهٔ ماشین‌آلات
						سخت	۴۲۷	۶۲	۲۰	
۲۲۰	برنز تجارتی	۹۰	۱۰			ورق نرم	۲۶۲	۳۸	۴۵	پیچ، یراق‌آلات، تورهای سیمی
						ورق سخت	۴۴۱	۶۴	۴	زیور آلات
						فنر	۵۰۳	۷۳	۳	
۲۴۰	برنج کم روی	۸۰	۲۰			ورق تابانده	۳۲۴	۴۷	۴۷	فرایندهای کشیدن، کارهای ساختمانی
						سخت	۵۱۷	۷۵	۷	زیور آلات
						فنر	۶۲۷	۹۱	۳	پوکه فشنگ، خشاب، آلات موسیقی
۶۷۵	برنز منگنز	۵۸/۵	۳۹	۱		۰/۱ نرم	۴۴۸	۶۵	۳۳	پروانه‌های محکم، میلهٔ شیر
						میلهٔ نیمه سخت	۵۷۹	۸۴	۱۹	صفحه کلاچ، محور پمپ
۴۴۳ـ۴۴۵	فلز دریاداری	۷۱	۲۸	۱		نرم	۳۱۰	۴۵	۶۰	لوله‌های کندانسورو
						سخت	۶۵۵	۹۵	۵	مبادله‌کن‌های حرارتی
۲۸۰	فلز مونتز	۶۰	۴۰			نورد گرم	۳۷۲	۵۴	۴۵	کارهای ساختمانی
						نورد سرد	۵۵۱	۸۰	۵	لوله‌های کندانسور

آلیاژ ۹۰۵، ۱۰ درصد قلع و ۲ درصد روی دارد. استحکام کششی و افزایش طول آن در شرایط ریختنی به ترتیب ۳۱۰ مگاپاسکال (۴۵ هزار پوند بر اینچ مربع) و ۴۵ درصد است. مقاومت این آلیاژ در برابر خوردگی آب دریا بسیار خوب است و در کشتی‌ها برای اتصال لوله‌ها، چرخ‌دنده‌ها، قطعات پمپ، بوش‌ها و یاتاقان‌ها استفاده می‌شود.
برنزها می‌توانند با مخلوط کردن پودر مس و روی و عمل آوردن از طریق گرد فلزکاری هم به دست آیند. محصول متخلخل نهایی در صافی‌هایی که در دمای بالا به‌کار می‌رود یا در محیط خورنده می‌تواند به‌کار رود، و یا می‌توان برای تولید یاتاقان‌های خود روان کار در آن روغن رسوخ داد.

آلیاژهای مس ـ نیکل

مس و نیکل در حالت جامد حلالیت کامل دارند و آلیاژهای متنوعی از آنها تهیه شده است. ویژگی‌های کلیدی شامل هدایت گرمایی و استحکام در دمای بالا همراه با مقاومت به خوردگی در برابر مواد مختلفی از جمله آب دریاست. خواص دیگری مثل مقاومت بالا در برابر ترک خوردگی تنشی و غیره، امکان استفادهٔ مطلوب از این مواد را در مبادله‌کن‌های حرارتی، لوازم آشپزی و دیگر مصارف انتقال حرارت به‌وجود می‌آورد. کوپرونیکل‌ها حاوی ۲ تا ۳۰ درصد نیکل هستند. ورشوها ۱۰ تا ۳۰ درصد نیکل و حداقل ۵ درصد روی دارند. جلای نقره‌ای آنها باعث کاربردشان در مصارف تزئینی شده و برای ابزار موسیقی هم به‌کار می‌روند. کنستانتان و مونل به ترتیب آلیاژهایی با محتوای ۴۵ و ۶۷ درصد نیکل هستند. مونل بعد به‌عنوان آلیاژ نیکل مورد بحث قرار می‌گیرد.

دیگر آلیاژهای پایهٔ مس

آلیاژهای نام برده در قسمت‌های گذشته استحکام خود را در درجهٔ اول از طریق سخت شوندگی با محلول جامد و کار سرد به‌دست می‌آورند. سه عنصر آلیاژی در خانوادهٔ آلیاژهای مس موجب ایجاد خاصیت سخت شوندگی رسوبی می‌شوند: آلومینیم، سلیسیم و بریلیم.
آلیاژهای برنز آلومینیم بیشتر به علت دو خاصیت استحکام بالا و مقاومت مناسب در برابر خوردگی‌شان شناخته شده‌اند و معمولاً از نظر قیمت جایگزین مؤثری برای فولاد زنگ نزن و آلیاژهای پایهٔ نیکل هستند. آلیاژهای کار شده می‌توانند در اثر محلول جامد یا به وسیلهٔ کار سرد و رسوب آهن یا فازهای پرنیکل استحکام یابند. اگر مقدار آلومینیم کمتر از ۸ درصد باشد، آلیاژها بسیار شکل‌پذیر می‌شوند. وقتی مقدار آلومینیم از ۹ درصد بیشتر شود از شکل‌پذیری کاسته شده و مقدار سختی به سختی فولاد نزدیک می‌گردد. افزودن مقدار آلومینیم بیشتر، موادی ترد اما با مقاومت سایشی بسیار خوب نتیجه می‌دهد. با تغییر مقدار آلومینیم و عملیات حرارتی، استحکام کششی بین ۴۱۵ تا ۱۰۰۰ مگاپاسکال (۶۰ تا ۱۴۵ هزار پوند بر اینچ‌مربع) تغییر می‌کند. کاربردهای

نمونه وار شامل ابزارهای دریایی، میل گاردان کشتی، یاتاقان‌ها، پمپ و اجرای سوپاپ برای شرایط کار با آب دریا، آب ترش معدن و مایعات مختلف صنعتی است. آلیاژهای ریختنی برای کاربردهایی که ریخته‌گری روش تولید برتر است به‌کار می‌روند. از آنجا که برنزهای آلومینیم مقدار زیادی انجماد انقباضی دارند، در ریخته‌گری باید به این مطلب توجه نمود.

برنزهای سیلیسیم حاوی تا ۴ درصد سیلیسیم و ۱/۵ درصد روی هستند (مقدار روی در مورد قطعات ریختگی بیشتر است). استحکام شکل‌پذیری قابلیت ماشین‌کاری و مقاومت در برابر خوردگی از ویژگی‌های این آلیاژها هستند. استحکام کششی بین شرایط نرم در حدود ۳۸۰ مگا پاسکال (۵۵ هزار پوند بر اینچ مربع) تا مقدار بیشینهٔ ۹۰۰ مگاپاسکال (۱۳۰ هزار پوند بر اینچ مربع) تغییر می‌کند. از این آلیاژ در مصارفی چون دیگ‌های بخار، مخازن و اجاق‌ها که در آن ترکیبی از خواص استحکام زیاد و مقاومت در برابر خوردگی مورد نیاز است، استفاده می‌شود.

دانش افزایی برای مطالعه بیشتر

منیزیم و آلیاژهای آن

خواص و مشخصات کلی: منیزیم با جرم ویژهٔ ۱/۷۴ (دو سوم جرم ویژهٔ آلومینیم و یک چهارم جرم ویژهٔ فولاد و فقط کمی سنگین‌تر از پلاستیک‌های تقویت شده) سبک‌ترین فلز مهم تجارتی است، منیزیم مانند آلومینیم در حالت خالص نسبتاً ضعیف است و بیشتر به شکل آلیاژ استفاده می‌شود. در عین حال در حالت آلیاژی نیز دارای خواص ضعیف، سایشی، خزشی و خستگی است. منیزیم بیشترین انبساط حرارتی را در بین فلزات مهندسی دارد. هنگامی که دما به بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (۲۰۰ درجه فارنهایت) می‌رسد، استحکامش کاهش می‌یابد، بنابراین نباید منیزیم را برای کاربردهای دمای بالا در نظر گرفت. ضریب کش‌سانی منیزیم از آلومینیم نیز کمتر و بین یک چهارم تا یک پنجم ضریب کشسانی فولاد است. سخت پایی قطعه متناسب با ضخامت آن است. اما آلیاژ چنان سبک وزن است که امکان استفاده از مقاطع ضخیم برای کسب صلبیت (سخت پایی) لازم وجود دارد و در عین حال وزن سازه از وزن سازه‌های مشابه با فلزات دیگر کمتر است. هزینهٔ واحد حجم کم است. بنابراین استفاده از مقاطع ضخیم مشکلی به‌وجود نخواهد آورد. به‌علاوه از آنجا که بسیاری از قطعات منیزیمی ریخته‌گری می‌شوند مقاطع ضخیم‌تر، خود نوعی ویژگی مطلوب است. شکل‌پذیری آلیاژهای منیزیم به دلیل ساختار hcp پایین است، لیکن در برخی آلیاژها به ۱۰ درصد می‌رسد.

از طرف دیگر آلیاژهای منیزیم دارای نسبت استحکام به وزن تقریباً بالایی هستند. آلیاژهای تجارتی استحکامی برابر با ۳۸۰ مگاپاسکال (۵۵ هزار پوند بر اینچ مربع)

دارند. قابلیت جذب انرژی بالا به مفهوم توانایی میراندن ارتعاشات صداست. در حالی که بسیاری از آلیاژهای منیزیم برای مقاومت در برابر خوردگی نیاز به لاک الکل و لعاب دارند، این خاصیت با ایجاد آلیاژهای با درجهٔ خلوص بالا پیشرفت کرده است. در غیاب زوج‌های گالوانیکی نامناسب، این مواد در برابر خوردگی بهتر از فولاد و آلومینیم مقاومت می‌کنند و راه را برای کاربرد در جاهای دیگری، از جمله در بازار خودرو، هواپیما، ابزار نیرو، وسایل ورزشی و محصولات الکترونیکی (که ترکیبی از سپر الکترومغناطیس، سبکی و دوام بیشتر از پلاستیک و فلزات جایگزین دارند) هموار می‌کنند. محدودیت‌های متعدد، کاربرد منیزیم را به مصارفی که سبک وزنی حائز اهمیت فراوان است محدود ساخته است. در حالی که آلیاژهای آلومینیم معمولاً در ساخت اعضای باربر در سازه‌های مکانیکی فراوانی به‌کار می‌روند، آلیاژهای منیزیم برای چنین کاربردهایی در شرایطی که سبکی در درجهٔ اول اهمیت و استحکام نگرانی بعدی باشد، کاربرد فراوان دارند.

آلیاژهای منیزیم و طرز ساخت آنها

سیستم نمایش آلیاژهای منیزیم توسط ASTM ابداع شده و نشانگر ترکیب و شرایط است و در مشخصهٔ B۹۳ بیان گردیده است. این سیستم شامل یک یا دو حرف پیشوند، دو یا سه رقم و یک حرف پسوند است. حروف پیشوند معرف دو فلز آلیاژی اصلی بر طبق فهرست زیر هستند:

A آلومینیم E خاکی کمیاب B بیسموت L بریلیم F آهن Pسرب S سیلیسیم
M منگنز D کادمیم Nنیکل K زیرکنیم C مس H توریم Q نقره
T قلع Z روی R کرم

آلومینیم معمول‌ترین عنصر آلیاژی است و به همراه روی، زیرکنیم و توریم ویژگی سخت شدن رسوبی را بالا می‌برند؛ منگنز مقاومت در برابر خوردگی را تقویت می‌کند و قلع قابلیت ریخته‌گری را افزایش می‌دهد. دو حرف با دو یا سه عدد و یک حرف پسوند احتمالی پشت سر هم قرار می‌گیرند. حرف پسوند تغییرات آلیاژهای پایهٔ یکسان را نشان می‌دهد. مثل AZ ۹۱ دارای تقریباً ۹ درصد آلومینیم و ۱ درصد روی است. روش نمایش پسوند باز پخت هم بسیار مشابه سیستم به‌کار رفته در آلیاژهای آلومینیم است. جدول۶ فهرستی از آلیاژهای رایج منیزیم را همراه با خواص و استفاده‌های آنها نشان می‌دهد. فرایندهای ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای، قالب دائمی و حدیده‌ای را می‌توان به خوبی بر روی آلیاژهای منیزیم انجام داد و نقطهٔ ذوب پایین و سیالیت بالای آن آلیاژها برای این منظور مفید واقع می‌شود. ریخته‌گری حدیده‌ای متداول‌ترین آنهاست و بیشتر از ۷۰ درصد تولید را تشکیل می‌دهد. با اینکه قیمت منیزیم حدوداً دو برابر آلومینیم است، فرایند ریخته‌گری حدیده‌ای با مخزن گرم روی منیزیم ساده‌تر، اقتصادی‌تر و ۴۰ تا ۵۰ درصد، سریع‌تر از فرایند ریخته‌گری

حدیده‌ای مخزن سرد مورد نیاز برای آلومینیم می‌باشد. ضخامت دیواره، زاویهٔ شیب و خورندها همگی کوچک‌تر از مقادیر ریخته‌گری حدیده‌ای آلومینیم هستند و چرخهٔ تولید کوتاه‌تر، عمر قالب را افزایش می‌دهد. بنابراین قطعات ریخته‌گری حدیده‌ای منیزیم به‌خوبی با آلومینیم رقابت خواهند کرد. هنگامی که سخت پایی بالا و پایداری ابعاد یا هدایت برقی و گرمایی مورد نیاز است، محصولات قالب‌گیری حدیده‌ای منیزیم غالباً جایگزین قطعات قالب‌گیری تزریقی پلاستیکی می‌شوند.

خواص شکل‌پذیری فلز در دمای معمولی اتاق ضعیف است. اما هنگامی که ماده تا دمای ۵۰۰ـ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۷۷۵ـ۴۸۰درجه فارنهایت) گرم می‌شود، معمول‌ترین فرایندهای شکل دادن مورد استفاده قرار می‌گیرند. رسیدن به چنین درجهٔ حرارت‌هایی ساده است و نیازی به محیط محافظ نیست، بدین سبب قطعات به میزان قابل توجهی به روش‌های کشیدن و شکل دادن تولید می‌شوند. محصولات ورقه‌ای و حدیده‌کاری منیزیم، ویژگی‌هایی مشابه با آلیاژهای آلومینیم کارشدهٔ متداول‌تر دارند و در عین سبک‌تر بودن نسبت به پلاستیک‌ها، ده برابر و بیشتر سخت‌یابی یا صلیبت دارند.

قابلیت ماشین‌کاری آلیاژهای منیزیم در میان فلزات تجارتی بی‌نظیر است، و در بسیاری از موارد صرفه‌جویی در هزینهٔ ماشین‌کاری بسیار بیشتر از جبران هزینهٔ مادهٔ اضافی تمام شده می‌باشد. در عین حال نوک ابزار باید همواره تیز باشد و سرمای کافی نیز برای براده فراهم شود.

جوشکاری نقطه‌ای آلیاژهای منیزیم تقریباً به سادگی آلومینیم است، اما تمیزکاری با برس یا پاک کردن شیمیایی پیش از شکل گرفتن جوش لازم است. برای رسیدن به کیفیت بهتر جوشکاری در حضور گاز بی‌اثر محافظ چون آرگون یا هلیم انجام می‌شود. اطلاعات نادرست فراوانی در مورد خطر آتش‌سوزی هنگام کار با آلیاژهای منیزیم منتشر شده است. البته این واقعیت وجود دارد که آلیاژهای منیزیم به صورت پودر یا براده، قابلیت اشتعال بسیار زیادی دارند و این خطر همواره باید در نظر گرفته شود. در عین حال آلیاژهای منیزیم در شکل‌های ورقه، لوحه، حدیده شده و یا ریختگی خطر چندانی به‌وجود نمی‌آورند. در دمای بیش از ۷۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۹۵۰ درجه فارنهایت) وجود گاز غیر قابل اشتعال و عاری از اکسیژن بروز آتش که در حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد (۱۱۰۰درجه فارنهایت) آغاز خواهد شد، جلوگیری می‌کند. هنگام عملیات ریخته‌گری به دلیل واکنش منیزیم با ماسه و آب، رعایت دقت بیش ضروری است.

جدول ۳۵ـ ترکیب خواص و کاربردهای آلیاژهای منیزیم

آلیاژ	بازپخت	ترکیب شیمیایی (درصد)							استحکام کششی		استحکام تسلیم		ازدیاد طول نمونهٔ ۲ اینچی (٪)	کاربردها و ویژگی‌ها
		Al	خاکی نادر		Mn	Tn	Zn	Zr	Ksi	MPa	Ksi	MPa		
AM۶۰A	F	۶/۰			۰/۱۳				۳۰	۲۰۷	۱۷	۱۱۷	۶	ریخته‌گری حدیده‌ای
AM۱۰۰A	T۴	۱۰/۰			۰/۱				۳۴	۲۳۴	۱۰	۶۹	۶	ریخته‌گری در قالب‌های ماسه‌ای و دائمی
AZ۳۱B	F	۳/۰					۱/۰		۳۲	۲۲۱	۱۵	۱۰۳	۶	ورق، صفحه، آهنگری، حدیده‌کاری
AZ۶۱A	F	۶/۵					۱/۰		۳۶	۲۴۸	۱۶	۱۱۰	۷	ورق، صفحه، آهنگری، حدیده‌کاری
AZ۶۳A		۶/۰					۳/۰		۳۴	۲۳۴	۱۱	۷۶	۷	ریخته‌گری در قالب‌های ماسه‌ای و دائمی
AZ۸۰A		۸/۵					۳/۵		۳۴	۲۳۴	۲۲	۱۵۲	۲	قطعات آهنگری حدیده‌کاری محکم
AZ۸۱A		۷/۶					۰/۷		۳۴	۲۳۴	۱۱	۷۶	۷	ریخته‌گری حدیده‌ای
AZ۹۱A	F۲	۹/۰				۰/۷			۳۴	۲۳۴	۲۳	۱۵۹	۳	قطعات محکم ریخته‌گری
AZ۹۲A	F۵	۹/۰				۲/۰			۳۴	۲۳۴	۱۱	۷۶	۶	و دائمی
EZ۳۳A			۳/۲				۲/۶	۰/۷	۲۰	۱۳۸	۱۴	۹۷	۲	ریخته‌گری در قالب‌های ماسه‌ای و دائمی
HK۳۱A	۲۴					۳/۲		۰/۷	۳۳	۲۲۸	۲۴	۱۶۶	۴	ورق و صفحهٔ ریخته‌گری (با بازپخت ۶)
HM۲۱A				۰/۸	۲/۰				۳۳	۲۲۸	۲۵	۱۷۲	۳	ورق و صفحهٔ آهنگری در دمای بالای (۸۰۰)
HZ۳۲A						۳/۲			۲۷	۱۸۶	۱۳	۹۰	۴	ریخته‌گری در قالب‌های ماسه‌ای و دائمی
ZH۶۲A						۱/۸	۵/۷	۰/۷	۳۵	۲۴۱	۲۲	۱۵۲	۵	ریخته‌گری در قالب‌های ماسه‌ای و دائمی
ZK۵۱A			۴/۶	۰/۷					۳۴	۲۳۴	۲۰	۱۳۵	۵	ریخته‌گری در قالب‌های ماسه‌ای و دائمی
ZK۶۰A							۵/۵	۰/۴۵	۳۸	۲۶۲	۲۰	۱۳۸	۷	حدیده‌کاری، آهنگری

آلیاژهای پایهٔ روی

بیش از ۵۰ درصد روی به‌صورت فلز خالص در روی اندود کاری آهن یا فولاد استفاده می‌شود. در این فرایند مادهٔ پایهٔ آهنی با لایه‌ای از روی پوشانده می‌شود. این عمل به روش‌های مختلفی از جمله غوطه‌ور کردن مستقیم در حمام فلز مذاب و آبکاری الکترولیتی امکان‌پذیر است. این پوشش دارای ویژگی مقاومت در برابر خوردگی بسیار عالی (حتی در صورت ایجاد خراش و ترک‌های بسیار شدید) است. به‌علاوه این ویژگی تا هنگامی که روی به‌طور کامل مصرف شود بر جای خود باقی است.

روی همچنین به‌عنوان فلز پایه برای آلیاژهای مورد استفاده در قطعات ریخته‌گری حدیده‌ای به‌کار می‌رود. فلز روی فلز ارزان قیمت و دارای نقطهٔ ذوب پایین ۳۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۷۱۵درجه فارنهایت) است. به‌علاوه، در اثر تماس مذاب با قالب فولادی مشکلی به‌وجود نمی‌آید. متأسفانه روی خالص به سنگینی فولاد است و ضعیف و شکننده نیز می‌باشد. به این دلایل در طراحی ریخته‌گری حدیده‌ای عناصر آلیاژی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که نقطهٔ ذوب فلز را حفظ کنند، و چقرمگی و استحکام آن را در شرایط ریخته‌گری شده افزایش دهند.

در جدول ۳۶ مشخصات دو آلیاژ ریخته‌گری حدیده‌ای متداول روی ارائه شده است. آلیاژ AG۴۰A (آلیاژ ۹۰۳ یا زاماک ۳) به دلیل پایداری ابعادی فوق العاده مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرد. آلیاژ A۱AG۴ (آلیاژ ۹۰۵ یا زاماک ۵) از نظر استحکام و مقاومت در برابر خوردگی مناسب تر است. به‌طور کلی آلیاژهای ریخته‌گری حدیده‌ای روی استحکام و مقاومت به خوردگی بالا دارند و می‌توان آنها را در مقاطع فوق‌العاده نازک با ابعاد بسیار کوچک ریخت. از این گذشته، این با حداقل هزینه قابل ماشین‌کاری می‌باشند. مقاومت در برابر خوردگی سطحی در برخی کاربردها مناسب است و می‌توان برای انواع کاربردها به سادگی پرداخت آبکاری، کرماته و آندیزه کرد. در حالی که سخت پایی آن از دیگر فلزات پایین‌تر است، از پلاستیک‌های مهندسی بسیار بهتر بوده و در بیشتر موارد رقیب قطعات قالب‌گیری تزریقی شده است.

اهمیت ریخته‌گری حدیده‌ای روی با تولید چندین آلیاژ ریختنی آلومینیم ـ روی با محتوای آلومینیم بیشتر (ZA۸، ZA۱۲ وZA۲۷) که به ترتیب دارای ۸، ۱۲ و ۲۷ درصد آلومینیم هستند افزایش یافته است. این آلیاژها برای ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای، قالب دائمی و قالب گرافیتی در نظر گرفته شده بودند، برای ریخته‌گری حدیده‌ای و کسب مشخصات عملکردی مانند استحکام بالاتر (تا ۶۰ هزار پوند بر اینچ مربع یا ۴۱۵ مگاپاسکال) سختی (تا ۱۲۵ برینل) و دیر سایی نیز بهتر از هر آلیاژ معمولی دیگر هستند. از دیدگاه نقطهٔ ذوب و هزینهٔ ریخته‌گری پایین‌تر، آلیاژهای فوق جانشین مناسبی برای آلیاژهای ریختنی معمولی آلومینیم، برنج، برنز و همچنین چدن محسوب می‌شوند.

جدول ۳۶ـ مشخصات دو آلیاژ ریختنی حدیده‌ای روی

آلیاژ	#3 SAE903 ASTMAG40A	#5 SAE925 AST<AG41A	#7 ASTMAG408	ZA_8			ZA_12			ZA_27		
				S**	P	D	S	P	D	S	P	D
ترکیب*												
آلومینیم	۳/۵ـ۴/۳	۳/۵ـ۴/۳	۳/۵ـ۴/۳	۸/۰ـ۸/۸			۱۰/۵ـ۱۱/۵			۲۵/۰ـ۲۸/۰		
مس	۰/۲۵ حداکثر	۰/۷۵ـ۱/۲۵	۰/۲۵ حداکثر	۰/۸ـ۱/۳			۰/۵ـ۱/۲			۲/۰ـ۲/۵		
روی	بقیه	بقیه	بقیه	بقیه			بقیه			بقیه		
خواص												
چگالی (g/cc)	۶/۶	۶/۶	۶/۶		۶/۳			۶/۰			۵/۰	
استحکام تسلیم (MPa)	۲۲۱	۲۲۸	۲۲۱	۲۰۰	۲۰۶	۲۹۰	۲۱۴	۲۶۹	۳۱۷	۳۷۲	۳۷۹	
(ksi)	۳۲	۳۳	۳۲	۲۹	۳۰	۴۲	۳۱	۳۹	۴۶	۵۴	۵۵	
استحکام کششی (MPa)	۲۸۳	۳۲۸	۲۸۳	۲۶۳	۲۵۵	۳۷۴	۳۱۷	۳۴۵	۴۰۰	۴۴۱	۴۲۱	
(ksi)	۴۱	۴۸	۴۱	۳۸	۳۷	۵۴	۴۶	۵۰	۵۸	۶۴	۶۱	
ازدیاد طول (درصد در ۲ اینچ)	۱۰	۷	۱۳	۲	۲	۱۰	۳	۳	۷	۶	۳	
استحکام ضربه (J)	۵۸	۶۵	۵۸	۲۰	۴۲	۲۵	۲۹	۴۷	۵			
ضریب کش‌سایی (GPa)	۸۵/۵	۸۵/۵	۸۵/۵	۸۵/۵	۸۲/۷	۷۷/۹						
قابلیت ماشین‌کاری	فوق‌العاده	فوق‌العاده	فوق‌العاده	فوق‌العاده			خیلی خوب			خوب		

* حاوی مقادیر مختصری Ni, Sn, Cd, Pd, Fe

**S= ریخته‌گری در ماسه؛ P= ریخته‌گری در قالب دائمی؛ D= ریخته‌گری حدیده‌ای

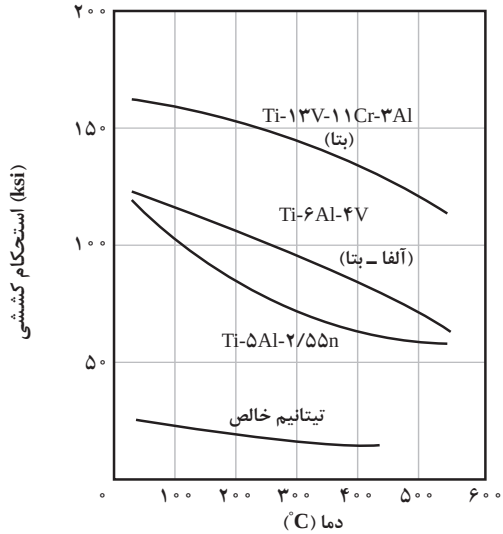
تیتانیم و آلیاژهای آن

تیتانیم فلزی محکم، سبک وزن، مقاوم در برابر خوردگی است، و اهمیت اقتصادی آن تنها از حدود سال ۱۹۵۰ مطرح شده است. چون بیشتر خواص این فلز بین خواص فولاد و آلومینیم هستند، روز به روز به اهمیت آن اضافه می‌شود. استحکام تسلیم تیتانیم خالص تجاری حدود ۲۱۰ مگاپاسکال (۳۰ هزار پوند بر اینچ مربع) است و می‌توان با آلیاژ کردن و انجام عملیات حرارتی آن را به ۱۳۰۰ مگاپاسکال (۱۹۰ هزار پوند بر اینچ مربع) رسانید. این مقدار با استحکام اغلب با فولادهای عملیات حرارتی شده قابل مقایسه است. از طرف دیگر چگالی تیتانیم تنها ۵۶ درصد فولاد (نسبت استحکام به وزن قابل توجه) و ضریب کشسانی آن نیز حدود نصف ضریب کشسانی فولاد می‌باشد. چون این فلز خواص مکانیکی خود را تا ۵۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) حفظ می‌کند، تیتانیم مادهٔ مهندسی مقاوم در دمای زیاد محسوب می‌شود. از سوی دیگر تیتانیم و آلیاژهای آن دارای مسائل هزینهٔ زیاد، مشکلات تولید، محتوای انرژی زیاد (انرژی لازم برای تولید آنها ۱۰ برابر انرژی تولیدی فولاد است) و فعالیت شیمیایی زیاد در دمای بالا (بالای ۵۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد) هستند.

آلیاژهای تیتانیم بر اساس نوع عنصر آلیاژی اصلی و مقدار آن (مشخصهٔ B_۲۶۵ از ASTM) به‌طور کلی از نظر ریز ساختار به سه دسته تقسیم می‌شوند. این دسته‌ها به نام‌های آلیاژهای تیتانیم آلفا، بتا، و آلفا ـ بتا موسوم‌اند. این حروف معرف فاز یا فازهای پایدار در دمای اتاق هستند. عناصر آلیاژی را می‌توان برای پایدارسازی فاز آلفای منشور تنگ بسته یا فاز بتای مکعبی مرکز پر به‌کار برد و از عملیات حرارتی برای تغییر ساختار و بهبود خواص استفاده نمود. آلیاژهای تیتانیم به روش‌های ریخته‌گری، آهنگری، نورد، حدیده‌کاری با جوشکاری تولید می‌شوند، مشروط بر آنکه تغییرات خاصی در فرایندها و کنترل شان داده شود. روش‌های عملیاتی پیش رفته شامل گرد فلزکاری، آلیاژسازی مکانیکی، عملیات انجماد سریع (RSP)، شکل دادن ابرموم سان، اتصال نفوذی و فشردن ایزواستاتیک گرم (HIP) است.

با وجود اینکه تیتانیم در طبیعت فراوان است، اما استخراج آن از کانه، فراورش و تولید آن دشوار است. این دشواری‌ها موجب افزایش قیمت آن نسبت به فولاد و آلومینیم می‌شود. از این رو مصارف تیتانیم در درجهٔ اول در مواردی است که ویژگی‌های سبکی (نسبت استحکام ـ وزن زیاد)، سخت پایی مناسب، استحکام خستگی و چقرمگی شکست خوب مقاومت در برابر خوردگی (به خاطر لایهٔ نازک اکسید چسبنده) و حفظ خواص مکانیکی در دمای زیاد ضروری است. آلومینیم، منیزیم و بریلیم تنها فلزات پایه‌ای هستند که از تیتانیم سبک‌ترند، و هیچ کدام از آنها از لحاظ کارایی مکانیکی با خواص در دمای بالا با آن برابری نمی‌کنند. کاربرد عمدهٔ تیتانیم در صنایع هوا ـ فضاست، اما آلیاژهای تیتانیم در تجهیزات فراورش شیمیایی، صنایع غذایی،

صنایع الکتروشیمیایی، تجهیزات دریایی، اجزای ترمیمی داخل بدن و وسایل ورزشی نیز استفاده می‌شوند. این آلیاژها در مواردی که صرفه‌جویی در وزن حائز اهمیت است جانشین فولاد و در مواردی که عملکرد در دمای زیاد موردنظر است، جانشین آلیاژهای آلومینیم می‌شوند. در برخی کاربردهای اتصالی، خاصیت منحصر به فرد تیتانیم در تردکنندگی شیشه و برخی از سرامیک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. آلیاژ تیتانیم با ۶ درصد آلومینیم و ۴ درصد وانادیم، رایج‌ترین آلیاژ تیتانیم است. که برای ۵۰ درصد از مصارف تیتانیم جهان به‌کار می‌رود. شکل زیر پایداری و استحکام در دمای بالای چند آلیاژ تیتانیم را نشان می‌دهد.



استحکام تسلیم چند آلیاژ تیتانیم در دماهای مختلف

آلیاژهای پایهٔ نیکل

آلیاژهای پایهٔ نیکل به دلیل استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی استثنایی (به ویژه در دمای زیاد) حائز اهمیت فراوان هستند. این آلیاژها در بازهٔ گسترده‌ای از انواع کار شده و ریختگی در دسترس هستند. آلیاژهای کار شده عموماً با نام‌های تجاری مانند دونل، هستالوی، اینکونل و... شناخته می‌شوند. آلیاژهای ریختگی معمولاً توسط شاخص‌های ASTM یا موسسهٔ آلیاژهای ریختگی مشخص می‌گردند. مشخصه‌های عمومی شامل شکل‌پذیری خوب (ساختار مکعبی با وجوه مرکز پر)، مقاومت به خزش خوب و نگه داشتن استحکام و شکل‌پذیری در سرما یا حتی دماهای بسیار پایین (دمای گازهای مایع شده) است.

فلز مونل که حاوی ۱۷ درصد نیکل و ۳۰ درصد مس است، به دلیل خصوصیات خوردگی عالی آن سال‌های متمادی در صنایع حفاظت غذایی و شیمیایی به‌کار رفته

است. در حقیقت، مونل از مقاومت خوردگی بهتری در اکثر محیط‌ها نسبت به هر آلیاژ تجاری دیگری برخوردار است. این فلز به ویژه نسبت به محیط‌های آب نمک، اسید سولفوریک و حتی بخار آب جاری با سرعت زیاد و درجهٔ حرارت بالا مقاوم است. به این دلیل آخری مونل کاربرد فراوانی در پرهٔ توربین‌های بخار پیدا کرده است. سطح فلز در اثر جلا دادن کاملاً براق خواهد شد (همانند فولاد زنگ نزن) و غالباً در لوازم زینتی و ابزار خانگی مصرف می‌شود. مونل در شکل معمولی دارای استحکام کششی ۵۰۰ تا ۱۲۰۰ مگاپاسکال (۷۰ تا ۱۷۰ هزار پوند بر اینچ مربع) همراه با افزایش طولی بین ۲ تا ۵۰ درصد است.

آلیاژهای نیکل در مقاومت‌های الکتریکی و فلزات حرارتی نیز به‌کار می‌روند. این مواد آلیاژهای نیکل ـ کرم هستند و به نام تجارتی نیکرم موسوم‌اند.

هنگامی که آلیاژهای پایهٔ نیکل برای خواص مکانیکی خوب در دماهای بالا طراحی شوند، به‌عنوان ابر آلیاژها طبقه‌بندی می‌شوند.

شکل ۲۸ـ برای تحمل دماهای بالای گازهای خروجی موتور جت به ابرآلیاژها و مواد دیرگداز نیاز است

ابرآلیاژها و دیگر فلزات غیرآهنی مورد مصرف در دمای بالا

چنانکه گفته شد، تیتانیم و آلیاژهای آن دارای استحکام مناسب در دمای بالا هستند، اما حداکثر مقدار این دما حدوداً ۵۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) است. مادهٔ مورد استفاده در مصارفی چون موتور جت، توربین گاز، موشک و مصارف هسته‌ای باید دارای استحکام، مقاومت در برابر خزش و مقاومت در برابر خوردگی بسیار زیاد در دمای حد ۱۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۲۰۰۰ درجه فارنهایت) باشد.

ابر آلیاژها گروهی از مواد هستند که نیازهای فوق را برآورده می‌کنند و اولین بار به‌طور وسیع برای کاربرد در قسمت دما بالای هواپیمای توربو جت در سال‌های ۱۹۴۰ ظاهر شدند. نیکل، آهن و نیکل یا کبالت فلزات پایهٔ ابر آلیاژها محسوب می‌شوند، و توانایی حفظ استحکام در دمای بالا به مدت طولانی را دارند. استحکام آنها ناشی از استحکام بخشی محلول‌سازی، رسوب سختی و کار بیدها یا اکسیدهای آلیاژی پراکنده است. آلیاژهای نیکل دارای استحکام بیشتری در دمای اتاق هستند؛ استحکام تسلیم آنها حدود ۱۲۰۰ مگاپاسکال (۱۷۵ هزار پوند بر اینچ مربع) و استحکام کششی نهایی شان ۱۴۵۰ مگاپاسکال (۲۱۰ هزار پوند بر اینچ مربع) و بالاتر از آلیاژهای کبالت است. استحکام گسستگی هزار ساعتهٔ آلیاژهای نیکل در دمای ۸۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد (۱۵۰۰ درجهٔ فارنهایت) نیز بیشتر از آلیاژهای پایهٔ کبالت است. متأسفانه چگالی ابر آلیاژها بسیار بزرگ‌تر از آهن است، بنابراین استفاده از آنها به علت وزن زیاد هزینهٔ بیشتری در بردارد.

شکل‌دهی و ماشین‌کاری غالب ابر آلیاژها مشکل است. بدین جهت از روش‌هایی چون ماشین‌کاری با تخلیهٔ الکتریکی، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، و یا ماشین‌کاری مافوق صوت استفاده می‌شود، و یا قطعه به روش ریخته‌گری در قالب با مدل ذوب شدنی (ریخته‌گری دقیق) به شکل نهایی تولید می‌شود. روش گرد فلزکاری نیز به میزان قابل توجهی برای تولید ابر آلیاژها به‌کار می‌رود. ابر آلیاژها به دلیل وجود محتویات خاص، گران قیمت هستند؛ این هزینهٔ اضافی مصرف آنها را به قطعات کوچک یا حساس برای مواردی که هزینه عامل تعیین‌کننده نیست، محدود می‌کند.

برخی کاربردهای مهندسی به موادی نیاز دارد که محدودهٔ دمای کاربردی آنها بیش از ابر آلیاژ باشد. شکل۲۸ اگزوز دمای بالای یک موتور جت را نشان می‌دهد. مطابق با گزارش یکی از منابع علمی، درجه حرارت موتورهای جت در آینده بیش از ۱۴۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد (۲۹۰۰ درجه فارنهایت) خواهد بود. افشانک موشک از این نقطه هم فراتر خواهد رفت. موادی چون نیکل TD (آلیاژی از نیکل حاوی ۲ درصد اکسید توریم پراکنده) برای کار در درجه حرارت ۱۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۲۰۰۰ درجه فارنهایت) مناسب به‌نظر می‌رسند.

با بالا رفتن دما به فلزات دیرگداز می رسیم که شامل نیوبیم، مولیبدن، تانتالیم، رنیوم و تنگستن می‌باشند. همهٔ آنها دمای ذوبی نزدیک به بیش از ۲۵۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۴۵۰۰ درجه فارنهایت) دارند. و سهم قابل توجهی از استحکامشان را در دماهای بالا نگه می‌دارند و می‌توان از آنها در دماهایی به بزرگی ۱۶۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۳۰۰۰ درجهٔ فارنهایت) استفاده نمود به شرط اینکه پوشش سرامیکی محافظ به‌طور مؤثر آنها را از گازها در محیط کاریشان عایق‌بندی کند. البته فناوری پوشش‌دهی کاملاً چالش‌زاست زیرا پوشش‌های سرامیکی باید (۱) دمای ذوب بالا داشته باشد، (۲) با فلزی که محافظت می‌کنند واکنش ندهند، (۳) مانع نفوذی در برابر اکسیژن و سایر گازها

فراهم کنند و (۴) مشخصه‌های انبساط حرارتی متناسب با فلز زیرین داشته باشند. درحالی که می‌توان از فلزات دیرگداز در دماهای بالاتر استفاده نمود، اما بالاترین دمای متداول مورد استفاده توسط محدودیت‌ها و موانع اعمالی توسط پوشش تعیین می‌گردد. جدول ۳۷ ویژگی‌های کلیدی چند فاز دیرگداز را نشان می‌دهد. متأسفانه همهٔ آنها سنگین‌تر از فولاد هستند و برخی بسیار سنگین‌ترند. در حقیقت، تنگستن با چگالی حدود ۱/۷ برابر سرب اغلب به‌عنوان چرخ توازن، چرخ طیار فشرده، وزنه‌ها، قطب نماها، گلوله‌های نظامی و چوب گلف به‌کار می‌رود.

جدول ۳۷ــ خواص برخی از فلزات دیر گداز

فلز	نقطهٔ ذوب [°F(°C)]	چگالی (g/cm^3)	دمای اتاق		افزایش طول (درصد)	دمای بالا ۱۰۰۰°C(۱۸۳۲°F)	
			استحکام تسلیم (ksi)	استحکام کششی (ksi)		استحکام تسلیم (ksi)	استحکام کششی (ksi)
تانتالم	۵۴۳۰ (۳۰۰۰)	۱۶/۶	۳۵	۵۰	۳۵	۲۴	۲۷
تنگستن	۶۱۷۰ (۳۴۱۰)	۱۹/۲۵	۲۲۰	۳۰۰	۳	۱۵	۶۶
مولیبدن	۴۷۳۰ (۲۶۱۰)	۱۰/۲۲	۸۰	۱۲۰	۱۰	۳۰	۵۰
نیوبیم	۴۴۸۰ (۲۴۷۰)	۸/۵۷	۲۰	۴۵	۲۵	۸	۱۷

سایر مواد و فناوری‌هایی که در شرایط کاری دمای بالا مطلوب هستند شامل ترکیب‌های بین فلزی خواصی را فراهم می‌کنند که بین فلزات و سرامیک‌ها قرار دارند و گزینه‌های عالی‌ای برای کاربردهای دمای بالا هستند. این مواد سخت، سفت، مقاوم به خزش و مقاوم به اکسایش می‌باشند و استحکام خوبی در دمای بالا دارند که اغلب با دما افزایش می‌یابد. آلومینادهای تیتانیم و نیکل از مزیت اضافی سبکی قابل توجه نسبت به ابر آلیاژها برخوردارند. متأسفانه مشخصهٔ غالب ترکیب‌های بین فلزی نیز شکل‌پذیری ضعیف، چقرمگی شکست کم و مقاومت به خستگی ضعیف است. ساخت آنها با روش‌های معمول مانند شکل‌دهی مکانیکی و جوشکاری دشوار است. از نگاه مثبت، تحقیقات و پیشرفت‌هایی برای غلبه بر برخی از این محدودیت‌ها آغاز شده است و اکنون ترکیب‌های بین فلزی در زمرهٔ محصولات صنعتی ظاهر شده‌اند. در شکل ۲۹ حد بالایی خواص مکانیکی تعدادی از فلزات مهندسی مشاهده می‌شود.

سایر مواد و فناوری‌های نویدبخش برای کار در دماهای بالا مانند او تکتیک‌های منجمد شدهٔ جهتی، تک بلورها، ترکیبات بین فلزی، سرامیک‌های مهندسی ویژه و سیستم‌های پوششی پیش رفته، ویژگی‌های کارکردی در درجه حرارت‌های بالا را تأمین می‌کنند.

شکل ۲۹ـ شاخص دمایی حد بالایی خواص مکانیکی فلزات مهندسی مختلف

سرب، قلع و آلیاژهای آنها

خواص عمدهٔ سرب و آلیاژهای آن، چگالی زیاد به همراه کمترین استحکام و سخت پایی در بین فلزات مهندسی است. کاربردهای اصلی سرب به‌عنوان فلز خالص در باتری‌ها، پوشش کابل‌ها و سپرهای صوتی و لرزشی است. باتری‌های اسید ـ سرب به‌طور مشخصی مهم‌ترین مصرف‌کنندهٔ سرب است، و بیش از ۹۰ درصد سرب مورد مصرف در ایالات متحده از بازیابی باتری‌ها به‌دست می‌آید. در دیگر کاربردها از خواص مقاومت به خوردگی و دمای ذوب پایین آن بهره‌گیری می‌شود. قلع در درجهٔ اول به‌عنوان پوششی برای فولاد به منظور جلوگیری از خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هنگامی که سرب و قلع به شکل آلیاژ هستند تقریباً همیشه به صورت توأم استفاده می‌شوند. مواد یاتاقانی و لحیم مهم‌ترین مصارف این دو فلز هستند. آلیاژ بابیت قلع یا بابیت حقیقی حاوی ۸۴ درصد قلع، ۸ درصد مس و ۸ درصد آنتیموان است. به

دلیل هزینهٔ سنگین قلع، از آلیاژی با ترکیب ۸۵ درصد سرب ۵ درصد قلع، ۱۰ درصد آنتیموان و ۰/۵ درصد مس به‌عنوان مادهٔ عمومی‌تر یاتاقانی استفاده می‌شود. آنتیموان با قلع ترکیب و به ذرات سخت در میان زمینهٔ نرم‌تر سرب مبدل می‌شود. محور با اصطکاک کمی‌روی ذرات سخت‌تر دوران می‌کند و زمینهٔ نرم مانند بالشتک نرمی نا هم راستایی را جبران و فاصلهٔ لازم بین سطوح را تأمین می‌کند. برای سرعت‌های پایین و بارهای متوسط، بابیت‌های پایهٔ سرب کاملاً جوابگو هستند. لحیم‌های نرم در اصل آلیاژهایی از سرب و قلع با ترکیب شیمیایی شبیه به ترکیب اوتکتیکی از ۶۱/۹ درصد قلع هستند.. آلیاژهای اوتکتیک دارای کمترین نقطهٔ ذوب هستند، اما هزینهٔ گزاف قلع، بسیاری را واداشته است تا مقدار قلع را از حالت بهینه کاهش دهند. نگرانی‌های محیطی و قوانین جدید، حرکت به سمت استفاده از لحیم‌های بدون سرب در کاربردهای درگیر با تهیه و توزیع آب را ترغیب می‌کنند.

فلزات و آلیاژهای غیر متداول

تعدادی از آلیاژها و فلزات غیر عادی به دلیل وجود خواص منحصر به فرد فیزیکی و مکانیکی‌شان اهمیت فراوانی در فناوری جدید پیدا کرده‌اند. برلیم ترکیب وزنی کمتر از آلومینیم و سخت پایی بالاتر از فولاد دارد و نسبت به اشعهٔ ایکس شفاف است. هافنیم، توریم و برلیم به دلیل تمایل جزئی به جذب نوترون در رآکتورهای اتمی مورد استفاده قرار می‌گیرند اورانیم مصرف شده به دلیل بالا بودن چگال (۱/۱۹ گرم در هر سانتی‌مترمکعب) در مصارف ویژه‌ای که حداکثر وزن در فضای محدود قرار می‌گیرد، مانند وزنه‌های تعادل یا چرخ لنگرها، به‌کار می‌آید کبالت علاوه‌بر مصرف به‌عنوان فلز پایه در ابر آلیاژها به‌عنوان مادهٔ چسباننده در قطعات متالورژی پودر و کاربیدهای تف جوشی شده استفاده می‌شود که باعث استحکام خوب در دمای بالا می‌گردد. زیر کنیم دارای مشخصهٔ مقاومت در برابر خوردگی استثنایی در برابر بیشتر اسیدها، کلریدها و اسیدهای آلی است. به‌علاوه دارای استحکام زیاد، جوش‌پذیری، مقاومت به خستگی مناسب و مشخصهٔ جذب نوترون است. که در ساخت آهنربا با فلزات خاکی کمیاب اضافه می‌شوند که در مقایسه با نوع استاندارد فریتی استحکام بالاتری دارند. آلیاژهای نیودیم ـ آهن ـ برن و ساماریم ـ کبالت دو نوع متداول هستند.

شیشه‌های فلزی

شیشه‌های فلزی یا فلزات نابلور به شکل نوارهای نازک و پودرهای ظریف از دههٔ ۶۰ میلادی به‌وجود آمده‌اند. با سردکردن مایع در سرعتی بیش از 10^5 تا 10^6 درجهٔ سانتی‌گراد بر ثانیه، جامد صلبی تولید می‌شود که فاقد ساختار بلوری است. از آنجا که این ساختار فاقد «عیوب» بلوری مرزدانه و نابه‌جایی نیز هست، این ماده خواص مکانیکی فوق‌العاده (استحکام بالا، کرنش کشسان زیاد، چقرمگی خوب و مقاومت به سایش)، رفتار مغناطیسی غیر معمول و مقاومت به خوردگی بالا از خود نشان می‌دهد.

پیشرفت‌های اخیر تولید فلز نا بلور (بی‌شکل) با سرعت سرد کردن تنها ۱ تا ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد بر ثانیه را ممکن ساخته است. امروزه قطعات پیچیده‌ای از ماده‌ای مشهور به شیشهٔ فلزی توده‌ای (BMG) را با ضخامت تا چندین سانتی‌متر می‌توان توسط روش‌های معمول ریخته‌گری از جمله ریخته‌گری حدیده‌ای تولید کرد. چون این ماده از مایع به سمت شیشه می‌رود و نه از مایع به شکل بلوری، محصولات دقیق را می‌توان با انقباض کلی اغلب کمتر از ۰/۵ درصد ساخت. ساچمه‌ها یا پودرهای شیشه‌ای فلزی توده‌ای را نیز می‌توان تولید کرد و چون بسیاری از آلیاژها دمای ذوب پایینی دارند می‌توان محصولات را با گرمایش مجدد به شرایط نرم و شکل‌دهی با فرایندهایی که معمولاً در شکل‌دهی پلیمرهای گرمانرم به‌کار می‌روند (قالب‌گیری فشاری، حدیده‌کاری، قالب‌گیری دمشی و تزریقی) تولید نمود. کاربردهایی که اکنون ظهور کرده‌اند در حوزه‌های متنوعی مانند سازه‌های باربر، پوسته‌های الکترونیکی، اتصالات جایگزین و کالاهای ورزشی قرار دارند. به‌علاوه شیشه‌های فلزی نیز ابداع شده‌اند که ساختار شیشه‌ای خود را در دمای تا ۸۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۱۶۰۰ درجه فارنهایت) حفظ می‌کنند.

گرافیت

گرافیت از نظر فنی یک فلز نیست، اما یکی از مواد مهم و پر قابلیت مهندسی محسوب می‌شود. ویژگی‌های فلز و غیر فلز را از خود نشان می‌دهد. از جمله هدایت الکتریکی و حرارتی خوب، خنثی بودن، توانایی تحمل دماهای بالا و روان‌سازی به‌علاوه، ویژگی منحصر به فرد گرافیت استحکام فزاینده در دماهای بالاتر است. گرافیت چند بلورهٔ تبلور مجدد یافته دارای استحکام مکانیکی تا ۷۰ مگاپاسکال (۱۰ هزار پوند بر اینچ مربع) در دمای اتاق است که در دمای ۲۵۰۰ سانتی‌متر (۴۵۰۰F) دو برابر می‌شود. گرافیت به میزان قابل توجهی در کوره‌های قوس الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصارف دیگر آن نیز روزبه‌روز افزایش می‌یابند. افزودن مقدار کمی از بوریدها، کاربیدها، نیتریدها و سیلیسیدها به گرافیت منجر به کاهش چشمگیر میزان اکسایش در دمای زیاد و افزایش استحکام مکانیکی آن می‌شود. بدین ترتیب این ماده برای مصارفی چون شیپورهٔ راکت و قالب‌های دائمی ریخته‌گری فلزات گوناگون به دلیل قیمت کمتر از فولاد ابزار و عدم نیاز به عملیات حرارتی و انبساط حرارتی پایین، کاملاً مناسب است. پرداخت سطح گرافیت در اثر ماشین‌کاری بسیار صاف و یکنواخت است. الیاف گرافیتی کاربرد فراوانی در مواد مرکب پیدا کرده‌اند.

ارزشیابی نهایی: واحد یادگیری انتخاب مواد مهندسی

شایستگی	استاندارد عملکرد	نمره شایستگی	شاخص
تشخیص علل استفاده از مواد مهندسی در ساخت مصنوعات فلزی	مشخص نمودن خواص مورد نیاز مواد انتخاب شده برای ساخت مصنوعات فلزی	۳	۱ـ انتخاب ماده براساس هزینه تمام شده و اقتصاد تولید ۲ـ جایگزین مناسب مواد براساس موجودی بازار و سهولت دسترسی
		۲	۱ـ تعیین خصوصیات اصلی ماده مورد نیاز در ساخت یک مصنوع ۲ـ تعیین خصوصیات فرعی ماده مورد نیاز در ساخت یک مصنوع ۳ـ دسته بندی مواد مهندسی از نظر خاصیت‌های اصلی مشخص شده ۴ـ انتخاب ماده مهندسی مناسب
انتخاب ماده مهندسی برای ساخت مصنوعات فلزی		۱	عدم رعایت شاخص‌های ۲ و ۴ از دسته شاخص‌های نمره ۲
توضیحات: در نمره ۲، شاخص شماره ۲ جز شاخص‌های اصلی نیست و اگر به آن اشاره نشد، نمره کامل قابل احراز است.			