

## معرفی تکنولوژی سوپرآلیاژ و ریخته گری و میزان کاربرد آن در ایران و جهان :

امروزه تناژ وسیعی از قطعات مصرفی در توربینهای گازی از جنس سوپرآلیاژها میباشند. در ذیل به بعضی از مصارف این قطعات اشاره شده است :

- (۱) توربینهای گازی هواپیما
- (۲) توربینهای بخار نیروگاههای تولید برق (پره توربین مهم ترین مصرف کننده شمش های سوپرآلیاژ می باشد)
- (۳) ساخت قالبهای ریختهگری و ابزارهای گرمکار
- (۴) مصارف پزشکی و دندانپزشکی
- (۵) فضاپیماها
- (۶) تجهیزات عملیات حرارتی
- (۷) سیستمهای نوترونی و هستهای
- (۸) سیستمهای شیمیایی و پتروشیمی
- (۹) تجهیزات کنترل آلودگی
- (۱۰) تجهیزات و کورههای نورد فلزات
- (۱۱) مبدلهای حرارتی تبدیل ذغال سنگ.

### ساخت و تولید قطعات سوپر آلیاژی

قطعات سوپرآلیاژی، به دو روش عمده تولید می شوند :

**الف) روش ریخته گری دقیق:** این روش، عمدتاً برای تولید پرههای ثابت و متحرک توربین استفاده می شود. به این دسته از محصولات، قطعات سوپرآلیاژی ریختگی (Cast Super alloy) می گویند .

**ب) روش شکل دهی:** این روش، شامل فرآیندهایی چون فورج و نورد است و محصولات آن از قبیل دیسک، ورق، میلگرد، لوله و مفتول میباشد. به این گروه از محصولات، قطعات سوپرآلیاژی کارپذیر (Wrought Super alloy) گفته میشود. در روش ریخته گری، مهمترین تجهیزات مورد نیاز یک کوره تحت خلاء است، ولی در مورد روش شکلدهی، معمولاً تجهیزات پیچیده تر است. البته در حال حاضر امکانات وسیع شکلدهی در سطح کشور وجود دارد و مشکل اصلی در این بخش، ضعف در دانش فنی است.

### تولید قطعات سوپر آلیاژی به روش ریخته گری

برای تولید یک قطعه سوپرآلیاژی به روش ریخته گری به خصوص پره توربین که مهمترین قطعه سوپرآلیاژی است، چهار مرحله باید انجام شود :

- (۱) مهندسی معکوس جهت تهیه نقشه و مشخصات فنی
- (۲) ساخت قالب و ریخته گری دقیق

۳) ماشینکاری قطعات ریخته شده

۴) پوشش دهی

این چهار مرحله برای تولید پره، به خصوص "پره‌های متحرک" ردیف اول و دوم باید انجام شوند. البته "پره‌های ثابت" ممکن است بخش پوششدهی را نداشته باشند. همچنین پره‌های متحرک در ردیف‌های سوم و بالاتر در بعضی موتورها ممکن است از طریق فرایند فورجینگ تولید شده و پوشش نداشته باشند. همچنین برای ایجاد هر صنعت، سه عامل تجهیزات، نیروی انسانی ماهر و دانش فنی، لازم است که با توجه به این سه عامل، میتوان به بررسی وضعیت کشور در مورد مراحل چهارگانه فوق و نیز مشکلات آنها پرداخت

#### ۱- مهندسی معکوس:

در اینجا منظور از مهندسی معکوس فرایندی است که در آن از تعدادی نمونه موجود، مشخصات فنی و نقشه‌های مورد نیاز برای تولید و ساخت نمونه‌های مشابه بدست آید. این فرایند شامل اندازه‌گیریهای ابعادی به وسیله CMM و دستگاههای مخصوص دیگر و سپس تهیه نقشه میباشد. تجهیزات لازم، تقریباً در کشور موجود بوده و CMM و نرم افزارهای مورد نیاز نیز موجود است. نیاز اصلی به نیروی انسانی متخصصی است که توانایی Surface modeling با دقت کافی را داشته باشد.

مشکلی که در تولید پره‌های توربین وجود دارد، این است که پره، محصول نهایی نیست بلکه محصول نهایی "توربین" است و پره‌ها باید طوری دقیق ساخته شوند، تا وقتی تعداد زیادی پره در توربین نصب میشوند شرایط لازم را ایجاد نمایند. ممکن است قطعه تولید شده چیزی شبیه به پره اصلی باشد، اما رعایت تolerانسهای مجاز، بالاخص در نقاط حساس پره، نیازمند تجربه کافی است. تolerانس‌های قسمتهای مختلف پره بالاخص در نقاط حساس بر توان خروجی موتور بویژه در موتورهای هوایی تأثیر تعیین کننده‌ای دارد. برای حل این مشکلات و تربیت نیروهای ماهر، باید انتقال دانش فنی لازم انجام شود و این دانش فنی باید از شرکتهایی انتقال یابد که دارای اعتبار بین المللی در این زمینه هستند. معمولاً شرکتهایی توانایی این کار را دارند که از اطلاعات OEM بهره‌مند باشند؛ یعنی با طراحی موتور آشنا بوده و تolerانسها را بدانند، حساسیتها را بشناسند و با پارامترهایی که باید از نظر ابعادی کنترل شوند، آشنایی داشته باشند. با توجه به مطالب بالا شاید این تصور پیش آید که بحث مهندسی معکوس منتفی است، چون نیازمند دانش طراحی و ساخت توربین است. اما باید توجه کرد که در قطعات با حساسیت کم و نیز توربین‌هایی که قدرت پایینی دارند، براحتی می‌توان مهندسی معکوس را پیاده کرد. برای قطعات بزرگ و حساس و به خصوص پره‌های هوایی این نکات قابل چشم پوشی نیست و باید با شرکتی که توان کافی را دارا باشد، همکاری شود. فعالیتی که در این بخش در کشور انجام شده روی پره‌های کوچک و ساده بوده که در آنها حفره‌های خنک کننده وجود ندارد.

## ۲- ریخته گری دقیق :

در ریخته گری دقیق، ابتدا قالب موم ساخته شده و سپس قطعات از جنس تزریق شده و پس از مونتاژ روی خوشه مومی پوسته سرامیک ایجاد میشود. در مرحله بعد موم تبخیر شده و پوسته سرامیکی به عنوان قالب عمل کرده و ریخته گری انجام میگردد. برای ساخت قطعات کوچک، دو کوره دوچمبره (Double chamber vim) موجود است. اما برای ساخت قطعات بزرگتر نیاز به کورههایی با ظرفیت بالاتر است. در حال حاضر برای ظرفیتهای بالا، در داخل کشور فقط دستگاه تکچمبره وجود دارد که معمولاً برای تولید شمش به صورت نیمه صنعتی بکار میرود. تاکنون چند قطعه به صورت آزمایشگاهی ریخته گری شده است. در این راستا چند بازدید انجام شده و امکاناتی نیز وارد شده است ولی این امکانات جهت تولید انبوه جوابگو نیست.

موضوع حایز اهمیت دیگر این است که در فرایند ریخته گری پارامترهای بسیاری از جمله پارامترهای محیطی مثل رطوبت، دما و غیره دخیل است که تجهیزات خاصی را جهت کنترل نیاز دارد. در شرکتهای معتبر این پارامترها از طریق سیستم کنترل مرکزی تنظیم میشوند که باید روی این موارد کار شود. از نظر دانش فنی قلب فرایند ریخته گری ساخت قالب سرامیکی بویژه برای پرههای نازک و ماهیچه خور است. از نظر نیروی انسانی، در این ۱۰ سال خوب عمل شده است اما از نظر دانش فنی باید روی قطعات مورد نظر با دقت کار شود، چون تولید قطعات به این روش دشواری خاص خود را دارد. البته برای تولید قطعات ساده و با ضخامتهای زیاد (توربینهای قدیمی و صنعتی) که از نظر تolerانس های ابعادی حساسیت کمتری دارند، مشکل چندانی وجود ندارد. اما در مورد قطعات نازک و قطعات ماهیچه خور و سوراخدار پیچیدگیها و حساسیتهای خاص وجود دارد. از آنجا که در ریخته گری دقیق، دانش پایه آن موجود است، در بحث دانش فنی باید بیشتر به نکات پیچیده و ظریف توجه شود. یعنی بعد از این باید برای کسب دانش فنی قطعات نازک، قطعات پیچیده و قطعات بزرگ دارای حساسیت بیشتر، تلاش شود. قطعات پس از ریخته گری معمولاً باید تحت عملیات HIP قرار گیرند. به دلیل عدم وجود تجهیزات مورد نیاز در حال حاضر قطعات ریختگی در خارج از کشور HIP میشوند.

## ۳- ماشین کاری :

قطعات سوپراآلیاژی بعد از ریخته گری باید ماشینکاری شوند که نقشه ها و دستورالعملهای لازم از طریق مهندسی معکوس آماده میشود. ماشین کاری سوپراآلیاژها صنعت مربوط به خود را دارد. سوپراآلیاژها و به خصوص آنهایی که ریخته گری می شوند، بسیار سخت و محکم میباشند. در ۱۰ سال گذشته برای تراشکاریهای ساده، تجهیزات خوبی خریداری شده است و دانش فنی آن در حال تکمیل و توسعه می باشد و تقریباً در تراشکاری پره ریخته شده، مشکلی وجود ندارد. اما تکنولوژی بعدی مورد نیاز در این قسمت، تکنولوژی سوراخکاری پرها به روش الکتروشیمیایی جهت ایجاد سوراخهای خنک کننده هوا روی پرها

می‌باشد. در این بخش فعلاً دانش فنی و تجهیزات لازم موجود نیست و وزارت نیرو در حال وارد کردن تکنولوژی آن است. در حال حاضر شرکت‌های داخلی برای سوراخکاری قطعات، آنها را به خارج از کشور ارسال می‌کنند .

#### ۴- پوشش‌دهی

برای پوشش‌دهی در کشور، دو مرکز خوب موجود است. یک مرکز در "صها" است که پوشش‌دهی پره‌های هوایی را انجام می‌دهد و با استانداردهای ۳۰ سال پیش کار می‌کند. مشکل این مرکز، قطع ارتباط با صنعت مادر خود و عدم به روزکردن استانداردهای خود است. مرکزی نیز در کرج وجود دارد که روی پوشش‌دهی پره‌های صنعتی وزارت نیرو مشغول فعالیت است. مطلب قابل توجه در اینجا، حرکت به سمت پوشش‌های جدید است. در حال حاضر قطعاتی در داخل کشور وجود دارند که با "پلازما اسپری" تحت خلاء، پوشش داده می‌شوند. هرچند که تجهیزات آن قبلاً خریداری شده است، ولی به طور متمرکز روی آن کاری صورت نگرفته است، لذا برنامه ریزی در این زمینه نیز ضروری است.

➤ تولید شمش سوپرآلیاژ فعلاً در کشور به‌صرفه نیست

کشورهای تولید کننده شمش سوپرآلیاژ در دنیا انگشت شمار هستند و تولیداتشان نیز بر اساس استانداردهایی است که قابل قبول مصرف‌کننده‌ها می‌باشد. بنابراین تولید شمش سوپرآلیاژ برای آنها به‌صرفه است. ولی برای کشور ما در حال حاضر وارد کردن شمش از خارج به صرفه‌تر است. بسته به نوع پره تولید شده، ۳۰ تا ۳۵ درصد هزینه تولید پره مربوط به شمش مصرفی می‌باشد. ولی در حال حاضر تولید پره در داخل در حدی نیست که نیاز به تولید شمش در داخل کشور باشد اما با توجه به نیازی که در آینده ایجاد می‌شود، تولید این شمش‌ها در آینده نزدیک اقتصادی خواهد بود.

#### معرفی تکنولوژی سوپرآلیاژ و میزان کاربرد آن در جهان و ایران

دکتر هاشمی مشاور سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران در زمینه معرفی مواد جدید مطالبی را بیان نموده است که قسمت اول آن مربوط به معرفی سوپر آلیاژها میباشد و در زیر آورده شده :

#### معرفی و کاربردها :

سوپرآلیاژها در واقع آلیاژهایی مقاوم در برابر حرارت، خوردگی و اکسیداسیون میباشند که به لحاظ ترکیب شیمیایی شامل سه گروه پایه نیکل، نیکل-آهن و پایه کبالت میباشند. اولین استفاده از سوپرآلیاژها در ساخت توربینهای گازی، طرحهای تبدیل ذغال سنگ، صنایع شیمیایی و صنایعی که نیاز به مقاومت حرارتی و خوردگی داشته اند بوده است. امروزه تناژ وسیعی از قطعات مصرفی در توربینهای گازی از جنس سوپرآلیاژها میباشند. در ذیل به بعضی از مصارف این قطعات اشاره شده است :

➤ توربینهای گازی هواپیما

- توربینهای بخار نیروگاههای تولید برق
- ساخت قالبهای ریختهگری و ابزارهای گرمکار
- مصارف پزشکی و دندانپزشکی
- فضاپیماها
- تجهیزات عملیات حرارتی
- سیستمهای نوترونی و هستهای
- سیستمهای شیمیایی و پتروشیمی
- تجهیزات کنترل آلودگی
- تجهیزات و کورههای نورد فلزات
- مبدلهای حرارتی تبدیل ذغال سنگ

به منظور انتخاب سوپرآلیاژها جهت مصرف در کاربردهای فوق لازم است خواص فنی نظیر شکل پذیری، استحکام، مقاومت خزشی، استحکام خستگی و پایداری سطحی در نظر گرفته شوند.

#### تقسیم‌بندی سوپرآلیاژها برحسب روش تولید :

با توجه به نحوه تولید میتوان سوپرآلیاژها را به چهار گروه کلی تقسیم‌بندی نمود که عبارتند از :

#### ۱) سوپرآلیاژهای کارپذیر

سوپرآلیاژهای کارپذیر در حقیقت گروهی از سوپرآلیاژها هستند که قابلیت کار مکانیکی دارند و از روشهای مکانیکی میتوان به آنها شکداد. به منظور تولید مقاطع معینی از سوپرآلیاژهای کارپذیر، اولین گام آن است که شمشهای سوپرآلیاژها به دلیل حضور عناصر فعال (عناصری که سریع در مجاورت هوا اکسید میشوند) در شرایط خاصی تهیه شوند. فرایندهای ذوب در خلاء در مورد تهیه سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن جزء ضروریات می باشد. اما در مورد سوپرآلیاژهای پایه کبالت امکان ذوب در هوا وجود دارد. این فرایند به طور خلاصه شامل ذوب القائی تحت خلاء (VIM)، ذوب مجدد قوس الکتریکی در خلاء (VAR) و ذوب مجدد با سرباره (ESR)، فرایندهای ترمومکانیکی و متالورژی پودر میباشد.

پس از تهیه شمشآلیاژهای کارپذیر به یکی از روشهای فوق عملیات شکلدهی صورت میگیرد. عملیات شکلدهی سوپرآلیاژها نیز میتواند توسط عملیات متداول کلیه آلیاژهای فلزی انجام پذیرد. سوپرآلیاژهای پایه آهن، کبالت و نیکل را میتوان به صورت مفتول، صفحه، ورق، نوار، سیم و اشکال دیگر توسط فرایندهای نورد، اکستروژن و آهنگری تولید نمود. معمولاً عملیات شکلدهی در دمای بالا صورت میگیرد و تعداد کمی از سوپرآلیاژها را میتوان به صورت سرد شکلدهی نمود. ساختارهای یکنواخت و ریزدانه‌ای که از شکلدهی سرد حاصل میشود نسبت به ساختارهای شکلدادن گرم ارجحیت دارند. عملیات ترمودینامیکی بر روی

سوپرآلیاژها معمولاً در حدود ۱۰۰۰-۹۵۰ درجه سانتیگراد انجام میشود که به این ترتیب در حین شکل دادن عملیات حرارتی نیز صورت میگیرد .

## ۲) سوپرآلیاژهای متالورژی پودر

بسیاری از انواع آلیاژهای کارپذیر از طریق فرایندهای متالورژی پودر تولید میگردند. امروزه قطعات متالورژی پودر از جنس سوپرآلیاژ با دانسیته کامل از طریق روشهای اکستروژن یا پرسکاری ایزواستاتیک گرم (HIP) تولید میگردند. مهمترین این قطعات قیچیها و سوزنهای جراحی میباشد . فرایندهای متالورژی پودر به دلیل داشتن مزایای زیر بر فرایندهای ریختهگری ترجیح داده میشوند هر چند که معایبی را نیز به همراه خواهند داشت :

- ✓ یکنواختی در ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی
- ✓ ریز بودن اندازه دانههای کریستالی
- ✓ کاهش جدایشها
- ✓ راندمان بالاتر از نظر مصرف مواد

اما مشکلاتی نظیر حضور گاز باقیمانده، آلودگی کربنی و آخالهای سرامیکی باعث میگردد که در برخی موارد نیز فرایندهای شمش ریزی و ترمومکانیکی متداول صورت پذیرند .

## ۳) سوپرآلیاژهای پلی کریستال ریختگی

وجود محدودیت‌های تکنولوژیکی سبب محدود شدن رشد صنعت سوپرآلیاژ می‌گردد و بنابراین با پیدایش فرایندهای جدید تولید، این صنعت نیز روز به روز توسعه مییابد. تعداد زیادی از فرایندها را میتوان در تولید قطعات سوپرآلیاژ با اندازه نزدیک به قطعه نهایی مورد استفاده قرار داد اما اساساً این قطعات توسط فرایند ریختهگری دقیق تولید میگردند . محدوده ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژهای ریختگی بسیار گستردهتر از سوپرآلیاژهای کارپذیر بوده و بنابراین خواص متنوعتری نیز از این طریق قابل حصول خواهند بود هر چند که انعطاف پذیری و مقاومت به خستگی در فرایندهای کار مکانیکی بهتر از ریختهگری خواهد بود، اما امروزه با توسعه فرایندهای جدید ریختهگری و انجام عملیات حرارتی متعاقب، خواص سوپرآلیاژهای ریختگی نیز افزایش یافته است .

## ۴) سوپرآلیاژهای تک کریستالی انجماد جهتدار

به منظور توسعه توربینهای گازی مصرفی در هواپیماها و افزایش دماهای کاری و کارایی موتورها، به طور مداوم روشهای تولید سوپرآلیاژها در حال بهبود است . قسمت‌های بحرانی توربینها معمولاً شامل پره‌های تحت فشار بالا، هواکشها و دیسکها میباشد. در طول ۱۵ سال گذشته تحقیقات بسیاری در زمینه افزایش راندمان توربینها صورت گرفته است و عمده این تحقیقات بر امکان افزایش دمای ورودی، فشارکاری و کاهش هزینههای تولید استوار بوده است . توسعه فرایند انجماد جهتدار به منظور تولید تک کریستالی‌های

ریختگی سبب شده تا بتوان از این طریق پره‌های توربین را با دانه‌های جهت‌دار در راستای اعمال تنش تولید نمود و به این ترتیب علاوه بر خواص پایدار حرارتی، استحکام خستگی، استحکام خزشی و انعطاف‌پذیری نیز افزایش یابند. با توسعه این تکنولوژی، امروزه در توربین‌های مصرفی در نیروگاه‌های برق نیز از قطعات تک‌کریستال از جنس سوپرآلیاژها استفاده به‌عمل می‌آید.

در سال‌های اخیر شرکت هواپیمایی PWA یکی از پیشگامان تولید سوپرآلیاژها می‌باشد و تولید آلیاژهای ۱۴۸۰ PWA به صورت تک‌کریستال توسط این شرکت، سبب افزایش عمرکاری هواپیمای جنگی F-۱۰۰ گردیده است. تقسیم‌بندی سوپرآلیاژها برحسب ترکیب شیمیایی:

به طور کلی این آلیاژها شامل سه گروه پایه نیکل، پایه آهن و پایه کبالت می‌باشند که بسته به درجه حرارت کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرند:

### (۱) سوپرآلیاژهای پایه نیکل

امروزه آلیاژهای نیکل در حالت‌های "تک‌فازی"، "رسوب سختی شده" و "مستحکم‌شده توسط رسوبات اسیدی و کامپوزیتها" در مصارف صنعتی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سوپرآلیاژهای پایه نیکل پیچیده‌ترین ترکیباتی می‌باشند که در قطعات دمای بالا به کار می‌روند. در حال حاضر ۵۰ درصد وزن موتورهای هواپیماهای پیشرفته از جنس این آلیاژها می‌باشد. خصوصیات اصلی آلیاژهای نیکل، پایداری حرارتی و قابلیت مستحکم شدن می‌باشد. بسیاری از این آلیاژها حاوی ۱۰ الی ۲۰ درصد کرم، حداکثر ۸ درصد آلومینیوم و تیتانیوم، ۵ تا ۱۵ درصد کبالت و مقادیر کمی مولیبدن، نیوبیم و تنگستن می‌باشند. دو گروه اصلی از آلیاژهای آهن-نیکل که میزان نیکل آنها بیشتر از مقدار آهن است عبارت از گروه Incoloy ۷۰۶ و Inconel ۷۱۸ می‌باشند.

این آلیاژها معمولاً حاوی ۳ تا ۵ درصد نیوبیم می‌باشند و در ردیف آلیاژهای پایه نیکل قرار می‌گیرند. آلیاژهای پایه نیکل معمولاً تا دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد استحکام خود را حفظ می‌کنند. اما در دماهای بالاتر به سرعت استحکام خود را از دست می‌دهند.

### (۲) سوپرآلیاژهای پایه آهن

سوپرآلیاژهای پایه آهن نشأت گرفته از فولادهای زنگ نزن آستینیتی می‌باشند که دارای زمینهای از محلول جامد آهن و نیکل بوده و برای پایداری زمینه نیاز به حداقل ۲۵ درصد نیکل است.

❖ گروه‌های متعددی از این آلیاژها تاکنون مشخص گردیده‌اند که هر یک با مکانیزمهای

خاصی مستحکم میشوند. برخی از این آلیاژها نظیر ۵۷ V- و ۲۸۶ A- حاوی ۲۵ تا ۳۵

درصد وزنی نیکل می‌باشند و استحکامشان به دلیل حضور آلومینیوم و تیتانیوم می‌باشد.

❖ گروه دوم آلیاژهای پایه آهن که آلیاژهای X۷۵۰ و Incoloy ۹۰۱ نمونه‌های آن میباشند، حداقل ۴۰ درصد وزنی نیکل داشته و همانند گروههای با نیکل بالاتر استحکام بخشی توسط سختی رسوبی صورت میگیرد .

❖ گروه دیگر این آلیاژها بر پایه آهن- نیکل- کبالت میباشند و استحکام این گروه در محدوده ۶۵۰ درجه سانتیگراد مناسب بوده و ضریب انبساط حرارتی آنها پایین میباشد . این آلیاژها شامل Incoloy با شماره‌های ۹۰۳، ۹۰۷، ۹۰۹، ۱-۱ PyrometCTX و PyrometCTX-۳ و غیره میباشند .

### ۳) سوپرآلیاژهای پایه کبالت

سوپرآلیاژهای کارپذیر پایه کبالت برخلاف سایر سوپرآلیاژها مکانیزم استحکام بخشی متفاوتی دارند و خواص حرارتی خوبی در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد خواهند داشت . سوپرآلیاژهای پایه کبالت حاوی کرم، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون خوبی داشته و هم چنین قابلیت جوشکاری و مقاومت به خستگی حرارتی آنها نسبت به آلیاژهای پایه نیکل بالاتر میباشد. از طرف دیگر امکان ذوب و ریختهگری این آلیاژ، در هوا با اتمسفر آرگون مزیت دیگری نسبت به سایر سوپرآلیاژها که نیاز به خلاء دارند می‌باشد. سه گروه اصلی آلیاژهای پایه کبالت را میتوان به صورت ذیل در نظر گرفت :

❖ آلیاژهایی که در دماهای بالا در محدوده ۶۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد مورد استفاده قرار میگیرند که شامل آلیاژهای S-۸۱۶، ۲۵HAYNES، ۲۵HAYNES، ۱۸۸ ۲۵HAYNES، ۵۵۶۲۵HAYNES، ۵۰UMCO میباشند.

❖ آلیاژهایی که تا حدود ۶۵۰ درجه سانتیگراد به کار میروند نظیر TN۳MP، ۱۵۹ MP

❖ آلیاژ مقاوم به سایش B ۶ Stellite

آلیاژ ۲۵۲۵ HAYNES بیشترین کاربرد را در میان آلیاژهای کارپذیر پایه کبالت داشته است و در ساخت قطعات گرمکار نظیر توربینهای گازی، اجزاء راکتورهای هستهای، ایمپلنت‌های جراحی و غیره مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آلیاژهای گروه پایه کبالت که شامل کرم- تنگستن- کربن میباشند معروف به آلیاژهای Satellite بوده که به شدت مقاوم به سایش میباشند . این گروه معمولاً در مواردی که مقاومت سایشی در درجه حرارت‌های بالا مورد نیاز باشد به کار میروند. در واقع سختی این مواد در دمای بالا حفظ شده و در مواقعی که نمیتوان در حین کار روغنکاری انجام داد به خوبی مورد استفاده قرار میگیرند .

### بازار سوپرآلیاژها :

شاید بتوان گسترش بازار سوپرآلیاژها را در دنیا مربوط به صنایع هوا \_ فضا در نظر گرفت که با توجه به رشد روزافزون این صنعت و قطعات یدکی آن در سطح جهان پیش بینی میگردد که تنها بازار قطعات یدکی



هوآپیمای جدید با موتورهای توربین گازی وارد بازار میشوند که نیمی از وزن این موتورها از جنس سوپر آلیاژ خواهد بود .

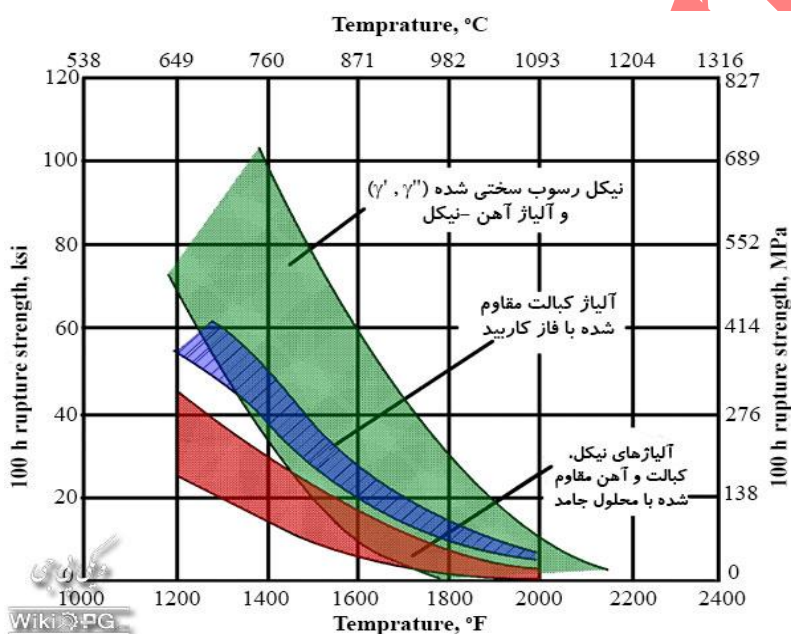
بر اساس آمارهای تخمینی موجود در ایران، سوپرآلیاژها سالانه به میزان ۸۰ میلیون دلار در سه وزارتخانه نفت، نیرو و دفاع مورد استفاده قرار میگیرند.

برگرفته از سایت <http://www.sstc.semnan.mihanblog.com>

h-Daneshmand.ir

سوپر آلیاژ (Superalloy) به آلیاژهای پایه نیکل، پایه آهن- نیکل و پایه کبالت گفته می شود که عموماً در دماهای بالاتر از ۵۴۰ درجه سانتی گراد استفاده می شوند. سوپر آلیاژ های پایه آهن - نیکل مانند آلیاژ IN-۷۱۸ از فن آوری فولاد های زنگ نزن توسعه یافته اند و معمولاً به صورت کار شده هستند. سوپر آلیاژ های پایه نیکل و پایه کبالت بسته به نوع کاربرد و ترکیب شیمیایی می توانند به صورت ریخته یا کار شده باشند.

از آغاز پیدایش سوپر آلیاژ ها، تعداد زیادی آلیاژ شناخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته و تعدادی نیز به عنوان اختراع ثبت شده اند. تعدادی از آن ها در طول سالیان گذشته غربال شده و تعدادی به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند. در شکل زیر رفتار تنش گسیختگی سه گروه آلیاژی با یکدیگر مقایسه شده اند (سوپر آلیاژهای پایه آهن- نیکل، پایه نیکل و پایه کبالت).



سوپرآلیاژ های دارای ترکیب شیمیایی مناسب را می توان با آهنگری و نورد به اشکال گوناگون درآورد. ترکیب های شیمیایی پرالیاژ تر معمولاً به صورت ریخته گری می باشند. ساختارهای سرهم بندی شده را می توان با جوشکاری یا لحیم کاری بدست آورد، اما ترکیب های شیمیایی که دارای مقادیر زیادی از فازهای سخت کننده هستند، به سختی جوشکاری می شوند. خواص سوپرآلیاژها را با تنظیم ترکیب شیمیایی و فرآیند (شامل عملیات حرارتی) می توان کنترل کرد و استحکام مکانیکی بسیار عالی در محصول تمام شده به دست آورد.

### اصول متالورژی سوپر آلیاژها :

سوپرآلیاژهای پایه آهن، نیکل و کبالت معمولاً دارای ساختار بلوری با شبکه مکعبی با سطوح مرکز دار (FCC) هستند. آهن و کبالت در دمای محیط دارای ساختار FCC نیستند. هر دو فلز در دماهای بالا یا در حضور عناصر آلیاژی دیگر، دگرگونی یافته و شبکه واحد آن ها به FCC تبدیل می شود. در مقابل،

ساختمان بلوری نیکل در همه دماها به شکل FCC است. حد بالایی این عناصر در سوپر آلیاژها توسط دگرگونی فازها و پیدایش فازهای آلوتروپیک تعیین نمی شود بلکه توسط دمای ذوب موضعی آلیاژها و انحلال فازهای استحکام یافته تعیین می گردد. در ذوب موضعی بخشی از آلیاژ که پس از انجماد ترکیب شیمیایی تعادلی نداشته است در دمایی کمتر از مناطق مجاور خود ذوب می شود. همه آلیاژها دارای یک محدوده دمایی ذوب می شوند و عمل ذوب شدن در دمای ویژه ای صورت نمی گیرد، حتی اگر جدایش غیر تعادلی عناصر آلیاژی وجود نداشته باشد. استحکام سوپر آلیاژها نه تنها به وسیله شبکه FCC و ترکیب شیمیایی آن، بلکه با حضور فازهای استحکام دهنده ویژه مانند رسوب ها افزایش می یابد. کار انجام شده بر روی سوپر آلیاژ (مانند تغییر شکل سرد) نیز استحکام را افزایش می دهد، اما این استحکام به هنگام قرارگیری فلز در دماهای بالا حذف می شود.

تمایل به دگرگونی از فاز FCC به فاز پایدارتر در دمای پایین وجود دارد که گاهی در سوپر آلیاژهای کبالت اتفاق می افتد. شبکه FCC سوپر آلیاژ قابلیت انحلال وسیعی برای بعضی عناصر آلیاژی دارد و رسوب فازهای استحکام دهنده (در سوپر آلیاژهای پایه آهن - نیکل و پایه نیکل) انعطاف پذیری بسیار عالی آلیاژ را به همراه دارد. چگالی آهن خالص ۷,۸ گرم بر سانتی متر مکعب و چگالی نیکل و کبالت تقریباً ۸,۹ گرم بر سانتی متر مکعب است. چگالی سوپر آلیاژهای پایه آهن - نیکل تقریباً ۷,۹-۸,۳ گرم بر سانتی متر مکعب، پایه کبالت ۸,۳-۹,۴ و پایه نیکل ۷,۸-۸,۹ است.



چگالی سوپر آلیاژها به مقدار عناصر آلیاژی افزوده شده بستگی دارد. عناصر آلیاژی Ti، Cr و Al چگالی را کاهش و W، Re و Ta آنرا افزایش می دهند. مقاومت به خوردگی سوپر آلیاژها نیز به عناصر آلیاژی افزوده شده و به ویژه Cr، Al و محیط بستگی دارد.

دمای ذوب عناصر خالص نیکل، کبالت و آهن به ترتیب ۱۴۹۵، ۱۴۵۳ و ۱۵۳۷ درجه سانتی گراد است. دمای ذوب حداقل (دمای ذوب موضعی) و دامنه ذوب سوپر آلیاژها، تابعی از ترکیب شیمیایی و فرآیند اولیه است. به طور کلی دمای ذوب موضعی سوپر آلیاژهای پایه کبالت نسبت به سوپرآلیاژها پایه نیکل بیشتر

است. سوپرآلیاژهای پایه نیکل ممکن است در دمای ۱۲۰۴ درجه سانتی گراد از خود ذوب موضعی نشان دهند. انواع پیشرفته سوپر آلیاژ های پایه نیکل تک بلور دارای مقادیر محدودی از عناصر کاهش دهنده دمای ذوب هستند و به همین لحاظ، دارای دمای ذوب موضعی برابر یا کمی بیشتر از سوپر آلیاژ های پایه کبالت هستند.

## ویژگی ها و خواص سوپر آلیاژها



- ۱- فولادهای معمولی و آلیاژهای تیتانیوم در دماهای بالاتر از ۵۴۰ درجه سانتی گراد دارای استحکام کافی نیستند و امکان خسارت دیدن آلیاژ در اثر خوردگی وجود دارد.
- ۲- چنانچه استحکام در دماهای بالاتر (زیر دمای ذوب که برای اکثر آلیاژها تقریباً ۱۲۰۴-۱۳۷۱) مورد نیاز باشد، سوپر آلیاژ های پایه نیکل انتخاب می شوند.
- ۳- از سوپر آلیاژهای پایه نیکل می توان در نسبت دمایی بالاتری (نسبت به دمای ذوب) در مقایسه با مواد تجاری موجود استفاده کرد. فلزات دیرگداز (نسوز) نسبت به سوپر آلیاژ ها دمای ذوب بالاتری دارند ولی سایر خواص مطلوب آن ها را ندارند و به همین خاطر به طور وسیعی مورد استفاده قرار نمی گیرند.
- ۴- سوپر آلیاژ های پایه کبالت را می توان به جای سوپر آلیاژ های پایه نیکل استفاده کرد که این جایگزینی به استحکام مورد نیاز و نوع خوردگی بستگی دارد.
- ۵- در دماهای پایین تر وابسته به استحکام مورد نیاز، سوپر آلیاژ های پایه آهن - نیکل نسبت به سوپر آلیاژ های پایه نیکل و پایه کبالت کاربرد بیشتری پیدا کرده اند.
- ۶- استحکام سوپر آلیاژ نه تنها مستقیماً به ترکیب شیمیایی بلکه به فرآیند ذوب، آهنگری و روش شکل دهی، روش ریخته گری و بیشتر از همه به عملیات حرارتی پس از شکل دهی، آهنگری یا ریخته گری بستگی دارد.
- ۷- سوپر آلیاژ های پایه آهن - نیکل نسبت به سوپر آلیاژ های پایه نیکل و پایه کبالت ارزان تر هستند.

۸- اکثر سوپر آلیاژ های کار شده برای بهبود مقاومت خوردگی دارای مقداری کروم هستند. مقدار کروم در آلیاژهای ریخته در ابتدا زیاد بوده، اما به تدریج مقدار آن کاهش یافت تا عناصر آلیاژی دیگری برای افزایش خواص مکانیکی سوپر آلیاژ های دما بالا، به آن ها افزوده شوند. در سوپر آلیاژ های پایه نیکل با کاهش کروم مقدار آلومینیم افزایش یافت، در نتیجه مقاومت اکسیداسیون آن ها در همان سطح اولیه باقی می ماند و یا افزایش می یابد، اما مقاومت در برابر انواع دیگر خوردگی کاهش می یابد.

۹- سوپر آلیاژ ها مقاومت در برابر اکسیداسیون بالایی دارند اما در بعضی موارد مقاومت خوردگی کافی ندارند. در کاربرد هایی مانند توربین هواپیما که دما بالاتر از ۷۶۰ درجه سانتی گراد است سوپر آلیاژها باید دارای پوشش کافی باشند. سوپر آلیاژها در کاربردهای طولانی مدت در دماهای بالاتر از ۶۴۹ درجه سانتی گراد مانند توربین های گازی زمینی می توانند پوشش داشته باشند.

۱۰- فن آوری پوشش دهی سوپر آلیاژ ها بخش مهمی از کاربرد و توسعه آن ها می باشد. نداشتن پوشش به معنی کارایی کم سوپر آلیاژ در دراز مدت و دماهای بالاست.

۱۱- در سوپر آلیاژ ها به ویژه در سوپر آلیاژ های پایه نیکل بعضی از عناصر در مقادیر جزئی تا زیاد اضافه شده اند. در بعضی از آلیاژ ها تعداد عناصر کنترل شده موجود تا ۱۴ عنصر و بیشتر می تواند باشد.

۱۲- نیکل، کبالت، کروم، تنگستن، مولیبدن، رنیم، هافنیم و دیگر عناصر استفاده شده در سوپر آلیاژ ها اغلب گران بوده و مقدارشان در طی زمان متغییر است.

### کاربرد سوپر آلیاژها

کاربرد سوپر آلیاژ ها در دماهای بالا بسیار گسترده و شامل قطعات و اجزای هواپیما، تجهیزات شیمیایی و پتروشیمی است. دما گاز در بخش داغ موتور هواپیما ممکن است به بالاتر از ۱۰۹۳ درجه سانتی گراد برسد. با استفاده از سیستم های خنک کننده دمای اجزای فلزی کاهش پیدا می کند و سوپر آلیاژ که توانایی کار کردن در این دمای بالا را دارد، جز اصلی بخش داغ به شمار می رود. اهمیت سوپر آلیاژها در تجارت روز را می توان با یک مثال نشان داد. در سال ۱۹۵۰ فقط ۱۰ درصد از کل وزن توربین های گاز هواپیما از سوپر آلیاژ ها ساخته می شد. اما در سال ۱۹۸۵ میلادی این مقدار به ۵۰ درصد رسید.

جدول زیر کاربرد های سوپر آلیاژ ها را نشان می دهد. باید خاطر نشان ساخت که همه کاربردها به استحکام در دمای بالا نیاز ندارند. ترکیب و مقاومت خوردگی سوپر آلیاژ ها، مواد استاندارد برای ساخت وسایل پزشکی به وجود آورده است. سوپر آلیاژ ها هم چنین کاربردهایی در دماهای بسیار پایین پیدا کرده اند.

سیستم نیروگاه های هسته ای	قطعات پزشکی	قطعات نیروگاه های توربین بخار	قطعات توربین های گاز هواپیما و صنعتی
مکانیزم های کنترل انرژی	دندان پزشکی	تیغه ها	دیسک ها
سوپاپ بخار	ابزار جراحی	لوله های خروج گاز	پیچ ها
فنرها	قطعات فضا پیما	قطعات انتخابی خودرو	شفت ها (محورها)

لوله ها	پوسته های آنرودینامیکی	توربو شارژرها	پوسته ها
صنایع شیمیایی و پتروشیمی	قطعات موتور جت	سوپاپ های دود	تیغه ها
پیچ ها	تجهیزات عملیات حرارتی	فرآیند فلزات	پرده های هواشکن
سوپاپ ها	سینی ها	ابزار و قالب های کار گرم	محفظه های احتراق
مخازن واکنش	نگهدارنده ها	قالب های ریخته گری	لوله های خروج گاز
لوله ها و پمپ ها	تسمه های نقاله		محورهای انتقال نیرو

## معرفی تکنولوژی سوپرآلیاژ و میزان کاربرد آن در جهان و ایران

### معرفی و کاربردها

سوپرآلیاژها در واقع آلیاژهایی مقاوم در برابر حرارت، خوردگی و اکسیداسیون می باشند که به لحاظ ترکیب شیمیایی شامل سه گروه پایه نیکل، نیکل-آهن و پایه کبالت می باشند. اولین استفاده از سوپرآلیاژها در ساخت توربین های گازی، طرح های تبدیل ذغال سنگ، صنایع شیمیایی و صنایعی که نیاز به مقاومت حرارتی و خوردگی داشته اند بوده است .

امروزه تناژ وسیعی از قطعات مصرفی در توربین های گازی از جنس سوپرآلیاژها می باشند. در ذیل به بعضی از مصارف این قطعات اشاره شده است :

- توربین های گازی هواپیما
- توربین های بخار نیروگاه های تولید برق
- ساخت قالب های ریخته گری و ابزارهای گرمکار
- مصارف پزشکی و دندانپزشکی
- فضاییماها
- تجهیزات عملیات حرارتی
- سیستم های نوترونی و هسته ای
- سیستم های شیمیایی و پتروشیمی
- تجهیزات کنترل آلودگی
- تجهیزات و کوره های نورد فلزات
- مبدل های حرارتی تبدیل ذغال سنگ

به منظور انتخاب سوپرآلیاژها جهت مصرف در کاربردهای فوق لازم است خواص فنی نظیر شکل پذیری، استحکام، مقاومت خزشی، استحکام خستگی و پایداری سطحی در نظر گرفته شوند .

تقسیم‌بندی سوپرآلیاژها برحسب روش تولید

با توجه به نحوه تولید می‌توان سوپرآلیاژها را به چهار گروه کلی تقسیم‌بندی نمود که عبارتند از:

### ۱) سوپرآلیاژهای کارپذیر

سوپرآلیاژهای کارپذیر در حقیقت گروهی از سوپرآلیاژها هستند که قابلیت کار مکانیکی دارند و از روش‌های مکانیکی می‌توان به آنها شکل داد. به منظور تولید مقاطع معینی از سوپرآلیاژهای کارپذیر، اولین گام آن است که شمش‌های سوپرآلیاژها به دلیل حضور عناصر فعال (عنصری که سریع در مجاورت هوا اکسید می‌شوند) در شرایط خاصی تهیه شوند. فرایندهای ذوب در خلاء در مورد تهیه سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن جزء ضروریات می‌باشد. اما در مورد سوپرآلیاژهای پایه کبالت امکان ذوب در هوا وجود دارد. پس از تهیه شمش آلیاژهای کارپذیر به یکی از روش‌های فوق عملیات شکل‌دهی صورت می‌گیرد. عملیات شکل‌دهی سوپرآلیاژها نیز می‌تواند توسط عملیات متداول کلیه آلیاژهای فلزی انجام پذیرد. سوپرآلیاژهای پایه آهن، کبالت و نیکل را می‌توان به صورت مفتول، صفحه، ورق، نوار، سیم و اشکال دیگر توسط فرایندهای نورد، اکستروژن و آهنگری تولید نمود. معمولاً عملیات شکل‌دهی در دمای بالا صورت می‌گیرد و تعداد کمی از سوپرآلیاژها را می‌توان به صورت سرد شکل‌دهی نمود. ساختارهای یکنواخت و ریزدانه‌ای که از شکل‌دهی سرد حاصل می‌شود نسبت به ساختارهای شکل‌دادن گرم ارجحیت دارند. عملیات ترمودینامیکی بر روی سوپرآلیاژها معمولاً در حدود ۹۵۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود که به این ترتیب در حین شکل‌دادن عملیات حرارتی نیز صورت می‌گیرد.

### ۲) سوپرآلیاژهای متالورژی پودر

بسیاری از انواع آلیاژهای کارپذیر از طریق فرایندهای متالورژی پودر تولید می‌گردند. امروزه قطعات متالورژی پودر از جنس سوپرآلیاژ با دانسیته کامل از طریق روش‌های اکستروژن یا پرسکاری ایزواستاتیک گرم (HIP) تولید می‌گردند. مهمترین این قطعات قیچی‌ها و سوزنهای جراحی می‌باشند. فرایندهای متالورژی پودر به دلیل داشتن مزایای زیر بر فرایندهای ریخته‌گری ترجیح داده می‌شوند هر چند که معایبی را نیز به همراه خواهند داشت:

- یکنواختی در ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی

- ریز بودن اندازه دانه‌های کریستالی

- کاهش جدایش‌ها

- راندمان بالاتر از نظر مصرف مواد

اما مشکلاتی نظیر حضور گاز باقیمانده، آلودگی کربنی و آخال‌های سرامیکی باعث می‌گردد که در برخی موارد نیز فرایندهای شمش‌ریزی و ترمومکانیکی متداول صورت پذیرند.

### ۳ سوپر آلیاژهای پلی کریستال ریختگی

وجود محدودیت‌های تکنولوژیکی سبب محدود شدن رشد صنعت سوپر آلیاژ می‌گردد و بنابراین با پیدایش فرایندهای جدید تولید، این صنعت نیز روز به روز توسعه می‌یابد .

تعداد زیادی از فرایندها را می‌توان در تولید قطعات سوپر آلیاژ با اندازه نزدیک به قطعه نهایی مورد استفاده قرار داد اما اساساً این قطعات توسط فرایند ریخته‌گری دقیق تولید می‌گردند .

محدوده ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژهای ریختگی بسیار گسترده‌تر از سوپر آلیاژهای کارپذیر بوده و بنابراین خواص متنوع‌تری نیز از این طریق قابل حصول خواهند بود هر چند که انعطاف‌پذیری و مقاومت به خستگی در فرایندهای کار مکانیکی بهتر از ریخته‌گری خواهد بود، اما امروزه با توسعه فرایندهای جدید ریخته‌گری و انجام عملیات حرارتی متعاقب، خواص سوپر آلیاژهای ریختگی نیز افزایش یافته است .

### ۴ سوپر آلیاژهای تک کریستالی انجماد جهت‌دار

به‌منظور توسعه توربین‌های گازی مصرفی در هواپیماها و افزایش دماهای کاری و کارایی موتورها، به‌طور مداوم روش‌های تولید سوپر آلیاژها در حال بهبود است .

قسمت‌های بحرانی توربین‌ها معمولاً شامل پره‌های تحت فشار بالا، هواکش‌ها و دیسک‌ها می‌باشند. در طول ۱۵ سال گذشته تحقیقات بسیاری در زمینه افزایش راندمان توربین‌ها صورت گرفته است و عمده این تحقیقات بر امکان افزایش دمای ورودی، فشارکاری و کاهش هزینه‌های تولید استوار بوده است. توسعه فرایند انجماد جهت‌دار به‌منظور تولید تک کریستالی‌های ریختگی سبب شده تا بتوان از این طریق پره‌های توربین را با دانه‌های جهت‌دار در راستای اعمال تنش تولید نمود و به این ترتیب علاوه بر خواص پایدار حرارتی، استحکام خستگی، استحکام خزشی و انعطاف‌پذیری نیز افزایش یابند .

با توسعه این تکنولوژی، امروزه در توربین‌های مصرفی در نیروگاه‌های برق نیز از قطعات تک کریستال از جنس سوپر آلیاژها استفاده به‌عمل می‌آید .

در سال‌های اخیر شرکت هواپیمایی PWA یکی از پیشگامان تولید سوپر آلیاژها می‌باشد و تولید آلیاژهای PWA ۱۴۸۰ به صورت تک کریستال توسط این شرکت، سبب افزایش عمرکاری هواپیمای جنگی F-۱۰۰ گردیده است .

تقسیم‌بندی سوپر آلیاژها برحسب ترکیب شیمیایی به طور کلی این آلیاژها شامل سه گروه پایه نیکل، پایه آهن و پایه کبالت می‌باشند که بسته به درجه حرارت کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرند

### بازار سوپر آلیاژها

شاید بتوان گسترش بازار سوپر آلیاژها را در دنیا مربوط به صنایع هوا \_ فضا در نظر گرفت که با توجه به رشد روزافزون این صنعت و قطعات یدکی آن در سطح جهان پیش بینی می‌گردد که تنها بازار قطعات یدکی هواپیماها بالغ بر ۴٫۵ میلیارد دلار باشد، بررسی‌ها حاکی از آنست که تا سال ۲۰۱۵ تعداد ۱۶۰۰۰ فروند



هواپیمای جدید با موتورهای توربین گازی وارد بازار می‌شوند که نیمی از وزن این موتورها از جنس سوپر آلیاژ خواهد بود.

بر اساس آمارهای تخمینی موجود در ایران، سوپرآلیاژها سالانه به میزان ۸۰ میلیون دلار در سه وزارتخانه نفت، نیرو و دفاع مورد استفاده قرار می‌گیرند.

[h-daneshmand.ir](http://h-daneshmand.ir)