بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

مواد پیشرفته

جلسه هفتم

(سوپرآلیاژها- معرفی، انواع، اثر عناصر آلیاژی و ریزساختار)

دکتر رضا اسلامی فارسانی

معرفی سوپرآلیاژها

فولادهای زنگ نزن در دهه های دوم و سوم قرن بیستم میلادی نقطه شروعی برای برآورده شدن خواسته های مهندسی در دمای بالا بودند. در ادامه معلوم شد که این مواد تحت این شرایط دارای استحکام محدودی هستند.

جامعه متالورژی با توجه به نیازهای روزافزون به وجود آمده، با ساخت ماده جایگزینی به جای فولاد زنگ نزن تحت عنوان سوپرآلیاژ به این نیاز پاسخ داد.

صنعت سوپرآلیاژها با استفاده از آلیاژهای پایه کبالت برای برآورده کردن نیاز به استحکام در دمای بالا در موتورهای هواپیما پدیدار شد.

معرفی سوپرآلیاژها

سوپرآلیاژها با عملکرد بالا، دارای استحکام مکانیکی و مقاومت به خزش عالی در دمای بالا، عمر خستگی بالا، پایداری فازی، پایداری سطحی و مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون خوب بوده و عموماً در دماهای بالای 540 درجه سانتی گراد مورد استفاده قرار می گیرند.

از آغاز پیدایش سوپرآلیاژها، تعداد زیادی آلیاژ شناخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته و تعدادی نیز به عنوان اختراع ثبت شده اند. تعدادی از آنها در طول سالیان گذشته غربال شده و تعدادی به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند.

انواع سوپرآلیاژها

سوپرآلیاژ به آلیاژهای پایه نیکل، پایه آهن- نیکل و پایه کبالت گفته می شود که عموماً در دماهای بالاتر از 540 درجه سانتی گراد بکار گرفته می شوند.

سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل مانند آلیاژ اینکونل 718 (IN-718) از فناوری فولادهای زنگ نزن توسعه یافته اند و معمولاً به صورت کار شده هستند.

سوپر آلیاژ های پایه نیکل و پایه کبالت با توجه به نوع کاربرد و ترکیب شیمیایی می توانند به صورت ریخته یا کار شده باشند.

سوپرآلیاژهای پایه نیکل

سوپرآلیاژهای پایه نیکل پیچیده ترین ترکیباتی هستند که در قطعات دمای بالا بکار می روند. در حال حاضر 50 درصد وزن موتورهای هواپیماهای پیشرفته از جنس این آلیاژهاست. خصوصیات اصلی آلیاژهای نیکل، پایداری حرارتی و قابلیت مستحکم شدن است.

بسیاری از این آلیاژها حاوی 20 - 10 درصد کروم، حداکثر 8 درصد آلومینیم و تیتانیم، 15 - 5 درصد کبالت و مقادیر کمی مولیبدن، نایوبیم و تنگستن هستند.

سوپرآلیاژهای پایه نیکل

دو گروه اصلی از آلیاژهای آهن- نیکل که میزان نیکل آنها بیشتر از مقدار آهن است عبارتند از Incoloy 706 و Inconel 718. این آلیاژها معمولاً حاوی 5-3 درصد نایوبیم هستند و در ردیف آلیاژهای پایه نیکل قرار می گیرند.

در سوپرآلیاژهای پایه نیکل، بین 13-9 عناصر آلیاژی وجود دارند که مقدار هر یک باید به دقت کنترل شود. علاوه بر عناصر آلیاژی، عناصر مضری همچون فسفر، گوگرد، نیتروژن، اکسیژن و سیلیسیم نیز در حین فرآیند ذوب و ریخته‌گری وارد ترکیب می‌شوند که باید مقادیر آنها نیز به دقت کنترل شود.

سوپرآلیاژهای پایه نیکل

آلیاژهای پایه نیکل معمولاً تا دمای 650 درجه سانتی گراد استحکام خود را حفظ می کنند، اما در دماهای بالاتر استحکام خود را از دست می دهند.

سوپرآلیاژهای پایه نیکل در تمامی دماها دارای ساختار بلوری با شبکه مکعبی با سطوح مرکز دار (FCC) هستند.

چگالی سوپرآلیاژها به مقدار عناصر آلیاژی افزوده شده بستگی دارد:
عناصر آلیاژی Ti، Cu و Al، چگالی را کاهش و W، Ta وRe، چگالی را افزایش می دهند.

سوپرآلیاژهای پایه نیکل

ترکیب شیمیایی برخی سوپرآلیاژهای پایه نیکل برحسب درصد وزنی

آلیاژ	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Al	Fe	C
Inconel 600	15/5	76	-	-	-	-	8	0/08
Inconel 625	21/5	61	9	3/6	0/2	0/2	2/5	0/05
Nimonic 75	19/5	75	-	-	0/4	0/15	2/5	0/12
Nimonic 86	25	65	10	-	-	-	-	0/05

سوپرآلیاژهای پایه نیکل

اگر چه سوپرآلیاژهای پایه نیکل عموماً با محلول جامد سخت می شوند، ولی مهمترین آلیاژهای این گروه، دارای رسوب ترکیبات بین فلزی در زمینه FCC هستند.

در سوپرآلیاژهای پایه نیکل کبالت‌دار و همچنین حاوی Ti و Al، استحکام با رسوب فاز بهبود می یابد. IN-718 از آلیاژهای سخت شده با رسوب فاز است.

در بین سوپرآلیاژهای پایه نیکل استحکام یافته با محلول جامد آلیاژهایی مانند Hastelloy و IN-627 قرار دارند.

نمونه سوپرآلیاژهای پایه نیکل استحکام یافته با توزیع فاز اکسید نیز مانند آلیاژ IN-MA-600E است که استحکام آنها با توزیع ذرات خنثی مانند ایتریا و در بعضی موارد با رسوب فاز افزایش می‌یابد.

سوپرآلیاژهای پایه کبالت

سوپرآلیاژهای پایه کبالت خواص حرارتی خوبی در دمای حدود 1000 درجه سانتیگراد دارند. این آلیاژها به هر دو حالت ساختارهای ریختگی و کار شده وجود دارند.

نمونه ای از آلیاژهای ریختگی، X-40 و نمونه ای از آلیاژهای کار شده، L-605(HA-25) هستند.

ترکیبات بین فلزی مانند رسوب‌هایی که در سوپرآلیاژهای پایه نیکل یا پایه آهن- نیکل در محدوده وسیعی وجود دارند، در آلیاژهای پایه کبالت یافت نمی‌شوند.

سوپرآلیاژهای پایه کبالت

سوپرآلیاژهای پایه کبالت حاوی کرم، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون خوبی داشته و همچنین قابلیت جوشکاری و مقاومت به خستگی حرارتی آنها نسبت به آلیاژهای پایه نیکل بالاتر است.

از طرف دیگر امکان ذوب و ریخته گری این آلیاژ در هوا با اتمسفر آرگن مزیت دیگری نسبت به سایر سوپرآلیاژها که نیاز به خلاء دارند، می باشد.

سوپرآلیاژهای پایه کبالت

سه گروه اصلی آلیاژهای پایه کبالت را می توان به صورت زیر در نظر گرفت:

- آلیاژهایی که در دماهای بالا در محدودهٔ 1150 - 650 درجه سانتیگراد مورد استفاده قرار می گیرند که شامل آلیاژهای S-816، 25HAYNES، 55625HAYNES و 50UMCO هستند.
- آلیاژهایی که تا حدود 650 درجه سانتیگراد بکار می روند نظیر TN3MP و 159 MP
- آلیاژ مقاوم به سایش B 6 Stellite

سوپرآلیاژهای پایه آهن

سوپرآلیاژهای پایه آهن نشات گرفته شده از فولادهای زنگ نزن آستینتی هستند که دارای زمینه هایی از محلول جامد آهن و نیکل بوده و برای پایداری زمینه نیاز به حداقل 25 درصد نیکل است.

گروه‌های متعددی از این آلیاژها تاکنون مشخص شده اند که هر یک با مکانیزم های خاصی مستحکم می شوند. برخی از این آلیاژها نظیر 57-V و 286-A حاوی 35-25 درصد وزنی نیکل هستند و استحکامشان به دلیل حضور آلومینیوم و تیتانیم می‌باشد.

سوپرآلیاژهای پایه آهن

گروه دوم آلیاژهای پایه آهن که آلیاژهای X750 و Incoloy901 نمونه های آن هستند، حداقل دارای 40 درصد وزنی نیکل بوده و همانند گروه های با نیکل بالاتر، استحکام بخشی آنها توسط فرآیند سختی رسوبی صورت می گیرد.

گروه دیگر این آلیاژها بر پایه آهن- نیکل- کبالت است که استحکام این گروه در محدوده 650 درجه سانتیگراد مناسب بوده و ضریب انبساط حرارتی آنها پایین است.

این آلیاژها شامل Incoloy با شماره های 903، 907 و 909، PyrometCTX-3 و ... هستند.

عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژها

نیکل: نیکل عمده‌ترین عنصر موجود در سوپرآلیاژهای پایه نیکل و تشکیل دهنده اصلی ساختار فاز آستنیتی (FCC) بوده و درصد عمده‌ای از زمینه این آلیاژها را به خود اختصاص می‌دهد.

نیکل باعث افزایش چقرمگی و انعطاف پذیری و مقاومت به خوردگی آلیاژ به ویژه در محیط‌های احیاءکننده می‌شود.

عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژها

کروم: کروم یکی از عناصر مهم موجود در سوپرآلیاژها بوده که سبب ایجاد لایه‌های محافظ و جلوگیری از خوردگی و نیز تشکیل فازهای کاربیدی می‌شود. این عنصر همچنین می‌تواند وارد محلول جامد فاز آستنیت زمینه شده و از این طریق نیز موجب بالا رفتن استحکام شود. کروم با ایجاد لایه Cr_2O_3 پایداری سطحی را بهبود می‌بخشد.

آلومینیوم: این عنصر یکی از عناصر تشکیل دهنده فاز به صورت (Ni_3Al) بوده و همچنین سبب مقاومت به خوردگی آلیاژ از طریق ایجاد اکسید آلومینیم در سطوح خارجی می‌شود.

عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژها

کبالت: این عنصر علاوه بر آن که با ایجاد محلول جامد می‌تواند به افزایش استحکام سوپرآلیاژ کمک کند، در سوپرآلیاژهای کارپذیر پایه نیکل، موجب بالارفتن درجه حرارت حلالیت فاز نیز می‌شود و از این رو نقش مهمی در حفظ استحکام در درجه حرارت های بالا دارد.

حذف کبالت ازسوپرآلیاژهای پایه نیکل کارپذیر موجب کاهش درجه حرارت کارگرم آلیاژ می‌شود.

به دلیل تاثیر کبالت بر دمای انحلال کاربیدها، کاهش آن در سوپرآلیاژهای پایه نیکل ریختگی باعث کاهش خواص مکانیکی آن ها می‌شود.

عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژها

تیتانیم: تیتانیم نیز یکی از عناصر اصلی تشکیل دهنده فاز به شکل Ni_3Ti بوده و همچنین باعث افزایش مقاومت به خوردگی داغ آلیاژ می‌شود.

این عنصر با مشارکت مولیبدن تشکیل کاربید داده و عامل ایجاد رسوب سختی و فازهای بین فلزی است.

کاهش مقدار تیتانیم باعث افزایش نقطه ذوب آلیاژ شده، اما اثرات مطلوب ذکر شده در بالا را نیز تضعیف خواهد کرد. بنابراین مقدار تیتانیم باید در محدوده بهینه انتخاب شود.

عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژها

زیرکنیم: زیرکنیم از جمله عناصری است که باعث افزایش قابلیت انعطاف پذیری سوپرآلیاژها می‌شود.

این عنصر به همراه بور، باعث افزایش مقاومت خزشی و همچنین سبب بهبود خواص کششی و خواص تنش گسیختگی آلیاژ می‌شود.

زیرکنیم عاملی برای جذب عناصر مضر نیز محسوب می‌شود.

عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژها

عناصر دیرگداز: این عناصر شامل مولیبدن، تانتالیم، نایوبیم و وانادیم هستند که از مقادیر چند دهم تا حداکثر 15% در سوپرآلیاژهای کارپذیر پایه نیکل حضور دارند. عناصر مذکور نقش مهمی در زمینه استحکام بخشی به محلول جامد و ایجاد کاربیدها مخصوصاً به صورت MC و $M_{23}C_6$ ایفا می‌کنند.

نایوبیم به تنهایی در تشکیل فاز در سوپرآلیاژهای پایه نیکل دخیل بوده و نیز باعث کاهش انرژی نقص در چیده شدن شبکه آستنیت زمینه می‌شود و شعاع ذرات و همچنین نظم کریستالی فاز را افزایش می‌دهد.

عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژها

عناصر دیرگداز باعث ایجاد ترکیبات بین فلزی می‌شوند که اغلب در درجه حرارت های بالا منجر به مقاومت مکانیکی سوپرآلیاژ می شود.

گرچه بهترین عناصر استحکام بخش زمینه سوپرآلیاژ، عناصر سنگین مثل مولیبدن و تنگستن به همراه نایوبیم و تانتالیم هستند، ولی این عناصر باعث افزایش دانسیته سوپرآلیاژ شده که این موضوع استفاده از آنها را در صنایع هوافضا محدود می‌سازد.

مقادیر اضافی مولیبدن و تنگستن تشکیل فازهای نامطلوب و ترد را احتمال می دهند. تنگستن همانند کبالت، درجه حرارت سالیدوس آلیاژهای دوتایی نیکل را بالا می‌برد.

Company Logo

عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژها

کربن: میزان کربن در سوپرآلیاژهای پایه نیکل تقریباً در حدود 1/0 درصد بوده و اثرات زیر را در آلیاژ دارد:

- افزایش استحکام مرزدانه ناشی از تشکیل کاربید
- افزایش پایداری با خارج شدن عناصر فعال از زمینه آلیاژ
- کاهش چکش خواری و افزایش درصد تخلخل با افزایش درصد کربن

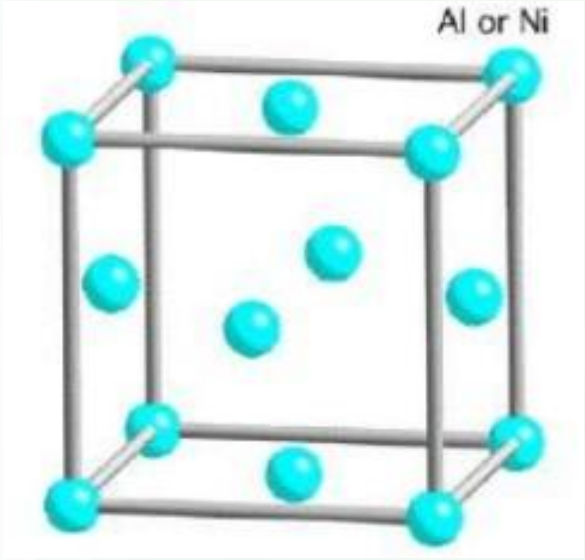
ساختار کریستالی سوپرآلیاژها

سوپرآلیاژهای پایه آهن، نیکل و کبالت معمولاً دارای ساختار بلوری با شبکه مکعبی با سطوح مرکزدار (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 آنها به FCC تبدیل می شود.

ساختمان بلوری نیکل در همه دماها به شکل FCC است.

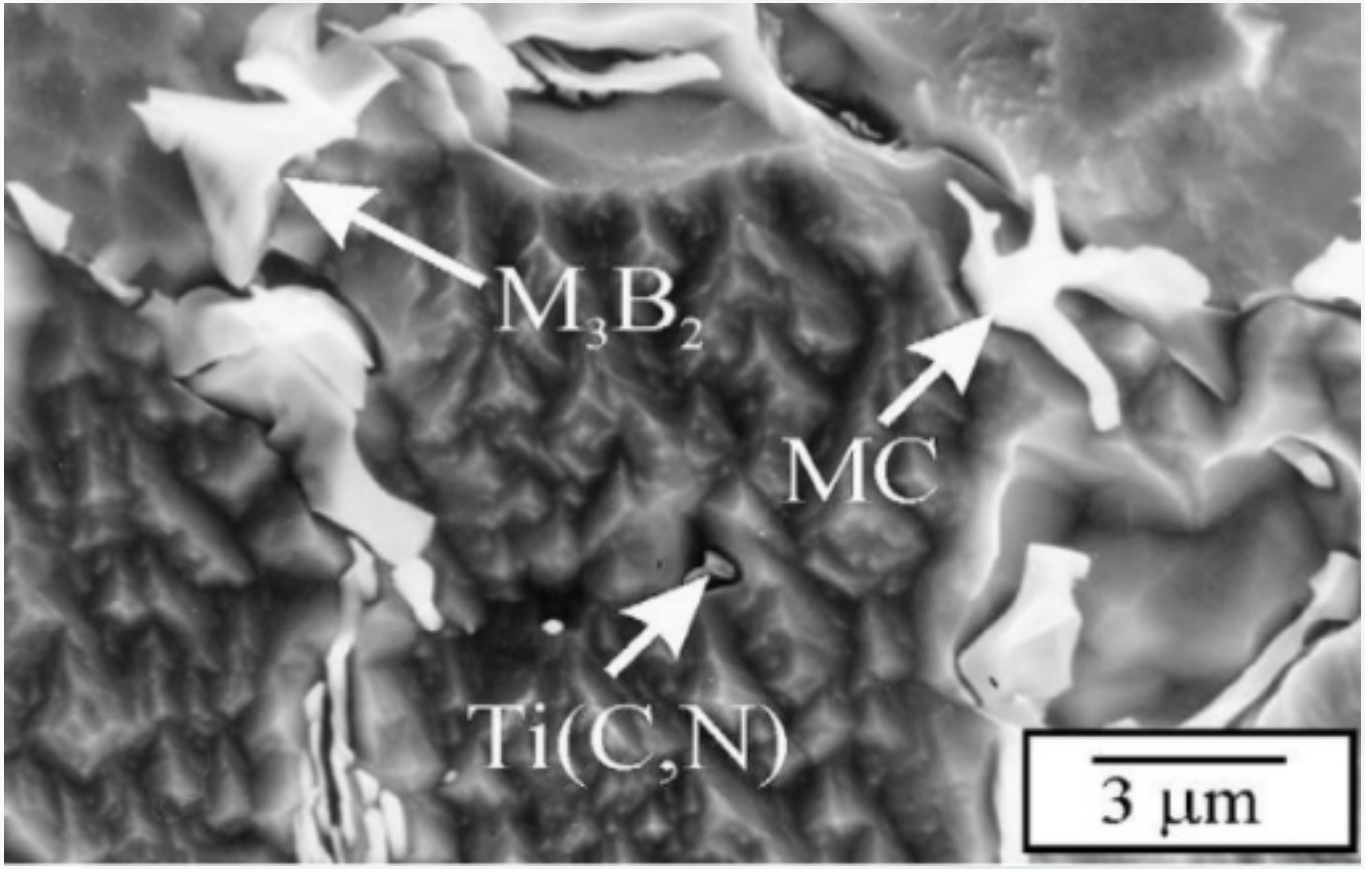
ریزساختار سوپرآلیاژها



- فاز گاما (γ)

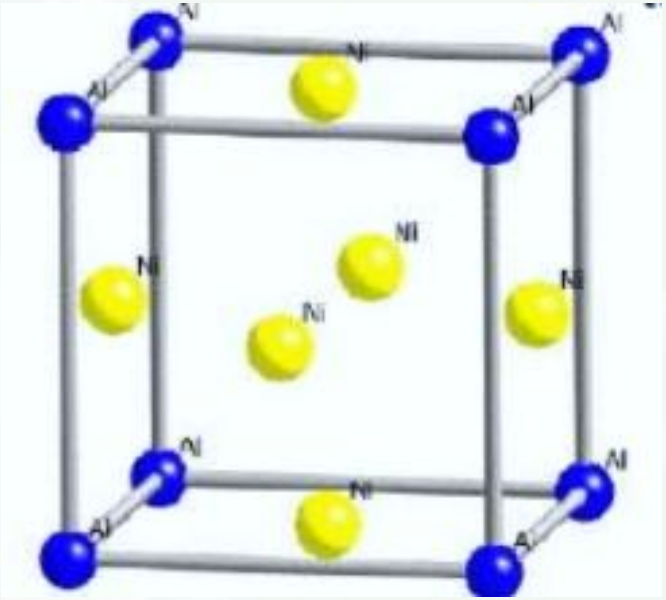
- فاز پیوسته زمینه
- ساختار کریستالی FCC
- حاوی عناصر آلیاژی محلول جامد مانند کروم، کبالت، مولیبدن و تنگستن
- حضور عناصر محلول جامد باعث کاهش انرژی نقص در چیده شدن نابجایی ها شده که پدیده لغزش را مشکل ساخته و باعث افزایش مقاومت به خزش می شوند.

ریزساختار سوپرآلیاژها



پراکندگی رسوبات در زمینه گاما

ریزساختار سوپرآلیاژها



- فاز Ỳ

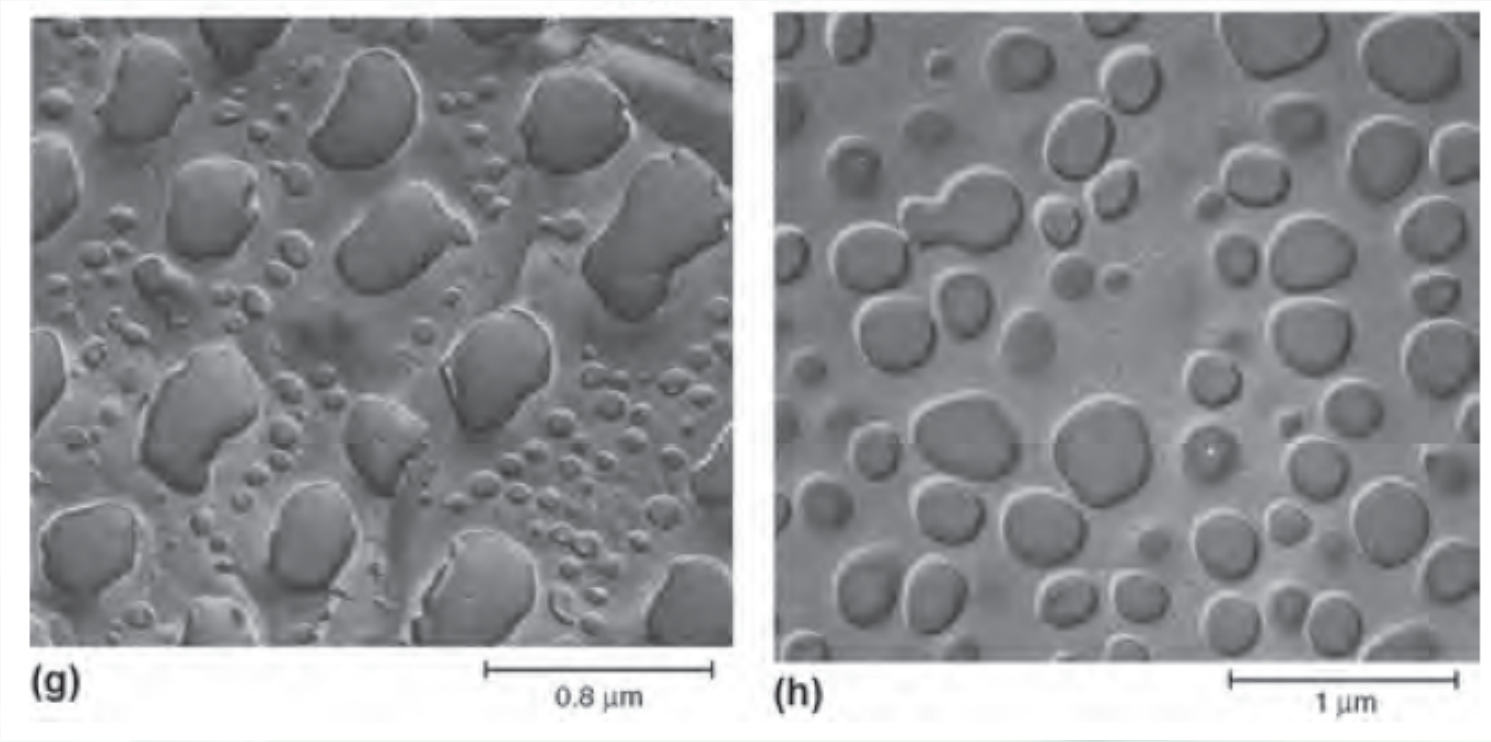
–فاز استحکام دهنده در سوپرآلیاژها

–ترکیب شیمیایی Ni3(Al,Ti)

–ساختار کریستالی FCC

–دارای فصل مشترک کوهیرنت با زمینه گاما

ریزساختار سوپرآلیاژها

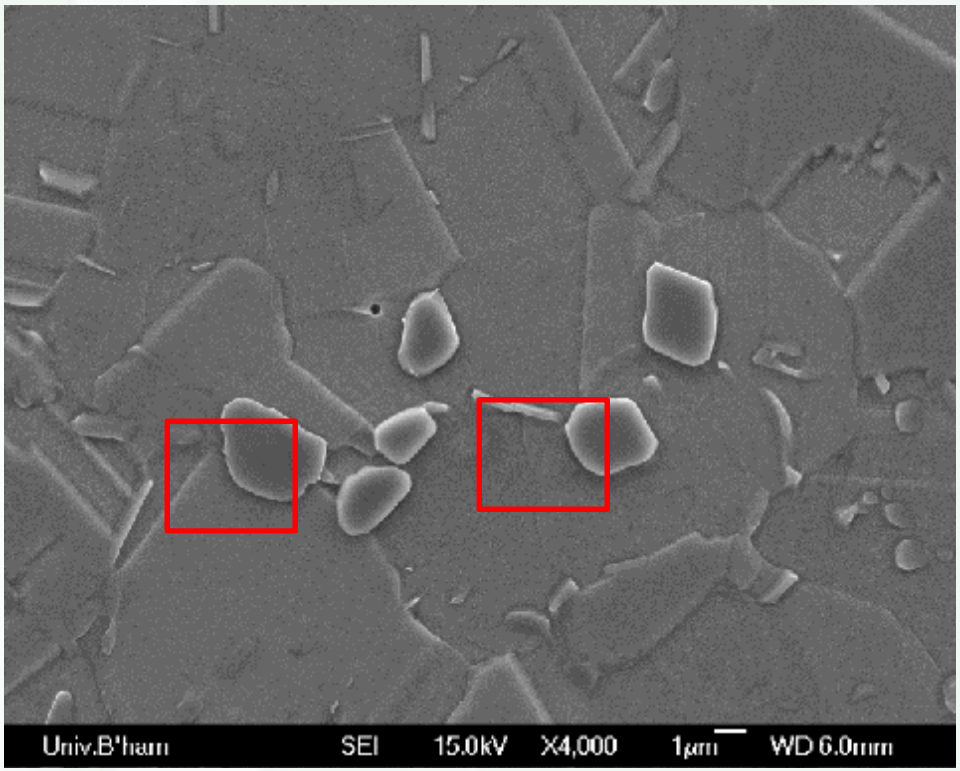


نمونه ای از رسوبات $\grave{Y}$ توزیع شده در زمینه گاما
برای آلیاژ اینکونل 718

ریزساختار سوپرآلیاژها

- کاربیدهای MC

M: فلزاتی نظیر Ti، Nb، Cr و Mo



—درشت دانه

—پایداری حرارتی بالاتر نسبت به Ỳ

—ساختار کریستالی FCC

—رابطه جهتی خاصی با زمینه ندارند.

ریزساختار سوپرآلیاژها

- کاربید M_6C

– ساختار کریستالی مکعبی پیچیده

– محصول تجزیه کاربید MC در حین سرویس دهی است.

– رسوب گذاری در مرزدانه ها

– هندسه بلوکی شکل

ریزساختار سوپرآلیاژها

- کاربید $M_{23}C_6$

– ساختار کریستالی FCC

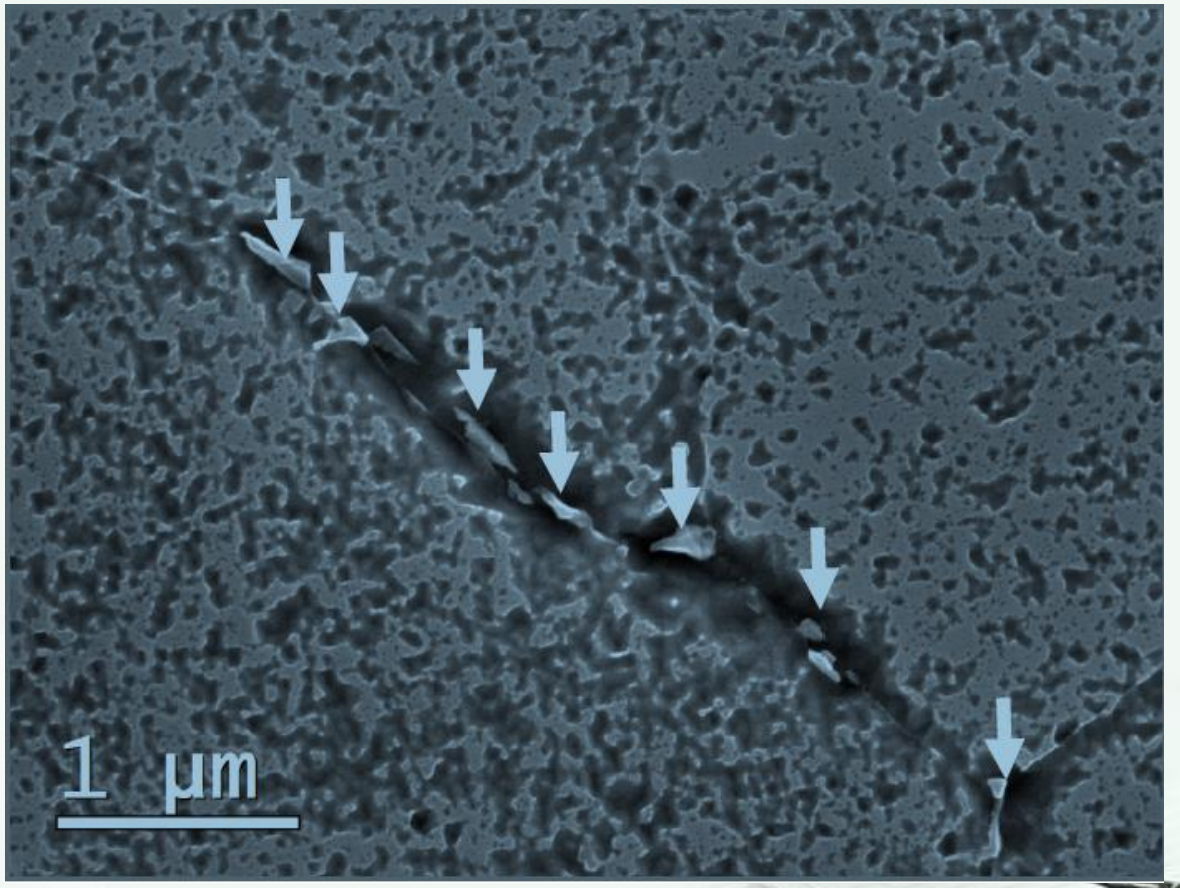
– رسوب گذاری در امتداد مرزدانه ها

– دارای مقدار بالای کروم که تاثیر مثبت بر خواص سوپرآلیاژ دارند.

– از تجزیه کاربید M_6C و یا MC بوجود می آیند و یا مستقیم بر روی مرزدانه ها جوانه زنی می کنند.

– جوانه زنی آنها بر روی مرزدانه موجب جلوگیری از لغزش مرزدانه ای شده و موجب افزایش مقاومت به خزش می شود.

ریزساختار سوپرآلیاژها



رسوبات ریز $M_{23}C_6$ در مرزدانه‌ها