

باسمه تعالی

سوپر آلیاژهای پایه نیکل

سید عبدالکریم سجادی

استاد گروه مهندسی متالورژی و مواد
دانشکده مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد

بهار ۱۳۹۲

عنوان و نام پدیدآور: سوپر آلیاژهای پایه نیکل / تألیف دکتر سید عبدالکریم سجادی.
مشخصات نشر: مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری: ۲۹۶ ص.: جدول، نمودار.
فروست: (انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ شماره ۶۱۵).
شابک: (ISBN: 978-964-386-289-3)
وضعیت فهرست نویسی: فیبا.
یادداشت: واژه نامه.
یادداشت: کتابنامه.
موضوع: سوپر آلیاژها.
موضوع: آلیاژهای مقاوم حرارت.
شناسه افزوده: سجادی، عبدالکریم، ۱۳۴۱ -
شناسه افزوده: دانشگاه فردوسی مشهد.
رده بندی کنگره: ۹۱۳۹۲ س ۳ / TN ۷۰۰
رده بندی دیویی: ۶۲۰/۱۸
شماره کتابخانه ملی: ۳۳۷۴۶۸۵



انتشارات، شماره ۶۱۵

سوپر آلیاژهای پایه نیکل

تألیف

دکتر عبدالکریم سجادی

ویراستار علمی

دکتر علی حائریان اردکانی

وزیری، ۲۹۶ صفحه، ۱۰۰۰ نسخه، چاپ اول، زمستان ۱۳۹۲

امور فنی و چاپ: مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

بها: ۷۵۰۰۰ ریال

ISBN: 978-964-386-289-3

شابک ۹۷۸-۹۶۴-۳۸۶-۲۸۹-۳

فهرست مطالب

پیش گفتار	۹
فصل ۱ - معرفی، ترکیب شیمیایی و ریزساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل	۱۱
(۱-۱) معرفی	۱۱
(۲-۱) تاریخچه‌ی توسعه‌ی سوپرآلیاژهای پایه نیکل	۱۳
(۳-۱) ترکیب شیمیایی	۱۵
(۴-۱) مشخصه‌های متالورژیکی	۲۱
(۱-۴-۱) فاز زمینه γ	۲۱
(۲-۴-۱) فاز رسوبی γ'	۲۲
(۱-۲-۴-۱) ساختار و سیستم‌های لغزشی فاز رسوبی γ'	۲۵
(۲-۲-۴-۱) نقص چیدمان یا عیوب انباشتگی	۲۵
(۳-۲-۴-۱) استحکام تسلیم γ'	۲۶
(۴-۲-۴-۱) پایداری γ'	۲۶
(۵-۲-۴-۱) تجزیه γ' به η (Ni ₃ Ti) و γ'' (Ni ₃ Nb or Ta)	۲۸
(۳-۴-۱) یوتکتیک γ/γ'	۲۸
(۴-۴-۱) کاربیدها	۲۹
(۵-۴-۱) بُریدها	۳۳
(۶-۴-۱) فازهای مضر TCP	۳۳
(۷-۴-۱) γ' مرزدانه‌ای	۳۹
مراجع	۴۰
فصل ۲ - روش‌های تولید سوپرآلیاژها	۴۱
(۱-۲) مقدمه	۴۱
(۲-۲) روش‌های تولید سوپرآلیاژها	۴۲
(۳-۲) فرآیندهای شکل‌دهی سوپرآلیاژها	۴۴
(۱-۳-۲) فرآیند تولید به روش ماشین‌کاری	۴۵
(۲-۳-۲) فرآیند تولید به روش آهن‌گری	۴۶
(۱-۲-۳-۲) عوامل مؤثر روی آهن‌گری پذیری	۴۷
(۲-۲-۳-۲) متغیرهای فرآیند آهن‌گری	۴۸

۴۹..... ۳-۳-۲ فرآیند تولید به روش ریخته‌گری

۵۱..... ۴-۲ ذوب و تولید شمش

۵۲..... ۱-۴-۲ شمش ریز دانه

۵۳..... ۲-۴-۲ تبدیل شمش به تختال

۵۳..... ۳-۴-۲ روش‌های تولید شمش

۵۶..... ۵-۲ مزایای ذوب در خلأ

۵۷..... ۶-۲ مکانیزم تشکیل و حذف آخال‌های Al_2O_3 در سوپرآلیاژهای پایه نیکل

۶۱..... ۷-۲ ریخته‌گری دقیق

۶۲..... ۱-۷-۲ مراحل اساسی ریخته‌گری دقیق

۶۳..... ۲-۷-۲ مزایای روش ریخته‌گری دقیق

۶۳..... ۳-۷-۲ مواد سازنده‌ی مدل

۶۵..... ۴-۷-۲ ماهیچه و ماهیچه‌سازی

۶۶..... ۵-۷-۲ موم‌زدایی

۶۶..... ۶-۷-۲ پخت و پیش‌گرم قالب

۶۷..... ۸-۲ انجماد جهت‌دار

۶۷..... ۹-۲ ریخته‌گری تک‌بلور

۷۲..... مراجع

فصل ۳ - عملیات حرارتی و اثرات آن بر ریزساختار و خواص مکانیکی سوپرآلیاژهای پایه نیکل. ۷۳

۷۳..... ۱-۳ عملیات حرارتی سوپرآلیاژهای پایه نیکل

۷۵..... ۱-۱-۳ عملیات حرارتی انحلالی

۷۶..... ۲-۱-۳ عملیات حرارتی پیرسازی

۷۸..... ۲-۲ تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار سوپرآلیاژهای خزش کرده

۷۸..... ۱-۲-۳ همگن کردن ریزساختار

۷۹..... ۲-۲-۳ تأثیر بر مورفولوژی، میزان و اندازه‌ی رسوب

۸۰..... ۳-۳ استحاله‌های فازی

۸۱..... ۴-۳ واکنش‌های کاربیدی

۸۲..... ۵-۳ تأثیر متغیرهای عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی سوپرآلیاژها

۸۲..... ۱-۵-۳ دمای عملیات انحلالی

۸۲..... ۲-۵-۳ عملیات انحلال جزئی

۸۳..... ۳-۵-۳ سرعت سرد کردن

۸۵..... ۴-۵-۳ عملیات پیر کردن

۸۶..... ۶-۳ سینتیک رشد ذرات γ'

۸۸..... ۱-۶-۳ سینتیک رشد ذرات γ' بدون حضور تنش

۹۹..... ۲-۶-۳ سینتیک رشد ذرات γ' در حضور تنش

۱۰۱..... ۱-۲-۶-۳ بررسی ریزساختار سوپرآلیاژ IN-738LC تحت تأثیر عملیات حرارتی پیرسازی تحت تنش

۱۰۳..... ۲-۲-۶-۳ نیروی محرکه‌ی ایجاد ساختار جهت‌دار تحت تأثیر تنش

۱۰۴..... ۳-۲-۶-۳ تأثیر ساختار الواری روی خواص خزشی

۳-۲-۴ تغییرات اندازه‌ی متوسط و درصد حجمی فاز ذرات γ در حین رشد ۱۰۴
 مراجع ۱۰۷

فصل ۴ - خواص مکانیکی و مکانیزم‌های استحکام‌دهی سوپرآلیاژهای پایه نیکل ۱۰۹

۴-۱ خواص مکانیکی ۱۰۹
 ۴-۲ مکانیزم‌های استحکام‌دهی یا سخت‌کننده ۱۱۲
 ۴-۲-۱ تشکیل محلول جامد ۱۱۳
 ۴-۲-۱-۱ عدم انطباق اندازه ۱۱۵
 ۴-۲-۱-۲ عدم انطباق ضریب الاستیسیته ۱۱۵
 ۴-۲-۱-۳ نظم کم دامنه ۱۱۶
 ۴-۲-۱-۴ نقص چیدن ۱۱۷
 ۴-۲-۲ رسوب‌سختی ۱۱۸
 ۴-۲-۲-۱ سخت شدن در اثر وجود نظم ۱۱۹
 ۴-۲-۲-۲ سخت شدن در اثر عدم انطباق ثابت شبکه‌ی زمینه و ذره ۱۲۳
 ۴-۲-۳ تأثیر مورفولوژی مرزدانه‌ها بر استحکام ۱۲۶
 ۴-۳ مدل‌های تغییرشکل سوپرآلیاژهای رسوب‌سخت شده‌ی پایه نیکل ۱۲۸
 ۴-۳-۱ مدل‌های برش رسوب ۱۲۸
 ۴-۳-۲ مدل‌های عبور نابجایی ۱۲۹
 ۴-۳-۳ مدل‌های تغییرشکل مرزدانه ۱۲۹
 ۴-۴ تأثیر درصد حجمی و اندازه‌ی γ روی خواص مکانیکی سوپرآلیاژهای پایه نیکل ۱۳۰
 مراجع ۱۳۵

فصل ۵ - ویژگی‌های سوپرآلیاژهای پایه نیکل GTD-111 و Udimet-500 ۱۳۷

۵-۱ سوپرآلیاژ GTD-111 ۱۳۷
 ۵-۱-۱ مشخصات و خواص سوپرآلیاژ GTD-111 ۱۳۸
 ۵-۱-۲ رفتار کششی دمای بالای سوپرآلیاژ پایه نیکل GTD-111 ۱۴۰
 ۵-۲ سوپرآلیاژ Udimet 500 ۱۴۷
 ۵-۲-۱ عناصر تشکیل‌دهنده‌ی سوپرآلیاژ Udimet 500 ۱۴۷
 ۵-۲-۲ ریزساختار Udimet 500 ریختگی ۱۴۸
 ۵-۲-۳ خواص کششی سوپرآلیاژ Udimet 500 ۱۴۹
 ۵-۳ عملیات حرارتی Udimet 500 ریختگی ۱۴۹
 ۵-۳-۱ عملیات محلول‌سازی کامل ۱۴۹
 ۵-۳-۲ عملیات محلول‌سازی جزئی ۱۵۰
 ۵-۳-۳ عملیات پیرسازی ۱۵۰
 ۵-۴ تأثیر متغیرهای عملیات حرارتی روی خصوصیات Udimet 500 ۱۵۰
 ۵-۴-۱ تأثیر سرعت سرد شدن از مرحله‌ی انحلال جزئی روی ریزساختار ۱۵۲
 ۵-۴-۲ تأثیر سرعت سرد کردن روی درصد رسوب γ ۱۵۸
 ۵-۴-۳ تأثیر سرعت سرد شدن از مرحله‌ی انحلال جزئی روی خواص مکانیکی ۱۵۹
 ۵-۴-۴ سختی ۱۵۹

۱۶۰	..... استحکام کششی (۲-۳-۴-۵)
۱۶۰	..... الف) استحکام کششی در دمای محیط
۱۶۳	..... ۳-۳-۴-۵) خواص خزشی
۱۶۴	..... مراجع
۱۶۵	..... فصل ۶ - رفتار و مکانیزم‌های خزشی سوپرآلیاژها
۱۶۵	..... ۱-۶) عوامل مؤثر بر کاهش استحکام ناشی از افزایش دما
۱۶۶	..... ۲-۶) خزش
۱۶۸	..... ۳-۶) مکانیزم‌های تغییرشکل خزشی
۱۶۸	..... ۱-۳-۶) تغییرشکل در تنش برشی نظری
۱۶۸	..... ۲-۳-۶) لغزش و دوقلوبی شدن
۱۶۹	..... ۳-۳-۶) خزش ناشی از نفوذ
۱۷۱	..... ۴-۳-۶) لغزش مرزدانه‌ای
۱۷۴	..... ۱-۴-۳-۶) برخی مشخصات لغزش مرزدانه‌ای
۱۷۵	..... ۲-۴-۳-۶) مکانیزم‌های ایجاد لغزش مرزدانه‌ای
۱۸۰	..... ۵-۳-۶) خزش هارپر - دورن
۱۸۰	..... ۶-۳-۶) تفاوت خزش لغزش مرزدانه‌ای ناشی از نفوذ با خزش هارپر - دورن
۱۸۱	..... ۷-۳-۶) مهاجرت مرزدانه
۱۸۱	..... ۸-۳-۶) خزش نابجایی
۱۸۴	..... ۴-۶) تغییر مکانیزم در خزش
۱۸۵	..... ۵-۶) شکست در دماهای بالا
۱۸۷	..... ۱-۵-۶) نقشه‌ی شکست دمای بالا
۱۹۱	..... ۶-۶) تأثیر چند پارامتر متالورژیکی روی خزش
۱۹۱	..... ۱-۶-۶) اندازه‌ی دانه
۱۹۲	..... ۲-۶-۶) ترکیب شیمیایی
۱۹۲	..... ۳-۶-۶) روش ذوب
۱۹۲	..... ۴-۶-۶) کار مکانیکی
۱۹۳	..... ۷-۶) رفتار خزشی سوپرآلیاژهای پایه نیکل
۱۹۳	..... ۱-۷-۶) خزش مرحله‌ی اول
۱۹۴	..... ۲-۷-۶) خزش مرحله‌ی دوم یا یکنواخت
۱۹۵	..... ۳-۷-۶) مکانیزم‌های خزش در ناحیه‌ی سوم
۱۹۶	..... ۸-۶) مکانیزم‌های تغییرشکل خزشی سوپرآلیاژ پایه نیکل GTD-111
۲۰۳	..... ۹-۶) اثر فاز γ' بر خواص خزشی
۲۰۸	..... ۱۰-۶) اثر شیار بر خواص خزشی
۲۰۸	..... ۱-۱۰-۶) تأثیر شیار بر شکست
۲۰۸	..... ۱-۱-۱۰-۶) انعطاف‌پذیری خزشی چند محوره
۲۰۹	..... ۲-۱-۱۰-۶) روش‌های بررسی حالت چند محوره
۲۱۹	..... ۲-۱۰-۶) تأثیر شیار بر عمر و رفتار خزشی سوپرآلیاژها
۲۱۹	..... ۱-۲-۱۰-۶) بررسی روش‌های رشد ترک خزشی در سوپرآلیاژها

فهرست مطالب ۷

۲۲۳	.....IN718 تأثیر شیار بر خواص خزشی و گسیختگی
۲۲۴	.....IN738LC تأثیر شیار روی عمر خزشی سوپراآلیاژ پایه نیکل
۲۳۰	..... (۱۱-۶) نقشه‌ی مکانیزم‌های تغییر شکل خزشی
۲۳۱	..... (۱۲-۶) روش‌های مخرب تخمین عمر
۲۳۱	..... (۱-۱۲-۶) پارامتر لارسون - میلر
۲۳۲	..... (۲-۱۲-۶) معادله‌ی مانکنن - گرانت
۲۳۳	..... (۳-۱۲-۶) معادله‌ی دابز - میلیکا
۲۳۴	..... (۴-۱۲-۶) معادله‌ی کول و همکاران
۲۳۵	..... (۵-۱۲-۶) روش θ -Projection
۲۴۴	..... (۱۳-۶) خصوصیات خزشی سوپراآلیاژ GTD-111
۲۴۷	..... مراجع
۲۵۱	فصل ۷ - تغییرات ریزساختاری و عیوب ناشی از خزش
۲۵۱	..... (۱-۷) سوپراآلیاژهای پایه نیکل
۲۵۱	..... (۱-۱-۷) پایداری γ'
۲۵۲	..... (۲-۱-۷) تجزیه‌ی γ' به η (Ni_3Ti) و γ'' (Ni_3Nb or Ta)
۲۵۳	..... (۳-۱-۷) واکنش‌های کاربیدی
۲۵۴	..... (۴-۱-۷) فازهای مضر TCP
۲۵۴	..... (۵-۱-۷) γ' مرزدانه‌ای
۲۵۴	..... (۶-۱-۷) زوال ریزساختار سوپراآلیاژهای پایه نیکل
۲۵۸	..... (۲-۷) ترک‌ها و حفره‌های مرزدانه‌ای
۲۶۱	..... (۳-۷) به هم پیوستن حفرات
۲۶۷	..... (۴-۷) بازیابی و تشکیل شبکه‌ی نابجایی در فصل مشترک γ/γ' و درون رسوب‌های γ'
۲۷۳	..... مراجع
۲۷۵	فصل ۸ - روش‌های برطرف کردن عیوب و تغییرات ریزساختاری ناشی از خزش
۲۷۵	..... (۱-۸) مقدمه
۲۷۶	..... (۲-۸) آنیل تحت فشار یا فشردن ایزواستاتیک داغ (HIP)
۲۷۸	..... (۳-۸) تأثیر HIP روی بستن حفره‌ها و افزایش چگالی قطعات ریختگی
۲۸۰	..... (۴-۸) اثرات HIP روی ساختار متالورژیکی پره‌های ریختگی
۲۸۱	..... (۵-۸) اثرات HIP روی خصوصیات مکانیکی پره‌های ریختگی
۲۸۴	..... (۶-۸) تأثیر متغیرهای HIP روی خصوصیات متالورژیکی و مکانیکی
۲۸۵	..... (۷-۸) بازسازی و تعمیر پره‌ها با استفاده از HIP
۲۸۹	..... (۸-۸) عوامل محدود کننده و عوارض منفی HIP
۲۹۲	..... مراجع
۲۹۱	..... واژه‌یاب
۲۹۵	..... پیوست‌ها

تقدیم به:

پدر و مادر؛

همسر و فرزندانم سینا و پویا؛

و همه‌ی متاورژها.

PressSum.ac.ir

باسمه تعالی

پیش گفتار

سوپرآلیاژهای پایه نیکل، مواد مقاوم به خزشی هستند که در شرایط دمایی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این مواد در ساخت قطعات داغ توربین‌های گازی و بخار، مبدل‌های حرارتی، دیگ‌های بخار، عایق‌های حرارتی، قطعات داغ موتور هواپیماها و موشک‌ها استفاده می‌شود. آنها به ترکیبی از خواصی چون استحکام بالا، مقاومت خزشی و خستگی خوب، مقاومت به خوردگی و توانایی کار در دماهای بالا برای زمان‌های طولانی (یعنی پایداری متالورژیکی) نیاز دارند. ترکیب استحکام دما بالا و مقاومت به آسیب سطحی این مواد با دیگر مواد فلزی قابل مقایسه نیست. در آنها از عناصر کاربیدزا و دیرگدازی با نقطه ذوب بالا استفاده شده است. قطعات تهیه شده از آلیاژهای دمای بالا با روش‌های مختلفی ساخته می‌شوند. جنس، اندازه، شکل و محل مصرف و شرایط کاری قطعات تعیین‌کننده روش ساخت آنها هستند. ریخته‌گری، فورج و متالورژی پودر مهم‌ترین روش‌های تولید سوپرآلیاژها محسوب می‌شوند.

آلیاژهای دمای بالا طی قرار گرفتن در شرایط کاری و دمای بالا، دچار تغییرات ریزساختاری می‌شوند. این تغییرات در اثر عوامل مختلفی مانند: میزان پایداری فاز رسوبی γ' و تجزیه آن، تشکیل فازهای مضر، واکنش‌های کاربیدی، تغییر مورفولوژی فاز γ' مرزدانه‌ای و ایجاد ترک‌ها و حفره‌های مرزدانه‌ای به وجود می‌آیند. در این کتاب دلائل و شرایط ایجاد این تغییرات و عیوب در سوپرآلیاژهای پایه نیکل مورد بحث قرار خواهد گرفت. همچنین، تشکیل شبکه نابجائی در فصل مشترک $\gamma-\gamma'$ و درون رسوب‌های γ' در اثر خزش‌های طولانی مدت در دماهای بالا و تنش پایین بررسی می‌شود. در کتاب حاضر سعی می‌شود که نقش عملیات فشار داغ ایزوستاتیک (HIP) در بهبود خصوصیات متالورژیکی و مکانیکی و افزایش عمر قطعات ریخته‌گری توربین‌های گازی بررسی و مطالعه شود. همچنین اهمیت آن در بازسازی و تعمیر پره‌ها و قطعات مستعمل توربین‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

کتاب حاضر مشتمل بر هشت فصل است که با بیان تاریخچه‌ای از طراحی و توسعه‌ی سوپرآلیاژهای پایه نیکل، خصوصیات شیمیایی و ریزساختاری و مکانیکی آنها را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد. در این کتاب، با تأکید بر روش ریخته‌گری، مشخصات و ویژگی‌ها و مراحل

انجام آن و نیز مکانیزم‌های تشکیل و حذف آخال‌های به وجود آمده در حین شمش‌ریزی مورد بحث قرار خواهد گرفت. همچنین، به تأثیر متغیرهای عملیات حرارتی روی خصوصیات ریزساختاری و خواص مکانیکی این آلیاژها پرداخته خواهد شد. در این کتاب ضمن ارائه مدل‌های مختلف تغییرشکل سوپرآلیاژهای رسوب سخت شده پایه نیکل، مکانیزم‌های مختلف استحکام‌دهی مانند: تشکیل محلول جامد، رسوب‌سختی و استحکام ناشی از مرزدانه در سوپرآلیاژهای پایه نیکل مورد بحث قرار خواهد گرفت. تأثیر درصد حجمی و اندازه ۷۰ روی خواص مکانیکی این سوپرآلیاژها نیز مطرح می‌شود. در این کتاب رفتار خزشی سوپرآلیاژهای پایه نیکل در دماها و تنش‌های مختلف مورد بررسی قرار خواهند گرفت. همچنین چند روش پیش‌بینی و تخمین عمر برای این آلیاژها مطرح خواهد شد.

این مجموعه بر آن است تا مفاهیم مرتبط با این موضوعات را به شکلی ساده و روان به خوانندگان منتقل نماید. منابع مورد استفاده در تهیه این کتاب، مراجع معتبر داخلی و خارجی و نتایج تحقیقات و پژوهش‌های متعدد نویسنده می‌باشد. از این روی، دانشجویان دوره‌های کاردانی، کارشناسی و تحصیلات تکمیلی رشته مهندسی متالورژی و مکانیک می‌توانند از این کتاب بهره‌ها گیرند. همچنین مطالعه این کتاب به محققین واحدهای تحقیق و توسعه شرکت‌ها و مراکز تحقیقاتی توصیه می‌گردد.

بدیهی است نخستین کسی که می‌باید با کمال خضوع و از اعماق جان از او تشکر کرد خداوند عالم و قادر است که توانایی تألیف این کتاب را به این جانب عطا فرمود. از الطاف بی‌پایان و بی‌شمار او که همه مخلوقات را فرا گرفته است شاکرم. از همسر و فرزندانم که صبورانه دشواری‌های زمان تألیف و تدوین این کتاب را تحمل نمودند سپاسگزارم. همچنین از مدیریت و کارشناسان محترم شرکت مهندسی مواد کاران، که تهیه بخشی از مطالب این کتاب با همکاری و مساعدت آنها صورت پذیرفته است، تشکر می‌شود. در تهیه این کتاب از نظریات و پیشنهادهای اساتید محترم گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شده است که به این وسیله از همه آنها تشکر و قدردانی می‌کنم. از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه جناب آقای دکتر شعبانی ورکی و همکاران ایشان که امکان چاپ و نشر این کتاب را فراهم نمودند نیز تشکر می‌نمایم.

سید عبدالکریم سجادی
استاد دانشگاه فردوسی مشهد
پاییز ۱۳۹۲