



انتشارات، شماره ۶۱۵

سوپر آلیزهای پایه نیکل

تألیف:

دکتر سید عبدالکریم سجادی
استاد گروه مهندسی متالورژی و مواد
دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

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.
 ردیف کتابگزین: ۹۱۳۹۲ س ۳ / TN ۷۰۰
 رده بندی: ۶۲۰/۱۸
 شماره کتابخانه: ۳۳۷۴۶



انتشارات، شماره ۱۵.

سوپر آلیاژهای پایه نیکل

تألیف

دکتر عبدالکریم سجادی

ویراستار علمی

دکتر علی حائریان اردکانی

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

امور قتی 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 گف	۹
فصل ۱ - معرفی، ترکیب شیمیایی و ریزساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل	۱۱
۱-۱) معرفی	۱۱
۲-۱) تاریخچه توسعه سوپرآلیاژهای پایه نیکل	۱۳
۳-۱) ترکیب شیمی	۱۵
۴-۱) مشخصه‌های متالورژیک	۲۱
۱-۴-۱) فاز زمینه γ	۲۱
۲-۴-۱) فاز رسوبی γ'	۲۲
۱-۲-۴-۱) ساختار و سینتیک فاز رسوبی γ'	۲۵
۲-۲-۴-۱) نقص چیدمان یا عیوب انداخته	۲۵
۳-۲-۴-۱) استحکام تسلیم γ'	۲۶
۴-۲-۴-۱) پایداری γ'	۲۶
۵-۲-۴-۱) تجزیه γ' به η (NiTi) و γ'' (Nb-Ta)	۲۸
۳-۴-۱) یونکتیک γ/γ'	۲۸
۴-۴-۱) کاربیدها	۲۹
۵-۴-۱) نبردها	۳۳
۶-۴-۱) فازهای مضر TCP	۳۳
۷-۴-۱) مرزدانه‌ای γ'	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 ماسه‌ریخته و ماسه‌سازی
۶۶	۵-۷-۲ آلودگی
۶۶	۶-۷-۲ ریخته‌گری در قالب
۶۷	۸-۲ انجماد
۶۷	۹-۲ ریخته‌گری در قالب
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	۲-۳ 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 رس
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	۳-۶-۳ بررسی ریزساختار سوپرآلیاژ IN-738LC تحت تأثیر عملیات حرارتی پیرسازی تحت تنش
۱۰۳	۲-۶-۳ نیروی محرکه‌ی ایجاد ساختار جهت‌دار تحت تأثیر تنش
۱۰۴	۳-۶-۳ تأثیر ساختار الواری روی خواص خزشی

۱۰۴.....	۳-۶-۴) تغییرات اندازه‌ی متوسط و درصد حجمی فاز ذرات γ در حین رشد.....
۱۰۷.....	مراجع.....

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

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

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

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

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	 (۴-۶) لغزش مرزدانه‌ای
۱۷۴	 (۱-۶) برخی مشخصات لغزش مرزدانه‌ای
۱۷۵	 (۳-۴-۶) مکانیزم‌های ایجاد لغزش مرزدانه‌ای
۱۸۰	 (۵-۳-۶) خزش هاربر - دورن
۱۸۰	 (۶-۳-۶) لغزش مرزدانه‌ای ناشی از نفوذ با خزش هاربر - دورن
۱۸۱	 (۷-۳-۶) مهاجرت مرز دانه
۱۸۱	 (۸-۳-۶) خزش نابجایی
۱۸۳	 (۴-۶) تغییر مکانیزم در خزش
۱۸۵	 (۵-۶) شکست در دماهای بالا
۱۸۶	 (۱-۵-۶) نقشه‌ی شکست دمای بالا
۱۹۰	 (۶-۶) تأثیر چند پارامتر متالورژیکی روی خزش
۱۹۰	 (۱-۶-۶) اندازه‌ی دانه
۱۹۱	 (۲-۶-۶) ترکیب شیمیایی
۱۹۱	 (۳-۶-۶) روش ذوب
۱۹۱	 (۴-۶-۶) کار مکانیکی
۱۹۲	 (۷-۶) رفتار خزشی سوپرآلیاژهای پایه نیکل
۱۹۲	 (۱-۷-۶) خزش مرحله‌ی اول
۱۹۳	 (۲-۷-۶) خزش مرحله‌ی دوم یا یکنواخت
۱۹۴	 (۳-۷-۶) مکانیزم‌های خزش در ناحیه‌ی سوم
۱۹۵	 (۸-۶) مکانیزم‌های تغییرشکل خزشی سوپرآلیاژ پایه نیکل GTD-111
۲۰۲	 (۹-۶) اثر فاز γ بر خواص خزشی
۲۰۷	 (۱۰-۶) اثر شیار بر خواص خزشی
۲۰۷	 (۱۱-۶) تأثیر شیار بر شکست
۲۰۷	 (۱-۱۰-۶) انعطاف‌پذیری خزشی چند محوره
۲۰۸	 (۲-۱۰-۶) روش‌های بررسی حالت چند محوره
۲۱۸	 (۲-۱۰-۶) تأثیر شیار بر عمر و رفتار خزشی سوپرآلیاژها
۲۱۸	 (۱-۲۰-۶) بررسی روش‌های رشد ترک خزشی در سوپرآلیاژها

۲۲۱	IN718 تأثیر شیار بر خواص خزشی و گسیختگی
۲۲۳	IN738LC تأثیر شیار روی عمر خزشی سوپرآلیاژ پایه نیکل
۲۲۸	(۱۱-۶) نقشه‌ی مکانیزم‌های تغییر شکل خزشی
۲۲۹	(۱۲-۶) روش‌های مخرب تخمین عمر
۲۲۹	(۱-۱۲-۶) پارامتر لارسون - میلر
۲۳۰	(۲-۱۲-۶) معادله‌ی مانکمن - گرانٹ
۲۳۱	(۳-۱۲-۶) معادله‌ی دایز - میلیکا
۲۳۲	(۴-۱۲-۶) معادله‌ی کول و همکاران
۲۳۳	(۵-۱۲-۶) روش θ -Projection
۲۴۲	(۱۲-۶) خصوصیات خزشی سوپرآلیاژ GTD-111
۲۴۵	مراجع
۲۴۹	فصل ۷ - تغییرات خواص مکانیکی و عیوب ناشی از خزش
۲۴۹	(۱-۷) سوپرآلیاژهای پایه نیکل
۲۴۹	(۱-۱-۷) تغییرات خواص مکانیکی
۲۵۰	(۲-۱-۷) تجزیه‌ی $(\text{Ni-Ti-Nb or Ta}) \gamma''$ و $(\text{Ni-Ti-Nb or Ta}) \gamma'$
۲۵۱	(۳-۱-۷) واکنش‌های پدید می‌آید
۲۵۲	(۴-۱-۷) فازهای مضر در خزش
۲۵۲	(۵-۱-۷) مرزدانه‌های γ'
۲۵۲	(۶-۱-۷) زوال ریزساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل
۲۵۶	(۲-۷) ترک‌ها و حفره‌های مرزدانه‌ای
۲۵۹	(۳-۷) به هم پیوستن حفرات
۲۶۵	(۴-۷) بازیابی و تشکیل شبکه‌ی نابجایی در فولاد γ/γ' و درون رسوب‌های γ'
۲۷۱	مراجع
۲۷۳	فصل ۸ - روش‌های برطرف کردن عیوب و تغییرات ریزساختاری ناشی از خزش
۲۷۳	(۱-۸) مقدمه
۲۷۴	(۲-۸) آنیل تحت فشار یا فشردن ایزواستاتیک داغ (HIP)
۲۷۶	(۳-۸) تأثیر HIP روی بستن حفره‌ها و افزایش چگالی قطعات ریختگی
۲۷۸	(۴-۸) اثرات HIP روی ساختار متالورژیکی پره‌های ریختگی
۲۷۹	(۵-۸) اثرات HIP روی خصوصیات مکانیکی پره‌های ریختگی
۲۸۲	(۶-۸) تأثیر متغیرهای HIP روی خصوصیات متالورژیکی و مکانیکی
۲۸۳	(۷-۸) بازسازی و تعمیر پره‌ها با استفاده از HIP
۲۸۷	(۸-۸) عوامل محدود کننده و عوارض منفی HIP
۲۹۰	مراجع
۲۹۱	واژه‌یاب

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 خواص 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 کربن و نیتروژن برای نگدازی با نقطه ذوب بالا استفاده شده است. قطعات تهیه شده از آلیاژهای دمای بالا با روش‌های خاص 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 سوپرآلیاژ 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 بار، دمای فاز رسوبی γ' و تجزیه آن، تشکیل فازهای مضر، واکنش‌های کاربیدی، تغییر مورفولوژی فازها، زردانه‌ای 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، تکنیک‌هایی که 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 (استاتیک (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 تغییر شکل 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 γ' 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 مبتدیان و متوسط ارائه دهد. 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 می‌تواند به این اقبال 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 تشکر می‌کنم. از همسر و فرزندانم که صبورانه دشواری‌های زمان تألیف و تدوین این کتاب را تحمل نمودند تشکر می‌کنم. همچنین از مدیریت و کارشناسان محترم شرکت مهندسی مواد کاران، که تهیه بخشی از منابع این کتاب با همکاری و مساعدت آنها صورت پذیرفته است، تشکر می‌شود. در تهیه این کتاب از کتاب‌های تالیفات 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 معاونان 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