

سوپر آلیاژهای تک بلور پایه نیکل

(ریخته گری، عملیات حرارتی، خواص مکانیکی و مشخصه یابی)

گردآوری:

دکتر علیرضا میرک - مجید حسین زاده - مجید عسگری

سرشناسه:

میرک، علیرضا، ۱۳۵۰ - گردآورنده.

عنوان و نام پدیدآور:

سوپر آلیاژهای تک بلور پایه نیکل: (ریخته گری، عملیات حرارتی، خواص مکانیکی و مشخصه یابی) / گردآوری علیرضا میرک، مجید حسین زاده، مجید عسگری.

مشخصات نشر:

تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، انتشارات. ۱۴۰۰

مشخصات ظاهری:

[۵]، ب، ۲۹۳ص: مصور، جدول

شابک:

۹۷۸-۶۲۲-۷۳۵۲-۴۳-۶

فهرست نویسی:

فیفا.

یادداشت:

واژه نامه.

یادداشت:

کتابنامه.

موضوع:

تک بلورها.

موضوع:

آلیاژهای نیکل.

موضوع:

سوپر آلیاژها.

شناسه افزوده:

حسین زاده، مجید، ۱۳۶۶ -

شناسه افزوده:

عسگری، مجید، ۱۳۴۴ -

شناسه افزوده:

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، انتشارات. ۱۴۰۰

رده بندی کنگره:

QD ۹۲۱

رده بندی دیویی:

۵۴۸

کتابشناسی ملی:

۸۶۶۹۸۱



مجمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

عنوان کتاب: سوپر آلیاژهای تک بلور پایه نیکل (ریخته گری، عملیات حرارتی، خواص مکانیکی و مشخصه یابی) / گردآوری: علیرضا میرک - مجید حسین زاده - مجید عسگری
ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
طرح روی جلد: جواد جلالی نژاد
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: دانشگاه صنعتی مالک اشتر
صفحه آرایی رایانه ای: مهدی ملایی
ویراستار ادبی: محسن ایزدپور
کارشناس امور فنی و اجرایی: فاطمه لژ
شمارگان: ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ: اول پاییز ۱۴۰۰
قیمت: ۸۰۰.۰۰۰ ریال

ISBN: 978-622-7352-43-6

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است.

آدرس: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، معاونت علوم تحقیقات و فناوری،

مدیریت دانش، انتشارات. تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

فهرست مطالب

پیشگفتار ۱

فصل اول: معرفی سوپرآلیاژهای تک بلور پایه نیکل ۳

۱-۱- مقدمه ۳

۱-۲- معرفی سوپرآلیاژهای پایه نیکل تک بلور ۵

۱-۳- کاربرد عمده سوپرآلیاژهای پایه نیکل تک بلور ۱۸

۴-۳- نقش عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژهای پایه نیکل تک بلور ۲۴

۴-۱-۱- عناصر اصلی ۲۵

۴-۱-۱-۱- کبالت ۲۵

۴-۱-۲-۱- کروم ۲۶

۴-۱-۳-۱- تنگستن ۲۶

۴-۱-۴-۱- تانتالم ۲۷

۴-۱-۵-۱- آلومینیم ۲۷

۴-۱-۶-۱- رنیم ۲۸

۴-۲-۱- عناصر جزئی ۲۸

۴-۲-۱-۱- روتنیم ۲۸

۴-۲-۲-۱- تیتانیم ۲۸

۴-۲-۳-۱- مولیبدن ۲۹

۴-۲-۴-۱- هافنیم ۲۹

۵-۱- ریزساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل تک بلور ۲۹

۵-۱-۱- فاز گاما ۳۰

۵-۱-۲- فاز گاما پرایم ۳۰

۵-۱-۳- فازهای TCP ۳۱

۵-۱-۴- کاربیدها ۳۲

- ۱-۵-۵- بورایدها..... ۳۴
- ۱-۶- بهینه سازی ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژهای تک بلور..... ۳۵
- ۱-۷- اکسیداسیون داغ..... ۴۷
- ۱-۸- خوردگی داغ..... ۵۴

فصل دوم: مبانی فناوریانه فرایند انجماد تک بلور سوپرآلیاژها..... ۶۷

- ۱-۲- روش ها و تجهیزات..... ۶۷
- ۲-۲- روش های رشد تک بلور سوپرآلیاژها..... ۷۰
- ۱-۲-۲- روش بریچمن با سازوکار انجماد با نرخ بالا..... ۷۰
- ۲-۲-۲- روش بریچمن با سازوکار سرد کردن با فلز مذاب (LMC)..... ۷۷
- ۳-۲-۲- روش بریچمن با سازوکار سرد کردن توسط گاز خنثی (GCC)..... ۸۰
- ۴-۲-۲- رشد تک بلور با شیب دمایی عمودی (VGF)..... ۸۲
- ۵-۲-۲- روش انجماد جهت دار به سمت پایین (DWDS)..... ۸۴
- ۶-۲-۲- رشد تک بلور به روش ذوب منطقه ای..... ۸۷
- ۳-۲- اجزاء قالب تک بلور..... ۸۸
- ۱-۳-۲- بلوک آغازگر..... ۸۹
- ۲-۳-۲- انتخابگر ماریچی (دم خوک)..... ۹۳
- ۳-۳-۲- بلوربذر..... ۹۴
- ۴-۲- مقایسه روش های مختلف رشد تک بلور سوپرآلیاژ..... ۹۸

فصل سوم: مبانی متالورژیکی فرایند انجماد تک بلور سوپرآلیاژها..... ۱۰۵

- ۱-۳- انجماد جهت دار..... ۱۰۵
- ۲-۳- سازوکارهای حرکت جبهه انجماد جهت دار..... ۱۰۹
- ۳-۳- عوامل مؤثر بر انجماد جهت دار سوپرآلیاژهای تک بلور..... ۱۱۲
- ۴-۳- تأثیر سرعت انجماد بر مشخصات ریزساختار سوپرآلیاژ تک بلور CMSX-4..... ۱۱۵
- ۱-۴-۳- درصد حجمی رسوب های گاما پرایم..... ۱۱۵

۱۱۶.....	۳-۴-۲- اندازه رسوب‌های گاما پرایم.....
۱۱۸.....	۳-۴-۳- تغییرات پارامتر شبکه گاما/گاما پرایم.....
۱۱۸.....	۳-۴-۴- فاصله بازوهای اولیه و انحراف زاویه‌ای از جهت رشد.....
۱۲۰.....	۳-۵- تأثیر متغیرهای فرایند بریجمن بر ساختار میکروسکوپی پره توربین تک‌بلور.....
۱۲۸.....	۳-۶- عیوب سوپرآلیاژهای تک‌بلور.....
۱۳۰.....	۳-۶-۱- دانه سرگردان.....
۱۳۵.....	۳-۶-۲- جدایش و اثر آن بر جبهه رشد تک‌بلور.....
۱۳۶.....	۳-۶-۳- اثر متقابل نواقص و تجمع ناخالصی بر جبهه رشد تک‌بلور.....
۱۳۸.....	۳-۶-۴- اثر جهت بلوری بر عیب جدایش.....
۱۴۳.....	۳-۶-۵- پدیده شناورسازی ساختار.....
۱۴۵.....	۳-۶-۶- آخال‌ها و فازهای TCP.....
۱۴۶.....	۳-۶-۷- نقص کک‌مکی.....
۱۵۲.....	۳-۶-۸- بررسی تخلخل‌ها.....
۱۵۸.....	۳-۷- روش‌های حذف عیوب از سوپرآلیاژهای تک‌بلور.....
۱۵۹.....	۳-۷-۱- روش تداوم دانه (GC).....
۱۶۰.....	۳-۷-۲- روش رسانای حرارت (HC).....
۱۶۵.....	۳-۷-۳- فرآیند گرمایش و سرمایش موازی (PHC).....
۱۷۱.....	۳-۷-۴- فناوری غوطه‌وری-بیرونکشی (D&H).....
۱۷۶.....	۳-۷-۵- سرمایش و گرمایش هدفمند (TCH).....
۱۷۹.....	۳-۷-۶- ترکیب روش‌های TCH و D&H.....
۱۸۱.....	۳-۸- شبیه‌سازی رایانه‌ای فرایندهای انجماد تک‌بلور.....
۱۸۱.....	۳-۸-۱- انجماد تک‌بلور یک خوشه پره توربین به روش بریجمن.....
۱۸۸.....	۳-۸-۲- انجماد تک‌بلور یک خوشه پره توربین به روش LMC.....
۱۹۴.....	۳-۸-۳- مقایسه فرایندهای بریجمن و LMC.....

- ۴-۱- عملیات حرارتی سوپرآلیاژهای پایه نیکل تک بلور..... ۲۰۹
- ۴-۲- پرس کاری ایزو استاتیک داغ پره توربین تک بلور..... ۲۱۶
- ۴-۳- اثر فرایند عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی سوپرآلیاژ CMSX-4..... ۲۲۶
- ۴-۳-۱- اثر عملیات حرارتی بر رفتار کششی سوپرآلیاژ تک بلور CMSX-4..... ۲۲۹
- ۴-۳-۲- اثر دما بر کرنش سختی و مدول الاستیک سوپرآلیاژ پایه نیکل..... ۲۳۴
- ۴-۳-۳- سازوکار تسلیم..... ۲۳۷
- ۴-۳-۴- تأثیر دما بر تنش برشی بحرانی..... ۲۳۸
- ۴-۳-۵- رفتار خزشی آلیاژ تک بلور CMSX-4 در جهت [۰۰۱]..... ۲۴۱
- ۴-۳-۶- رفتار کشش در جهت [۰۰۱]..... ۲۴۶
- ۴-۳-۷- رفتار خستگی..... ۲۴۸
- ۴-۳-۷-۱- عمر خستگی کم چرخه..... ۲۵۰
- ۴-۳-۷-۲- برهم کنش بارها: خزش خستگی کم چرخه..... ۲۵۳
- ۴-۳-۷-۳- برهم کنش بارها: خزش خستگی پر چرخه..... ۲۵۶
- ۴-۳-۷-۴- تأثیر بارگذاری پر چرخه بر گسیختگی..... ۲۵۸

فصل پنجم: روش های مشخصه یابی سوپرآلیاژهای تک بلور پایه نیکل..... ۲۶۵

- ۵-۱- آزمایش های شیمیایی..... ۲۶۵
- ۵-۱-۱- اسپکترومتری نشری..... ۲۶۵
- ۵-۱-۲- طیف سنجی پلاسمای جفت شده القایی..... ۲۶۶
- ۵-۱-۳- آزمایش لکو..... ۲۶۷
- ۵-۱-۴- تجزیه و تحلیل گاز..... ۲۶۷
- ۵-۲- آزمایش های مکانیکی..... ۲۶۸
- ۵-۲-۱- آزمایش کشش در دمای محیط..... ۲۶۸
- ۵-۲-۲- آزمایش کشش در دمای بالا..... ۲۷۰
- ۵-۲-۳- آزمایش های خزش و خستگی..... ۲۷۱
- ۵-۳- بررسی های ریز ساختاری..... ۲۷۳

۲۷۶..... ۴-۵- آزمایش پراش پرتو ایکس

۲۷۸..... ۴-۵-۱- روش‌های تعیین λ و θ در رابطه براگ

۲۸۷..... واژه‌نامه

۲۸۷..... فارسی به انگلیسی

۲۹۰..... انگلیسی به فارسی

پیشگفتار

سوپرآلیاژهای تک‌بلور^۱ پیچیده‌ترین گروه از آلیاژهای فلزی هستند که با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فردشان در صنایع خاصی نظیر تولید برق صنعتی، نفت، گاز، پتروشیمی، دریایی و ساخت موتورهای جت هوایی کاربرد دارند. مزایای استفاده از این دسته سوپرآلیاژها در مقایسه با سایر آلیاژهای فلزی کاربرد آنها در دمای بالا است. سوپرآلیاژهای پایه نیکل تک‌بلور می‌توانند به دلیل خواص مکانیکی مناسب در دمای بالا و مقاومت به اکسیداسیون مناسب در پره‌های توربین فشار بالای موتورهای هوایی به کار گرفته شوند که اساساً در معرض نیروهای گریز از مرکز و دمای بالا در حال سرویس هستند. سوپرآلیاژهای تک‌بلور به دلیل عدم وجود مرزهای دانه که اغلب به عنوان محل‌های شروع ترک عمل می‌کنند، مقاومت به تنش گسیختگی بسیار زیادی نسبت به سوپرآلیاژهای چندبلور^۲ در دماهای بالا و همچنین افزایش قابل توجهی در مقاومت نسبت به خستگی دمايي دارند. این کتاب با استفاده از بیشترین ظرفیت‌های تحقیقاتی و عملیاتی کشور و گردآوری بیش از دویست مستند شامل کتاب، مقاله، ثبت اختراع و پایان‌نامه در حوزه رشد تک‌بلور سوپرآلیاژهای پایه نیکل تدوین شده است. مجموعه حاضر دارای پنج فصل است. فصل اول شامل شناسایی و مشخصه‌یابی نسل‌های اول تا چهارم سوپرآلیاژهای تک‌بلور، مسیر تکامل آنها تا نسل ششم و کاربردهای آنها است. در فصل دوم و سوم به ترتیب مبانی فناوریانه و متالورژیکی فرایندهای رشد تک‌بلور شامل بریجمن و شرایط رشد تک‌بلور سوپرآلیاژها اشاره شده است. در

1- Single crystal

2- Polycrystal

فصل چهارم عملیات حرارتی و اثر آن بر خواص مکانیکی سوپرآلیاژهای تک‌بلور مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. فصل پنجم نیز متضمن معیارهای ارزیابی، روش‌های آزمایش و معرفی تجهیزات مورد نیاز برای مشخصه یابی سوپرآلیاژهای تک‌بلور است. این مجموعه حاصل تلاش متخصصان این حوزه برای دستیابی به قابلیت علمی و عملیاتی رشد تک‌بلور سوپرآلیاژ پایه نیکل در کشور به امید برداشتن گامی هرچند کوچک ولی مؤثر در راستای اعتلای جایگاه کشور در حوزه‌ی فناوری تولید تک‌بلور سوپرآلیاژها است.

مترجمان

پاییز ۱۴۰۰